

# СИСТЕМНАЯ ДИНАМИКА И АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ: НЕОБХОДИМОСТЬ КОМБИНИРОВАННОГО ПОДХОДА

Д.Ю. Каталевский, МРА, к.э.н.<sup>1</sup>

## 1) Экономика сложности: потребность в новых подходах к моделированию

Сегодня мы являемся свидетелями, пожалуй, одной из самых значительных трансформаций экономической науки за всю ее историю. Пока еще трудно оценить полностью последствия сдвига экономической парадигмы, поскольку сегодня, по мнению автора, экономика находится в своеобразной «точке бифуркации», из которой эта дисциплина выйдет качественно преобразившейся. Как отмечает Эрик Бейнхокер, мы являемся свидетелями перехода «от традиционной экономики к экономике сложности (complexity economy)»<sup>2</sup>. Во многом это обусловлено множеством исследований, проведенных за последние три десятилетия, опровергающих один из главных постулатов классической экономики о рациональности поведения экономических агентов.

За последние тридцать лет множество ученых из самых различных областей внесли значительный вклад в понимание иррациональной природы принятия решений. Фундаментальными трудами в данной области принято считать исследования Дэниэла Канемана (Daniel Kahneman) и Амоса Тверски (Amos Tversky), специалистов в области когнитивной психологии. В своих работах Д.Канеман и А.Тверски показали, что в реальности люди плохо справляются с решениями, где требуется логический анализ, зато достаточно успешны в быстром распознавании шаблонов /образцов поведения или ситуаций, подвержены влиянию эффектов якорения (anchoring), а также в интерпретации информации на основе собственного субъективного опыта, руководствуясь интуитивными решениями (зачастую ошибочными)<sup>3</sup>.

Исследования Д. Канемана и А. Тверски, Р. Талера<sup>4</sup>, А. Рубенштейна<sup>5</sup>, К. Камерера<sup>6</sup>, Дж. Лоуэнстайна<sup>7</sup>, Б. Артура<sup>8</sup> и многих других позволили создать целую область экономики – поведенческую экономику (behavioral economics), занимающуюся изучением иррациональных особенностей принятия решений. В совокупности данные

---

<sup>1</sup> Автор – преподаватель Факультета государственного управления и Высшей Школы Инновационного Бизнеса (ВШИБ) МГУ им. М.В. Ломоносова, один из основателей InteractiveLabs ([www.interactivelabs.ru](http://www.interactivelabs.ru)). Связаться с автором можно по электронной почте [dkatalevsky@yahoo.com](mailto:dkatalevsky@yahoo.com)

<sup>2</sup> *Beinhocker, Eric D.* The Origin of Wealth: Evolution, Complexity and the Radical Remaking of Economics. Random House Business Book, 2007.

<sup>3</sup> *Kahneman, Daniel.* Maps of Bounded Rationality: a Perspective on Intuitive Judgement and Choice. Nobel Prize lecture, December 8, 2002; *Kahneman D., Tversky, A.* Prospect theory: An analysis of decisions under risk. *Econometrica*, 47. 1979. Pp. 313-327;

<sup>4</sup> *Thaler, R.H.* Mental accounting matters. *Journal of Behavioral Decision Making* 12 (3). 1999. Pp.183-206

<sup>5</sup> *Rubinstein, A.* Modelling Bounded Rationality. Cambridge, MA, MIT Press. 1998

<sup>6</sup> *Camerer, C.F.* Behavioral game theory: Experiments on strategic interaction. Princeton, Princeton University Press. 2003

<sup>7</sup> *Loewenstein, G. And T.O'Donoghue.* Animal Spirits: Affective and Deliberative Influences on Economic Behavior, Carnegie Mellon University. 2004.

<sup>8</sup> *Arthur, W.B.* Designing Economic Agents that act like human agents: A Behavioral Approach to Bounded Rationality. *The American Economic Review* 81(2). 1991. Pp. 353-359

исследователи опровергают традиционный тезис о том, что люди как экономические агенты стремятся максимизировать полезность при принятии решений. Например, Герберт Саймон полагал, что при принятии решений человек стремится не максимизировать свою потребность, а скорее принять наиболее удовлетворительное решение, которое даст средний результат. Например, при выборе станции заправки рациональное принятие решений потребует посетить все доступные станции в округе и выбрать наиболее дешевую, тогда как согласно Г. Саймону человек доедет до ближайшей заправки и в случае, если цены там будут в целом приемлемыми, там и заправится.

«Экономика сложности» в настоящий момент не является четко оформившейся научной дисциплиной – скорее это область междисциплинарных исследований, включающих в себя аспекты поведенческой экономики, теории сетей (network theory), имитационного моделирования, теории хаоса, а также идеи, заимствованные из физики, биологии, антропологии, когнитивной психологии и других естественнонаучных и гуманитарных дисциплин. Широкую известность получил Институт Санта Фе (Santa Fe Institute), некоммерческая организация, финансирующаяся ведущими международными корпорациями, которая занимается изучением различных аспектов теории сложности и возможностями их практического приложения.

