

# МИКРОЭКОНОМИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ САМОРАЗВИТИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Л. А. Серков

*Рассматриваются различные механизмы формирования ожиданий экономических агентов. При этом формирование ожиданий на основе адаптивного обучения рассматривается как один из механизмов континуальной самоорганизации ожиданий экономических агентов на микроэкономическом уровне. Саморазвитие этого процесса определяет эволюцию экономической системы. В рамках неоклассической модели исследуется саморазвитие как процесс схождения ожиданий с ограниченной рациональностью к равновесию рациональных ожиданий. Показано, что ключевым фактором, влияющим на схождение, является гибкость цен.*

Проблема саморазвивающихся систем в последние годы стала привлекать пристальное внимание специалистов различных научных направлений. В основе саморазвития лежат целенаправленный отбор и накопление информации, повышающей уровень организации структуры и функциональные возможности системы при взаимодействии их с внешней средой [3, с. 19]. Вопросам саморазвития посвящено множество публикаций. При этом в большинстве работ необоснованно происходит отождествление процессов саморазвития и самоорганизации. Между тем эти процессы различаются по своим механизмам. Автор предлагаемой публикации пытается обосновать процессы саморазвития и самоорганизации экономических систем в рамках микроэкономического подхода, опираясь при этом на взгляды и идеи А.П. Руденко<sup>1</sup>[2].

Согласно А.П. Руденко, следует различать процессы двух видов: самоорганизации и саморазвития. Процессы самоорганизации на макроуровне — это процессы самозарождения, возникновения структур за счет когерентной синхронизации множества однообразных элементов сложной системы. Образовавшаяся в результате такой когерентной самоорганизации структура находится в состоянии динамического равновесия, но не развивается, то есть не приобретает новых качеств. Именно

такие процессы являются предметом исследования в синергетической теории. Процессы саморазвития протекают совсем иначе, чем процессы когерентной самоорганизации. За развитие этих процессов ответственна другая самоорганизация — континуальная (синкретическая) самоорганизация, происходящая на микроуровне. Основным характерным признаком процессов саморазвития является приобретение экономической системой новых качеств. Для саморазвивающейся системы характерна высокая специализация и различимость ее элементов. Такая структура синкретична, то есть целостна в отличие от структуры, организованной по принципу когерентной самоорганизации. Главным достоинством предложенной А.П. Руденко континуальной самоорганизации является то, что именно такой подход позволяет провести рассмотрение связи самоорганизации и саморазвития. Он считал, что сущность прогрессивной эволюции состоит в саморазвитии континуальной самоорганизации индивидуальных объектов. Способностью к саморазвитию и прогрессивной эволюции с естественным отбором обладают только индивидуальные микрообъекты с континуальной самоорганизацией.

Применение описанного подхода к экономическим системам, характеризующимся неопределенностью, неизбежно предполагает учет ожиданий экономических агентов. Поэтому ключевой идеей в данной работе является идея о том, что самоорганизация ожиданий экономических агентов является континуальной

<sup>1</sup> Александр Прокофьевич Руденко — ученый-химик. Большинство своих работ он посвятил вопросам саморазвития.

(синкретической — по А.П. Руденко [2]) самоорганизацией. Таким образом, эволюция экономической системы в рамках предлагаемого подхода рассматривается как саморазвитие самоорганизации ожиданий экономических агентов. Именно данное саморазвитие является драйвером экономического роста и деловых циклов. В отличие от континуальной, когерентная самоорганизация заключается в образовании функциональных диссипативных структур, в роли которых выступают производители, финансовые посредники, центробанк и т. д.

Прежде чем анализировать самоорганизацию ожиданий экономических агентов, рассмотрим трактовку ожиданий в экономической теории. Обсуждение проблемы ожиданий берет начало в работах Найта [8], Кейнса [7], Мута [11] и др. Механизмы формирования ожиданий и их воздействие на принятие решений являются важнейшей проблемой с точки зрения экономической динамики. В современной экономической теории обычно рассматриваются два вида ожиданий — адаптивные и рациональные.