	Экономика сложности (complexity economy)	Традиционная экономика
<b>Динамика</b>	Открытая внешней среде, нелинейное изменение, находится в неравновесном состоянии, изменяющаяся	Статичная, находится в состоянии равновесия, закрытая система
<b>Агенты</b>	Имитация поведения на индивидуальном уровне, использование сложных правил принятия решения (как рациональных, так и иррациональных), самообучающиеся, принимают решения в условиях неполноты информации	моделирование обобщенного/агрегированного поведения, рациональный подход к принятию решений (максимизация полезности), полнота информации
<b>Сетевые эффекты</b>	Учитываются;	не учитываются
<b>«Возникаемость»</b>	Нет жесткого разделения на микро-и макроэкономику; поведение системы возникает из взаимодействия на микроуровне	Разделение на микроэкономику и макроэкономику

**Источник:** *Beinhocker, Eric D. The Origin of Wealth: Evolution, Complexity and the Radical Remarking of Economics. Random House Business Book, 2007, page 97.*

Представление об экономике как о *сложной адаптивной системе* влечет необходимость поиска и применения новой методологии, которая бы позволила моделировать «возникаемость» процессов. Понимая, что поведение системы формируется из взаимодействия множества агентов, каждый из которых обладает определенными особенностями поведения, пытаться прогнозировать поведение социальной системы становится чрезвычайно сложно. Некоторые исследователи предлагают изучать экономические системы посредством их искусственного воспроизведения (R. Axtell<sup>9</sup>, E.

<sup>9</sup> *Axtell, R. Why agents? On the varied motivations for agent computing in the social sciences, Working paper 17, Center on Social and Economic Dynamics, Brookings Institution, Washington, D.C. 2000*

Bonabeau<sup>10</sup>, J. Epstein<sup>11</sup> и другие). Например, Р. Аксельрод отмечает привлекательность агентного подхода к моделированию сложных социально-экономических систем следующим образом:

«Социальные науки стремятся понять не только, каким образом складывается поведение индивидов, но также и то, как взаимодействие между многими индивидами приводит к возникновению значительных последствий. Для понимания политической или экономической системы требует больше, чем простое понимание [поведения] индивидов в данной системе. Необходимо понимать, как индивиды взаимодействуют друг с другом и каким образом вследствие этого результат становится больше, чем сумма частей...»<sup>12</sup>.

Применение агентного моделирования позволяет выявлять, как значительные социальные последствия рождаются из небольших и на первый взгляд даже незначительных факторов, определяющих поведение и взаимодействие многих агентов.

Агентное моделирование как раз является инструментом, при помощи которого возможно успешное моделирование сложных адаптивных систем. Агентное моделирование позволяет моделировать не агрегированные элементы системы, как, например, это делает системная динамика при помощи системы потоков и накопителей, а напротив, базируется на идее моделирования процессов «снизу-вверх»: в основе модели лежит набор основных элементов, из взаимодействия которых рождается обобщенное поведение системы. Важно понимать, что в данном случае задача не найти оптимальное экономическое равновесие, а попытаться понять природу в основе сложных социальных явлений. «Возникающее» поведение (emergent behavior) представляет собой результат взаимодействия элементов системы. Соответственно, в рамках данного подхода к моделированию возникает необходимость корректно отобразить механизм поведения и взаимодействия элементов системы – т.н. «агентов». Агентами, например, могут быть не только индивидуумы (продавцы, покупатели, избиратели и т.п.), но также и социальные группы – семьи, компании и т.п.

Для экономических моделей основным элементом является некое количество взаимодействующих между собой «агентов». Ю.Г. Карпов отмечает, что агент представляет собой «некую сущность, которая обладает активностью, автономным поведением, может принимать решения в соответствии с некоторым набором правил, может взаимодействовать с окружением и другими агентами, а также может изменяться»<sup>13</sup>. Одно из наиболее полных определений агентов приводят Чарльз Макал и Михаэль Норт в работе “Tutorial on agent-based modeling and simulation”, согласно которым агент должен обладать следующими характеристиками:

- Агента является «идентифицируемым», т.е. представляет собой конечного индивидуума с набором определенных характеристик и правил, определяющих его поведение и правила принятия решений. Агент автономен и может независимо действовать и принимать решения по взаимодействию с другими агентами.

---

<sup>10</sup> Bonabeau, E. Agent-based modeling: methods and techniques for simulating human systems. *Proceedures National Academy of Sciences* 99 (3), 2001. Pp. 7280-7287

<sup>11</sup> Epstein, J., M. and R. Axtell. *Growing artificial societies: social science from the bottom up*. Cambridge, MA: MIT Press. 1996

<sup>12</sup> Tesfatsion, L. and Kenneth L. Judd. *Handbook of Computational Economics, Vol.2: Agent-Based Computational Economics*. Handbooks in Economics Series, North-Holland, Amsterdam. 2006

<sup>13</sup> Карпов Ю.Г. Имитационное моделирование систем.

- Агент находится в определенной среде, позволяющей ему взаимодействовать с другими агентами. Агент может коммуницировать с другими (контактировать при определенных условиях и отвечать на контакт).
- Агент имеет определенную цель (но не обязательно целью является максимизация блага, как принято считать в классической экономике), влияющую на его поведение.

и, наконец, в ряде моделей можно выделяется также способность агента к самообучению:

- Агент гибок и обладает способностью самообучения с течением времени на основе собственного опыта. В ряде случаев агент может даже изменять правила поведения на основе полученного опыта<sup>14</sup>.



Одну из первых агентных моделей по социально-экономической тематике, разработал Томас Шеллинг в 1970-ых гг. Позже результаты, полученные в ходе данного имитационного эксперимента были описаны в книге Т. Шеллинга «Micromotives and Macrobehavior» (1978). Шеллинг исследовал проблему расовой сегрегации в американских городах. Имитационное моделирование Шеллинг использовал для поиска ответа на вопрос, возможно ли формирование сегрегированного поселения даже в случае, если для людей в целом не характерны расовые предрассудки. Имитационная модель показала, что гетто могут образовываться спонтанно – без наличия целенаправленной политики властей города, а всего лишь вследствие взаимодействия индивидуумов.

В модели Т. Шеллинга было два класса агентов: черные и белые жители, которые проживают по соседству друг с другом. В качестве района города Шеллинг использовал аналог шахматной доски размером 64 клетки. Каждый агент оценивает своих непосредственных соседей, расположенных на примыкающих к нему клетках. Согласно заложенным Шеллингом правилам, каждый агент стремится поселиться в окружении, где преобладают агенты того же цвета. Исходя из этого простого правила формируется модель поведения агента:

- *агент, который имеет только одного соседа, переедет, если это сосед другого цвета;*

<sup>14</sup> C. Macal and Michael North. Tutorial on agent-based modeling and simulation. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Center for Complex Adaptive Systems Simulation (CAS). Argonne National Laboratory.

- агент, имеющих двух соседей не будет переезжать, если хотя бы один из них того же цвета, что и он;
- агент, проживающий по соседству от 3 до 5 человек, не будет переезжать, если хотя бы 2 из них будут его цвета;
- агент с соседями от 6 до 8 человек не будет переезжать, если хотя бы 3 из них будут одного цвета.

В соответствии с такими нежесткими предпочтениями вполне возможно сосуществование равномерно распределенных черных и белых агентов. В этом случае система находится в равновесии и нет необходимости что-либо менять. Однако в реальности небольшие изменения происходят постоянно. Так и в модели Шеллинга, случайным образом несколько агентов (например, трое) удаляются с поля (свободные клетки C4, D3 и E2), тем самым нарушая равновесие (рисунок 1). Как только они удалены с поля, находящиеся поблизости от них соседи этого же цвета осознают, что теперь баланс нарушен и решают перебраться на клетки, где они будут в окружении агентов того же цвета (например, на клетки A1 и H8). Нетрудно предвидеть, что это запускает механизм самовоспроизводящей обратной связи, согласно которому остальные агенты также начинают приспосабливаться к изменившейся ситуации. Если агент не может найти себе комфортное положение, то он покидает город (поле) навсегда.

Интересно, что несмотря на тот факт, что каждый агент имеет довольно гибкую систему предпочтений соседей, которая не требует, чтобы все 100% были обязательно его же цвета, со временем эффект сегрегации начинает проявляться все более значительно (рисунок 2). Спустя несколько итераций система достигнет состояния равновесия и в ряде случаев оно может проявляться в виде значительных эффектов сегрегации. Таким образом, система из агентов, поведение которых основывается на оценке исключительно локальной ситуации (прямых соседей), демонстрирует значительное изменение из-за самоорганизующихся процессов. Это и есть пример так называемого «возникающего поведения» системы, которое достаточно сложно (и зачастую едва ли возможно!) предугадать заранее: (макро)порядок возник из неорганизованного и неконтролируемого (микро)поведения агентов.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1		#	○	#	○	#	○	
2	#	○	#	○		○	#	○
3	○	#	○		○	#	○	#
4	#	○		○	#	○	#	○
5	○	#	○	#	○	#	○	#
6	#	○	#	○	#	○	#	○
7	○	#	○	#	○	#	○	#
8		○	#	○	#	○	#	

Рисунок 1. Начало эксперимента: равновесие

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	#	#	○		○		○	
2	#	○		○		○		○
3	○	#	○		○		○	
4	#	○	#	○		○		○
5	○	#	○	#	○		○	
6	#	○	#	○	#	○		○
7	○	#	○	#	○	#	○	#
8		○	#	○	#	○	#	#

Рисунок 2. Итог эксперимента: сегрегация

Дэвид Баттен, анализируя результаты экспериментов Томаса Шеллинга, отмечал, что даже незначительное изменение в правилах принятия решения агентами могло дать

совсем другой результат<sup>15</sup>. Так, Шеллинг программировал своих агентов таким образом, что только каждый житель удовлетворен, если хотя бы 37.5% его соседей принадлежат к тому же классу. Интересно, что если снизить это требование до 33%, то изначальная система намного более стабильна и удаление с поля трех агентов не вызовет таких сильных изменений. Это наблюдение имеет важное значение для агентного моделирования: «возникающее» из поведения агентов поведение системы основано на механизме и правилах взаимодействия агентов и *даже небольшое изменение правил* – в модели Шеллинга правил миграции - *может привести к значительным изменениям* (данный эффект получил название *эффекта бабочки*).

Исследования Томаса Шеллинга получили широкую известность и способствовали активному распространению интереса к агентному моделированию. Как видно из примера с моделью Шеллинга, типовой подход к агентному моделированию заключается в моделировании агентов с определенными правилами поведения и принятия решений, на основании которых агент может действовать независимо и вступать во взаимоотношения с другими агентами.

Изначально Шеллинг проводил свои эксперименты на основе доски и фишек, изображающих агентов, и лишь потом стал применять компьютерное моделирование. Со времен Шеллинга имитационное моделирование значительно продвинулось, что связано как с быстрым распространением мощных компьютеров, так и появлением соответствующего программного обеспечения (программы *NetLogo*, *RePast*, *Swarm*, *Anylogic* и многие другие), часть которого находится в открытом доступе.

В целом специалисты выделяют три стадии построения агентной модели:

- 1) *Определение границ модели*: какое явление/событие моделируется, каковы его рамки.
- 2) *Определение поведения/взаимодействия агентов*: разработка модели поведения/принятия решений агентом и его взаимодействия с остальными агентами.
- 3) *Разработка и апробация модели*, проведение анализа чувствительности.