Гипотеза адаптивных ожиданий (ГАО) была впервые использована Койком [9] в эмпирическом анализе инвестиций. Пусть  $y_t^e$  — ожидания  $y_t$ , сформированные в период  $t-1$  на основе информационного множества  $\Omega_{t-1}$ . Тогда ГАО первого порядка может быть записана как:

$$y_t^e - y_{t-1}^e = \beta^*(y_{t-1} - y_{t-1}^e), \quad 0 < \beta < 1, \quad (1)$$

где  $\beta$  — коэффициент адаптации, определяющий величину пересмотра ожиданий. Согласно ГАО, изменение ожиданий предполагается пропорциональным величине последней ошибки ожиданий.

Решение уравнения (1) дает экстраполяционный механизм формирования ожиданий

$$y_t^e = \sum_{i=1}^{\infty} \omega_i \times y_{t-i} \quad (2)$$

с геометрически уменьшающимися весами

$$\omega_i = \beta \times (1 - \beta)^{i-1}, \quad i = 1, 2, \dots \quad (3)$$

Следует отметить, что в общем случае ГАО не дает оптимальных предсказаний [12]. Существенным недостатком ГАО является игнорирование возможных воздействий на ожидания переменных, отличных от  $y_t$ . Кроме того, в моделях с адаптивными ожиданиями предполагается фиксированность весов  $\omega_i$ , то есть их инвариантность к изменениям во внешней среде, таким как изменение государственной политики, технологий и т. д. Отмеченные не-

достатки отсутствуют в моделях с рациональными ожиданиями экономических агентов.

Гипотеза рациональных ожиданий (ГРО), выдвинутая Мутом [11], противоположна гипотезе адаптивных ожиданий. Идея Мута была подхвачена и применена к большому спектру моделей Р. Лукасом [10]. В настоящее время практически все структурные модели экономики (*dsge*-модели — динамические стохастические модели общего равновесия) построены на основе ГРО. В соответствии с ГРО экономические агенты формируют свои ожидания оптимальным образом на основе «истинной» структурной модели экономики, а субъективные ожидания индивидов соответствуют объективным ожиданиям, полученным на основе этой истинной модели. Именно равенство субъективных и объективных ожиданий экономических агентов составляет суть ГРО. Рассмотрим два варианта понятия рациональных ожиданий — в сильной и слабой форме [1].

Обозначим через  $I_{t,h}$  информационное множество, доступное агенту  $h$  в конце периода  $t$ . Информационное множество образуют известные (наблюдаемые) агенту значения экономических показателей. Пусть  $E_{t,h}u_{t+k}$  субъективное ожидание (прогноз), сформированное агентом  $h$  относительно значения, которое примет переменная  $u$  в период времени  $t+k$ ,  $k \geq 1$ . Пусть также  $E u_{t+k} | I_{t,k}$  — объективное, то есть вычисленное в силу модели, связывающей, в конечном счете, решения всех агентов, ожидания значения  $u_{t+k}$  при условии  $I_{t,h}$  (через  $E$  здесь обозначен оператор математического ожидания). Объективное и субъективное ожидания могут не совпадать ввиду ошибки наблюдения или преднамеренного отказа агента от полного использования  $I_{t,h}$  в силу каких-либо причин. Говорят, что агент  $h$  обладает рациональными ожиданиями в слабой форме в отношении  $u_{t+k}$ , если

$$E_{t,h}u_{t+k} = E_{u_{t+k} | I_{t,h}} + \varepsilon_{t,h}, \quad \text{где } E_{\varepsilon_{t,h} | I_{t,h}} = 0. \quad (4)$$

Агент обладает рациональными ожиданиями в сильной форме, если агент обладает рациональными ожиданиями в слабой форме и его информационное множество на конец периода  $t$  содержит следующую информацию:

- подлинную структуру уравнений и классификацию переменных модели, включая правила принятия решения всех других агентов, применяемые для определения действий и формирования ожиданий;
- подлинными значениями всех детерминированных экзогенных переменных модели;

- распределение вероятностей всех экзогенных случайных величин;
- реализовавшиеся значения всех эндогенных величин, наблюдаемых в модели на конец периода  $t$ .

Таким образом, речь идет о том, что агент может провести расчеты по модели, делая различные предположения о ненаблюдаемых переменных (например, переменных состояниях других агентов). Сопоставив результаты расчетов со значениями наблюдаемых переменных (например, рыночными ценами) и отобрав согласующиеся с ними гипотезы о ненаблюдаемых переменных, агент должен получить однозначный прогноз тех переменных (информационных), которые в рамках модели влияют на его решение, без систематической ошибки (см. (4)).

Ожидания, формируемые рационально, обладают определенными свойствами оптимальности, самым важным из которых является свойство ортогональности (отсутствие корреляции) ошибок ожиданий к переменным в информационном множестве агента [12]. Заметим, что это свойство нарушается для неправильно специфицированной модели или для модели с неверными значениями параметров.

Хотя большинство современных макроэкономических моделей используют гипотезу рациональных ожиданий, многие экономисты считают предположения, лежащие в ее основе, слишком строгими и ограничительными. ГРО предполагает существование идеальной экономической системы, где налицо все предусмотренные авторами модели параметры. Рациональные ожидания предполагают, что экономические агенты обладают всей полнотой информации, необходимой для построения прогнозов, а также навыками ее мгновенной и безошибочной обработки. Очевидно, в своей практической работе экономисты, исследователи, политики сталкиваются с серьезными информационными ограничениями и невозможностью достоверно судить о природе экономических взаимосвязей. Кроме того, в рамках моделей с рациональными ожиданиями не всегда удается объяснить наблюдаемое поведение макроэкономических переменных.

В качестве одного из альтернативных подходов моделирования ожиданий в последнее время рассматривается процесс адаптивного обучения, в рамках которого предполагается, что экономические агенты формируют ожидания, следуя определенному правилу. При этом они не обладают всей полнотой информации

(ограниченная рациональность) о структуре и взаимосвязях в экономике, но с течением времени, по мере поступления новой информации, корректируют свои знания (правила) и, соответственно, прогнозы, которые строятся на их основе [5]. Именно корректировка знаний отличает формулируемый подход к моделированию от подхода на основе обычных адаптивных ожиданий. При адаптивном обучении агенты эконометрически (чаще всего с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов) оценивают уравнения динамики переменных, формируя свои правила — собственный воспринимаемый закон движения (*perceived law of motion* — *PLM*). Функциональная форма этого закона обычно совпадает с формой решений уравнений динамики переменных при выполнении ГРО, но параметры уравнений *PLM* зависят от времени и постоянно обновляются (как только поступает новая информация).

В ряде работ [4, 6] доказывается, что динамические стохастические модели общего равновесия, в основе которых лежит формирование прогнозов с помощью адаптивного обучения, более адекватно описывают экономическую систему и политику экономических агентов (по сравнению с моделями, основой которых является концепция рациональных ожиданий).

В соответствии с ключевой идеей, сформулированной в начале публикации, автор утверждает, что формирование ожиданий на основе адаптивного обучения является одним из механизмов континуальной самоорганизации ожиданий экономических агентов на микроэкономическом уровне. Саморазвитие этого процесса определяет эволюцию экономической системы.

Следует отметить, что модели с адаптивным обучением также несвободны от критики. Главным недостатком этого подхода является то, что он не допускает возможности пересмотра правил обучения. Поэтому подход к моделированию на основе адаптивного обучения оправдан в том случае, если выбранное правило обучения гарантирует сходимости к уравнению рациональных ожиданий.