Практически неограниченные возможности по программированию агентов дают возможность исследователю создавать при необходимости очень сложные модели, в которых в деталях можно отразить процесс принятия решений покупателями. Особо следует подчеркнуть, что агентное моделирование позволяет моделировать иррациональные моменты принятия решений, на которых акцентирует внимание поведенческая экономика (*behavioral economics*). В связи с этим имитационное моделирование становится мощным инструментом поддержки принятия решений для руководителя: например, перед проведением рекламной кампании заказчик может оценить ее потенциальный эффект на целевую аудиторию и приблизительно выявить потенциальную отдачу от вложенных средств и, соответственно, целесообразность данных затрат. В некоторых программах, таких как *Anylogic*, существует возможность также включить в имитационное моделирование анализ сети контактов клиентов (*network*

---

<sup>15</sup> *Batten, D. Discovering Artificial Economics: How Agents learn Economies Evolve. Westview Press. 2000.*

analysis), чтобы точнее оценить динамику взаимодействия и реакции клиентов на новый продукт или услугу.

Перспективы агентного моделирования впечатляют. Однако несмотря на колоссальный потенциал данного вида моделирования, при разработке моделей очень важно грамотно сформулировать проблему и, исходя из этого, поставить задачу. А это требует высокой экспертизы и опыта – в противном случае «мусорные» данные на входе дадут такой же результат и на выходе. Для того, чтобы этого не произошло, модель необходимо разрабатывать, опираясь на накопленные в компании базы данных о поведении клиентов, их ценовых предпочтениях, мотивах выбора и т.п. К сожалению, на практике зачастую многие компании имеют очень условное представление об особенностях потребительских предпочтений и мотивации выбора клиентов. Так, например, в рамках переговоров по разработке имитационной игры для обучения персонала с одним из лидеров на рынке по продаже сотовых телефонов выяснилось, что у компании недостаточно данных для разработки имитационной модели. На ключевой вопрос – каким образом потребитель выбирает компанию для покупки сотового телефона – ключевые сотрудники компании (менеджмент среднего звена) затруднились дать ответ.

Между тем представляется, что знание мотивов выбора потребителя являются ключевыми для успешной работы на рынке. Например, если главным является фактор цены сотового телефона, то для успеха на рынке необходимо реализовывать программу лидерства по издержкам и продавать телефоны с минимальной наценкой. Если же определяющим фактором является репутация компании как надежного продавца, то это совсем другая стратегия. А возможно, что основным фактором при выборе компании покупки телефона является наличие близко расположенного к дому магазина или же просто консерватизм покупателя, уже совершавшего там хотя бы одну покупку. Без наличия этой информации вряд ли возможно разработать реалистичную агентную модель поведения покупателей на рынке, которая позволит тестировать эффективность той или иной стратегии развития компании.

Одним из интересных приложений агентного моделирования являются имитационные симуляторы бизнеса – т.н. микромиры (microworlds), в основе которых лежат имитационные модели, при помощи которых руководители среднего и высшего звена могут тестировать различные стратегии управления компанией.

## **2) Агентное моделирование на практике: имитационная игра «Евросвязь»**

Автором разработана имитационная игра по управлению компанией, занимающейся продажей сотовых телефонов – «Евросвязь». В основе игры лежит комплексная имитационная модель, объединяющая системную динамику и агентное моделирование. В рамках модели реализованы различные сценарии управления сотовым ритейлером на рынке, традиционно отличающемся высокой конкуренцией.

В основе модели – конкуренция трех компаний (А,Б,В), занимающихся продажей сотовых телефонов и аксессуаров к ним. Имитационная модель позволяет участнику эксперимента попробовать себя в роли управляющего компанией, который должен периодически принимать ряд управленческих решений, определяющих развитие компании и ее конкурентоспособность на рынке. К таким решениям относятся, например:

- наценка на продаваемую продукцию;
- расходы на рекламу;
- объем расходов на программы лояльности клиентов;
- расходы на персонал (найм, подготовку);
- количество открываемых/закрываемых магазинов.

В зависимости от принимаемых решений меняется конкурентоспособность компании. Более того, участник имитационного эксперимента поставлен в условия, когда принимаемые решения будут иметь как краткосрочные, так и долгосрочные последствия. Например, высокая наценка в краткосрочном периоде позволяет заработать больше прибыли и, соответственно, из накопившейся прибыли финансировать экспансию компании - открывать новые магазины. Однако в долгосрочном плане высокие цены заставят потенциальных покупателей переключаться на конкурентов, если у них цены ниже.

Точно так же последовательные отчисления на финансирование программы повышения лояльности не приносят заметного эффекта в краткосрочной перспективе, однако на более длительном горизонте планирования способны дать значительный положительный эффект, поскольку при сформировавшейся широкой базе лояльных покупателей компания может позволить себе увеличивать наценку без риска потерять покупателей.

В игре важно учитывать долгосрочный эффект обратной связи: чем больше продажи компании, тем выше ее доля рынка по сравнению с конкурентами. Чем выше доля рынка, тем больше рычагов влияния получает данная компания на поставщиков и, соответственно, тем на более выгодных условиях она может осуществлять закупки у поставщиков. Таким образом она получает возможность сохранять высокую маржу, не увеличивая цену для покупателей.

Имитационная игра «Евросвязь» содержит и основы модели Басса: на первом этапе (этап развития рынка сотовых телефонов, когда компании только выходят на рынок и еще не известны населению) потенциальные покупатели становятся покупателями посредством:

- рекламы;
- по рекомендации уже купивших ранее (предусмотрено взаимодействие агентов друг с другом).