Не имеется никаких общих результатов относительно сходимости моделей с адаптивным обучением агентов к равновесию рациональных ожиданий. Так как процесс сходимости в рамках предлагаемого подхода определяет саморазвитие континуальной самоорганизации ожиданий, то интересно исследовать сам этот процесс и факторы, влияющие на него. Так как

гипотеза рациональных ожиданий является, в первую очередь, продуктом новейшей эволюции неоклассицизма, то целесообразно рассмотреть процесс сходимости (саморазвитие континуальной самоорганизации ожиданий) и факторы, влияющие на него, в рамках простой неоклассической модели, описываемой следующими уравнениями:

$$y_t = \gamma(p_t - E_t p_{t+1}), \quad (5)$$

$$y_t = m_t - p_t, \quad (6)$$

$$m_t = \mu_t + \rho_m m_{t-1} + \varepsilon_t, \quad (7)$$

где все переменные выражены в логарифмах,  $y_t$  — отклонение объема выпуска от потенциального объема;  $p_t$  — уровень цен;  $m_t$  — номинальная денежная масса;  $E_t p_{t+1}$  — ожидания (не обязательно рациональные), формируемые агентами (производителями) в момент времени  $t$  на основе информации, доступной в этот момент времени, относительно уровня цен в момент  $t+1$ . Уравнение (5) описывает совокупное предложение в контексте теории несовершенной информации Р. Лукаса [10] (параметр корректировки  $\gamma > 0$ ). Уравнение (6) описывает совокупный спрос со стороны частного сектора<sup>1</sup>. Наконец, уравнение (7) описывает денежную политику монетарных властей. Правая часть этого уравнения состоит из двух частей: авторегрессионное (первого порядка) слагаемое, включающее стохастический в виде белого шума монетарный шок  $\varepsilon_t \sim N(0, \sigma^2)$ , и слагаемое  $\mu_t \in \{\mu_{low}, \mu_{high}\}$ , описывающее бинарный режим переключения монетарной политики. С одной стороны, эта переменная введена для качественной оценки скорости схождения к равновесию рациональных ожиданий, с другой стороны, переключение режимов имеет вполне определенное экономическое обоснование, связанное, например, с изменением государственных расходов. Для упрощения примем, что  $\mu_{low} = -\mu_{high}$  и вероятность переключения режимов равна  $(1-\rho)$ . Так как нас интересуют чисто колебательные режимы, то в уравнение (7) сознательно не включено трендовое слагаемое, связанное с ростом номинальной денежной массы. В уравнениях модели (5)–(7) все переменные являются агрегированными, то есть эта модель описывает экономику репрезентативного агента (все агенты при обучении используют один и тот же алгоритм).

<sup>1</sup> Это уравнение при переходе от логарифмов к исходным уровням определяет объем выпуска в номинальном денежном выражении.

Приравнявая спрос и предложение получим уравнение для равновесного уровня цен

$$p_t = m_t / (1+\gamma) + \gamma E_t p_{t+1} / (1+\gamma), \quad (8)$$

где изменение денежной массы описывается уравнением (7).

Самоорганизация ожиданий проявляется в формировании агентами в процессе адаптивного обучения закона движения (*PLM*) для информационной переменной  $p_{t+1}$  с помощью метода наименьших квадратов, прогнозирования  $E_t p_{t+1}$  и определении равновесной рыночной цены  $p_t$  на основе уравнения (8). При формировании *PLM* агенты используют регрессионную модель