На рисунке 3 дана упрощенная схема поведения агента, лежащая в основе модели (в данном случае речь идет об Этапе 1). Агент из *Потенциального покупателя* становится покупателем компании А, Б или В. В модели предусмотрено, что агент может находиться в состоянии «покупателя» в течении от 18 до 30 месяцев – т.е. соответственно от полутора до двух с половиной лет, что в целом коррелирует со сроками пользования мобильным телефоном среднестатистическим покупателем до момента его замены. Конкретный срок



пользования телефоном у каждого агента определяется случайным образом, но не может быть меньше полутора или больше двух с половиной лет. По истечении данного срока агент может либо перейти в категорию *Лояльного покупателя* данной компании, либо перейти в пул *Повторных покупателей*. В каждый определенный момент времени переход в категорию *Лояльного покупателя* осуществляется при выполнении определенных условий – например, при достижении определенного уровня расходов на внедрение программ лояльности фиксированный процент покупателей будет становиться лояльным – т.е. совершать повторную покупку в той же компании. Со временем лояльные клиенты становятся наиболее ценным активом компании, т.к. они не меняют компании даже, если у конкурентов цены дешевле.

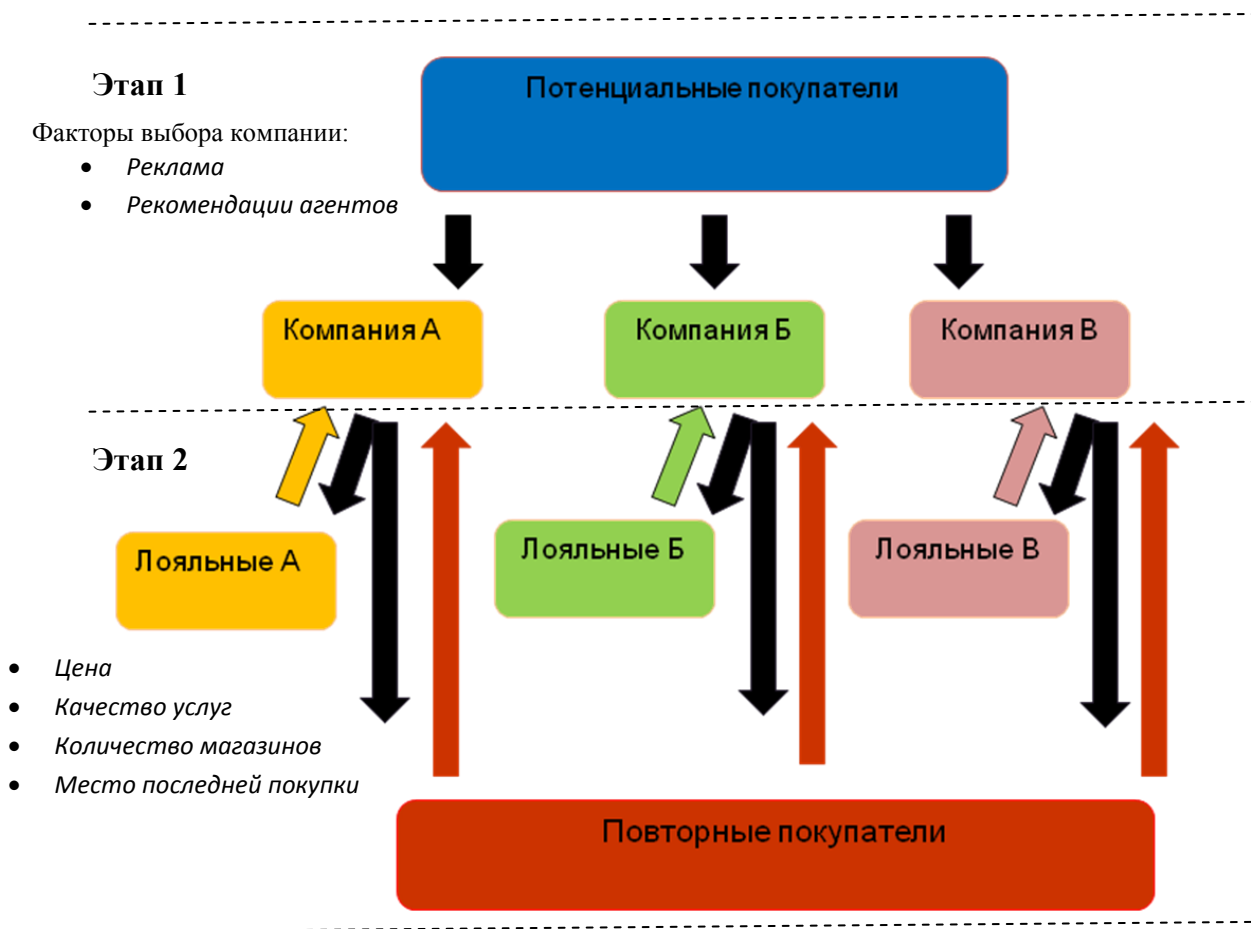


Рисунок 3. Модель поведения агентов в имитационной игре «Евросвязь».