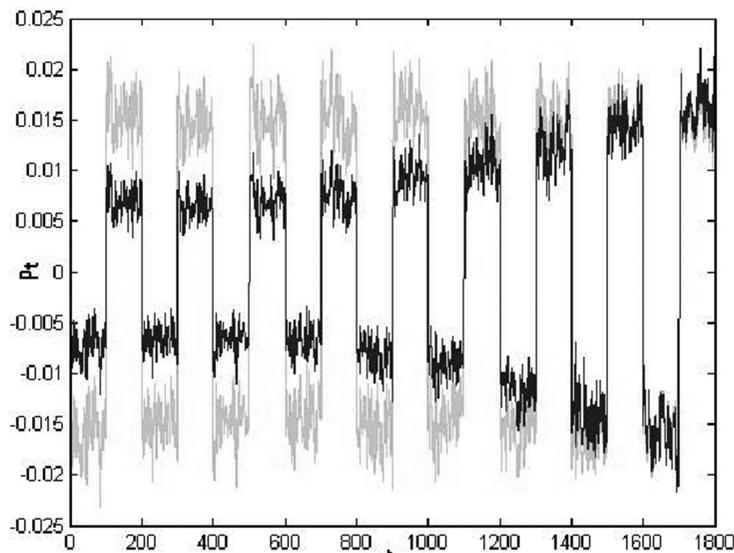
$$p_t = \beta_{o,t} + \beta_{1,t} i_t + \beta_{2,t} m_{1,t} + \beta_{3,t} i_t m_{1,t}, \quad (9)$$

где  $i_t \in \{-1, 1\}$  — индикаторная переменная, идентифицирующая один из двух режимов переключения;  $m_{1,t}$  — авторегрессионная часть уравнения (7), не включающая переменную  $\mu_t$ . Процесс саморазвития заключается в постоянном обновлении после каждого периода оценок параметров  $\beta_{s,t}$  с помощью рекурсивного метода наименьших квадратов<sup>2</sup> [5].

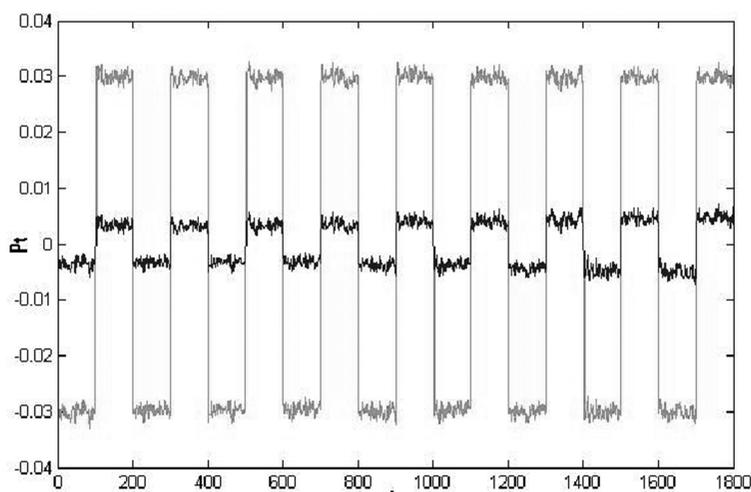
В результате проведенного численного исследования модели<sup>3</sup> установлено, что процесс схождения равновесной цены при адаптивном обучении агентов к равновесной цене при рациональных ожиданиях очень чувствителен к значению параметра корректировки  $\gamma$  (рис. 1, 2). Так как этот параметр определяет наклон кривой совокупного предложения ( $\Delta P_t / \Delta Y_t = 1/\gamma$ ), то из анализа рисунков 1, 2 следует, что с увеличением крутизны этой кривой (уменьшением  $\gamma$ ) процесс схождения к равновесию рациональных ожиданий замедляется вплоть до прекращения саморазвития (рис. 2). Напротив, при больших значениях  $\gamma$  (более пологая кривая совокупного предложения) этот процесс ускоряется (рис. 1). Таким образом, в рамках исследуемой неоклассической модели гибкость цен является определяющим фактором при самоорганизации ожиданий и саморазвитии этой самоорганизации. Чем меньше гибкость цен, тем быстрее экономический агент может правильно прогнозировать будущие значения этих информационных переменных. Сопоставление процессов сжог-

<sup>2</sup> Алгоритм рекурсивного метода наименьших квадратов состоит из двух уравнений обновления: одного для обновления параметров, входящих в прогнозные функции, и другого — для обновления оценок матрицы вторых моментов этих параметров.

<sup>3</sup> Численный анализ уравнений модели проводился в п/п Matlab.