Если же агент не стал лояльным, то он становится повторным покупателем – в этом случае его решение опосредовано несколькими критериями. Модель предусматривает довольно сложную модель принятия решения агентом о выборе компании для повторной покупки телефона. Повторный покупатель анализирует предложения всех трех компаний и принимает решение о покупке в той или иной компании на основе:

- *Ценовых предпочтений*: преимущество получает та компания, которая продает телефон с минимальной наценкой по сравнению с конкурентами;

- *Учета прошлого опыта покупки* («консерватизм»): компания, в которой он совершил последнюю покупку изначально имеет небольшое преимущество, которое тем не менее может оказаться значимым при определенных условиях;

Наконец, возможно также, чтобы агент учитывал:

- *Качество обслуживания и количество магазинов компании*: при этом преимущество получает компания с наиболее высоким уровнем сервиса (зависит от расходов на подготовку персонала) и наибольшим количеством магазинов (т.к. чем больше магазинов, тем выше вероятность того, что магазин компании будет расположен поблизости от места проживания агента).

Все эти факторы трансформируются в индекс привлекательности компании. Соответственно, агент, находящийся в статусе *Повторный покупатель*, принимает решение купить телефон в определенной компании на основе комплекса критериев. Задачей участника имитационной игры становится принятие таких управленческих решений, которые позволят компании, за которую он играет, стать лидером на рынке на момент окончания игры. Игровой период рассчитан на 10 лет, игрок может принимать свои решения по истечении каждых 6 месяцев – т.е. 2 раза в год. Таким образом, участник игры может совершить максимум 20 ходов. Возможна игра как индивидуально, так и в команде.

Основная цель имитационного эксперимента – как и в реальной жизни, поставить участников перед необходимостью *распределять ограниченные ресурсы* (в данном случае – прибыль компании) по нескольким ключевым направлениям. Фактически принимаемые решения формируют *стратегию* компании.

Описанные выше условия позволяют реализовать самые разнообразные стратегии управления компанией, как например:

- *Лидерство по цене*: ориентация на краткосрочное преимущество – агрессивная реклама, демпинг цен, быстрая экспансия (примером может служить кейс компании «Евросеть», описанный во второй части данного пособия);
- *Лидерство по качеству*: ориентация на долгосрочное преимущество – сбалансированный рост, инвестиции в персонал и повышение качества услуг, ставка на развитие базы лояльных клиентов, гибкая ценовая политика (примером из реальной жизни может служить компания «Связной»).

Возможность комбинировать/изменять стратегии в зависимости от стадии развития рынка:

- Стадия растущего рынка;
- Стадия насыщенного рынка.

Также разработанная имитационная модель позволяет протестировать различные *сценарии* игры, которые потребуют от участников адаптации к изменяющейся ситуации, например:

- 1) Поступательное развитие конкурентов (одинаковая политика на протяжении всей игры);
- 2) Разорение и уход с рынка одного из конкурентов;
- 3) Ценовые «войны»: предусматривает на определенном этапе резкий ценовой демпинг со стороны конкурентов и необходимость адекватных действий со стороны игрока;
- 4) Резкое изменение стратегии конкурентов: например, инвестиции в программы лояльности.

Ниже представлены некоторые скриншоты имитационной игры – диаграммы, которые видит участник игры, отражающие различную информацию о результатах деятельности компании и ее конкурентов (доля рынка, количество магазинов у каждой компании, количество покупателей (в том числе и лояльных), средняя стоимость телефона, выручка компаний).

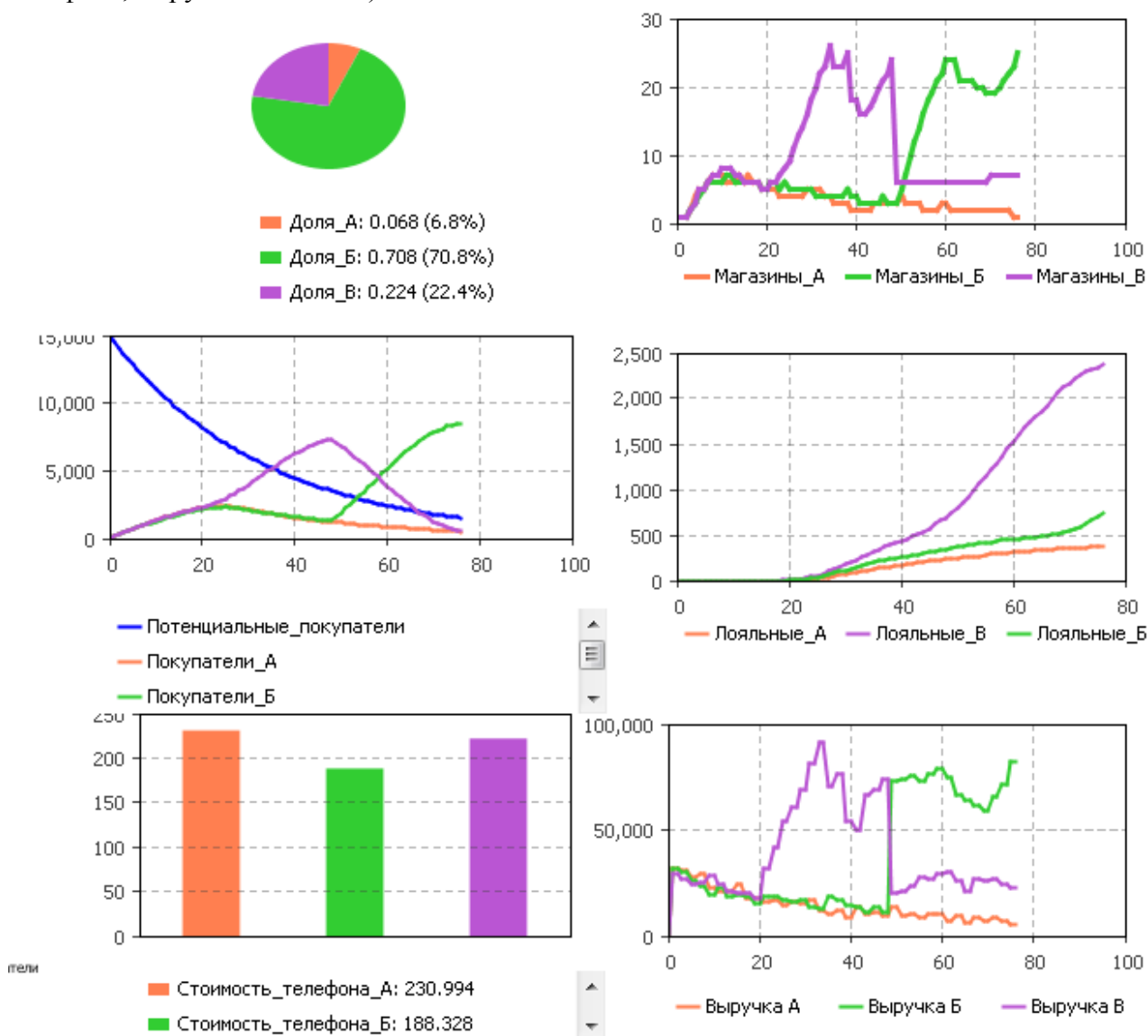


Рисунок 4. Скриншоты имитационной игры «Евросвязь»

На взгляд автора, данная имитационная игра способствует развитию формированию навыков системного мышления и принятия решений в динамически сложной среде у участников. Выполненная на основе комбинации агентного и системно-динамического моделирования, «Евросвязь» наглядно демонстрирует мощный потенциал как агентного моделирования, так и одновременного использования обоих подходов.

### 3. Агентное моделирование и системная динамика: сравнительный анализ

В таблице 1 дана краткая сравнительная характеристика системной динамики и агентного моделирования<sup>16</sup>.

	Системная динамика	Агентное моделирование
Базовый элемент модели	Петля обратной связи	Агент
Область анализа	Структура системы	Правила поведения агента
Уровень моделирования	Макроуровень	Микроуровень
Направление моделирования	Сверху вниз	Снизу вверх
Время	Непрерывное	Дискретное
Аппарат в основе моделирования	Математика (дифференциально-интегральные уравнения)	Логика (поведения)

**Таблица 1.** Сравнительная характеристика двух подходов к имитационному моделированию

Системно-динамические модели состоят из петель обратной связи, которые формируют поведение системы. Данный вид моделирования полезен при выявлении важных переменных и установлении взаимосвязей между ними. Как мы уже отмечали выше, в агентном моделировании базовой единицей модели является агент(ы), функционирующий в определенной окружающей среде. Каждый агент действует самостоятельно и взаимодействует с другими на агентами на основе определенных правил. Результатом взаимодействия агентов становится поведение системы в целом.

«Структура (системы) диктует поведение», - утверждают специалисты по системной динамике: например, экспоненциальный рост, осцилляцию, превышение с последующим коллапсом и т.п. Под структурой понимается комбинация взаимосвязанных потоков и накопителей. В агентном моделировании поведение системы формируется за счет правил поведения агентов, закладываемых исследователем. Следует отметить, что правила поведения и взаимодействия агентов могут гибко меняться, отражая способность агента к самообучению, что позволяет отразить феномен «возникаемого» поведения. Согласно Найдзелу Гилберту, «возникаемое поведение формируется, когда взаимодействие между объектами на одном уровне приводит к возникновению объектов

<sup>16</sup> Shieritz N., P.Milling. Modeling the Forest or Modeling the Trees. A Comparison of System Dynamics and Agent-Based Simulation. Proceedings of the International System Dynamics Society Conference. 2003

на другом уровне...т.е. феномен является «возникаемым», если для его описания требуются новые категории, которые не требовались для описания поведения элементов, лежащих в его основе»<sup>17</sup>.

Как уже отмечалось, системная динамика фокусируется на моделировании макроуровня – системы в целом. Однако это не означает, что системная динамика может применяться исключительно к моделированию макроэкономики или глобальных социально-экономических процессов. Под понятием «макро» в данном случае имеется в виду агрегирование моделируемых данных: например, в широко известной модели диффузии инноваций Фрэнка Басса (Bass diffusion model), Потенциальные Клиенты и Клиенты представлены в обобщенном виде - в виде накопителей, пополняемых или истощаемых потоками. Несложно воспроизвести модель Басса при помощи агентного подхода, но тогда общая ситуация в каждый момент будет складываться из суммы индивидуального поведения каждого агента. В этом случае мы программируем «микрообъекты», которые позволяют получить обобщенный результат (подход «снизу-вверх»).

Агентное моделирование имеет важное преимущество перед системно-динамическими моделями: возможность адаптации. Согласно Джону Холланду, адаптацию можно определить как *модификацию структуры модели с целью более эффективного действия в окружающей среде*<sup>18</sup>. В системно-динамическом моделировании структура модели определена изначально и не может быть изменена в ходе имитационного эксперимента, т.к. структура модели фиксирована. Как отмечают Н. Шериз и П. Миллинг, тем не менее системно-динамические модели могут адаптироваться, если под адаптацией понимать не изменение структуры модели, а изменение в доминировании петель обратной связи<sup>19</sup>. Например, S-образный рост вызван доминированием на первоначальном этапе петель положительной обратной связи, вызывающих экспоненциальный рост, которое постепенно уступает балансирующим петлям обратной связи, стабилизирующих систему. Агентные модели позволяют успешно реализовать эффект адаптации в полном объеме: некоторые агентные модели позволяют проследить эволюцию агентов, во время которой агенты обмениваются «генами» детерминированным или случайным образом (т.н. мутации). Широко известна модель SugarScape Джошуа Эпштейна (Joshua Epstein) и Роберта Акстелла (Robert Axtell), исследователей из Brookings Institute, ведущего научно-исследовательского института в Вашингтоне, в рамках которой была реализована данная возможность<sup>20</sup>.