**Рис. 1.** Временные колебания равновесной цены при рациональных ожиданиях агентов (светлые линии) и при адаптивном обучении (темные линии). Значение параметра  $\gamma = 2$ . Значения остальных параметров:  $\mu_{low} = -0.01$ ,  $\rho_m = 0.5$ ,  $\rho = 0.99$ ,  $\sigma^2 = 0.01$



**Рис. 2.** Временные колебания равновесной цены при значении параметра  $\gamma = 0.5$

дения к равновесию рациональных ожиданий (рис. 1) и режимов переключения монетарной политики показывает достаточно медленную скорость сходимости (даже при очень низкой вероятности переключения режимов). Еще раз отметим, что приведенные результаты справедливы для экономических агентов, обучающихся по одному алгоритму. В случае неоднородных агентов результаты могут измениться.

Главным выводом проведенного анализа является важность микроэкономического обоснования (учет ожиданий агентов) при разработке макроэкономических моделей. В современном понимании макроэкономическая мо-

дель — это микроэкономически обоснованная модель, описывающая принятие оптимальных решений экономическими агентами (поведенческие уравнения). Требования к этому классу моделей соответствуют динамические стохастические модели общего равновесия (*dsge*-модели), как неоклассические, так и неокейнсианские. К сожалению, гипотеза адаптивного обучения агентов в силу вычислительных затруднений реализована пока для среднemasштабных (*media-scale*) моделей этого класса [13]. Реализация этой гипотезы для крупномасштабных моделей (*large-scale*) экономики — цель будущих исследований.

#### Список источников

1. Андреев М. Ю., Поспелов И. Г. Принцип рациональных ожиданий. Обзор концепций и примеры моделей. — М.: ВЦ РАН, 2008. — 79 с.

2. Руденко А. П. Теория саморазвития открытых каталитических систем. М.: Изд — во МГУ, 1969. — 276 с.
3. Саморазвивающиеся социально-экономические системы, Теория, методология, прогнозные оценки: в 2-х т. / Рос. акад. наук, Урал. отд-ние; под общей ред. А. И. Татаркина; [редкол.: Татаркин А.И. (отв. ред.) и др.]. — М.: ЗАО «Издательство экономика»; Екатеринбург: УрО РАН, 2011. — Т. 1: Теория и методология формирования саморазвивающихся социально-экономических систем. — 308 с.
4. Evans G. W., Honkapohja S. Adaptive Learning and Monetary Policy Design // Journal of Money, Credit and Banking. — 2003. — P. 1045-1072.
5. Evans G. W., Honkapohja S. Learning Dynamics. Handbook of Macroeconomics / ed. by J. B. Taylor, M. Woodford. — 1999. — Vol. 1. — Ch. 7.
6. Evans G., McGough B. Monetary policy, indeterminacy and learning // Journal of Economic Dynamics and Control. — 2005. — P. 1809-1840.
7. Keynes J. M. The General Theory of Employment, Interest and Money. — London: Macmillan, 1936.
8. Knight F. K. Risk, Uncertainty and Profit. — London: Frank Cass, 1921. — 380 p.
9. Koyck L. M. Distributed Lags and Investment Analysis. — Amsterdam, North-Holland, 1954.
10. Lucas R. J. Expectations and the neutrality of money // Journal of Economic Theory. — 1972. — P. 103-124.
11. Muth J. F. Rational expectations and the theory of price movements // Econometrica. — 1961. — P. 315-335.
12. Pesaran M. H. The Limits to Rational Expectations. — Oxford: Basil Blackwell, 1987. Reprinted with corrections, 1989.
13. Slobodyan S., Wouters R. Learning in a Medium-Scale DSGE Model with Expectations Based on Small Forecasting Models // American Economic Journal. Macroeconomics. — 2012. — P. 65-101.

УДК 332.012.2+332.1

**Ключевые слова:** самоорганизация, саморазвитие, адаптивные ожидания, рациональные ожидания, адаптивное обучение