В системной динамике источником нелинейности поведения системы является концепция аккумуляирования, которая находит отражение в потоках и накопителях, ответственных за возникновение эффектов запаздывания. Не оспаривая данный тезис, агентное моделирование использует так называемые «события», которые могут вызвать изменения в поведении системы. Например, в модели Томаса Шеллинга изначально равновесие (пусть и хрупкое) нарушалось, когда несколько агентов удалялись с поля, тем самым провоцируя серию изменений. Использование событий при моделировании представляется очень удобным, поскольку позволяет значительно усложнять модели.

---

<sup>17</sup> Gilbert, Nigel and Rosaria Conte (Eds.) Artificial Societies: Computer Simulation of social life. London. 1995

<sup>18</sup> Holland, John. Adaptation in natural and artificial systems. Cambridge. 1975

<sup>19</sup> Shieritz N., P.Milling (2003), стр. 8

<sup>20</sup> Epstein, J.M. and Axtell, R. Growing artificial societies. Washington, D.C. Brookings Institution Press. Cambridge, MA: MIT Press. 1996

Какой вывод можно сделать из выше сказанного? Значит ли это, что агентное моделирование более предпочтительно, чем системно-динамический подход? Безусловно, нет. И тот, и другой вид моделирования имеют свои плюсы и минусы, рассмотренные выше. Системную динамику сравнивают с «моделированием леса», тогда как агентное моделирование – с моделированием деревьев. Зачастую бывает сложно разработать детальную агентную модель, которая бы могла учитывать все причинно-следственные связи, влияющие на решение агента. В зависимости от типа проблем, с которым сталкивается исследователь, может быть целесообразно применять либо системно-динамический подход, либо агентный подход, или же и то и другое вместе. Значительное развитие за последние годы программного обеспечения для имитационного моделирования позволяет успешно интегрировать системную динамику с агентным моделированием. В частности, одной из наиболее интересных решений комбинированного моделирования является программа *Anylogic* российской компании XJ Technologies, которая позволяет достаточно успешно интегрировать агентное моделирование в системно-динамические модели, тем самым значительно повышая глубину проработки проблемы.

Например, при моделировании динамики фондового рынка широкое распространение получило именно агентное моделирование, поскольку оно позволяет учесть как рациональные аспекты принятия решений по инвестированию на рынке, так и иррациональные моменты (например, «эффект толпы»), объясняющие формирование пузырей на рынке. При моделировании иных явлений, например, товарных рынков, которым свойственен эффект запаздывания, целесообразно использовать системную динамику.

Например, симбиоз системной динамики и агентного моделирования может быть полезен при моделировании *потребительских рынков*, когда требуется одновременный учет как макропараметров (например, динамика отрасли в целом), так и понимание микрофакторов, определяющих выбор потребителями той или иной компании. Так, отрасль и бизнес компании можно смоделировать при помощи системной-динамики, а поведение потребителей – при помощи агентного моделирования. В этом случае комбинация данных методов позволит создать уникальную по глубине проработки проблематики модель, которая сможет учесть все нюансы поведения потребителей, не теряя из виду общей картины. Разработка и применение подобных моделей на практике может помочь компании значительно повысить качество принимаемых решений и одновременно оптимизировать затраты, т.к. уберезет от неэффективных и дорогостоящих решений.

Таким образом, комбинация системно-динамического и агентного моделирования может успешно применяться на практике, когда индивидуальное поведение агентов (людей, компаний и т.п.) формализуется посредством агентного подхода, окружающая среда (макроперспектива) - при помощи системной динамики.

Приложения агентного моделирования	
<b>Бизнес и Управление</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Производство</li> <li>• Рынок товаров широкого</li> </ul>	<b>Общество</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Моделирование исторических процессов</li> </ul>

<ul style="list-style-type: none"> <li>• потребления</li> <li>• Логистика</li> <li>• Страхование</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Моделирование девиантного поведения</li> </ul>
<p><b>Экономика:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Искусственный интеллект</li> <li>• Сети</li> </ul>	<p><b>Терроризм:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Социальные причины</li> <li>• Организационные сети</li> </ul>
<p><b>Инфраструктура:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Рынки электроэнергии</li> <li>• Транспортная отрасль</li> <li>• (включая проблемы пробок и траффика)</li> </ul>	<p><b>Военные разработки:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Оптимальные системы управления</li> <li>• Сценарное планирование</li> </ul>
<p><b>Поведение человека:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Поведение в толпе</li> <li>• Моделирование поведения в чрезвычайных ситуациях</li> </ul>	<p><b>Биология:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Экология</li> <li>• Поведение животных в группе</li> <li>• Функционирование клеток</li> <li>• Внутриклеточное взаимодействие молекул</li> </ul>

**Источник:** *Macal, Charles and Michael North. Tutorial on agent-based modeling and simulation. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Center for Complex Adaptive Systems Simulation (CAS). Argonne National Laboratory.*