
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Агентное моделирование в исследовании и прогнозировании социально-экономических систем и процессов

© 2021 г. Р.Р. Рамазанов

Р.Р. Рамазанов,

Центр стратегических и междисциплинарных исследований (ЦСМИ) Уфимского федерального исследовательского центра Российской академии наук (УФИЦ РАН), Уфа; e-mail: ruslan4729@mail.ru

Поступила в редакцию 17.07.2020

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 19-110-50165).

Аннотация. Всепроникающая дигитализация, представляющая собой процесс оцифровки не только количественных, но и качественных сторон объектов реального мира, создает для человечества новые вызовы и новые возможности. Воплощением таких возможностей, в частности, становится использование растущего объема данных в науке. И речь здесь идет не только о классических статистических методах, но и о сложных нейросетевых и имитационных подходах, многие из которых успешно применяются уже сегодня. Настоящая работа посвящена исследованию опыта применения одного из таких подходов — агент-ориентированного моделирования. Данная методология является универсальной и позволяет воспроизводить социально-экономические системы и процессы разной степени сложности. Ограничениями при ее применении могут выступать лишь теоретические познания исследователя и/или вычислительные мощности платформы реализации имитационных моделей. Во введении обсуждаются концептуальные основы методологии агент-ориентированного подхода и отдельные аспекты его преимуществ в исследовании общественных процессов. Представлен подход к классификации агентных моделей по шкалам агрегация-атомизация и абстрагирование-конкретизирование. Вторая часть посвящена анализу опыта применения агентного моделирования в сфере социально-экономических отношений. В обзор вошли работы зарубежных и российских авторов. В заключение обсуждаются тенденции развития агентного моделирования и его перспективы. На основе анализа динамики численности и тематической структуры исследований, проведенных с применением методологии агентного моделирования, сделан вывод о растущей экспансии последней на предметные области гуманитарных наук.

Ключевые слова: агент-ориентированный подход, имитационное моделирование, социально-экономические системы и процессы, компьютерные технологии, информационные технологии, когнитивные технологии.

Классификация JEL: B23, B41, C60, C63.

DOI: 10.31857/S042473880010550-4

ВВЕДЕНИЕ

Агентный подход, являющийся одним из трех основных направлений имитационного моделирования, предполагает репрезентацию сложных объектов снизу-вверх, когда глобальная динамика моделируемых систем и процессов описывается через действия и взаимодействия составляющих их элементарных субъектов (агентов). Находясь на стыке информационных, био- и когнитивных технологий, агентное моделирование естественным образом сочетает ряд уникальных качеств. Каждый агент наделяется квазиинтеллектом и способностью действовать неинерционно — в этом состоит биоориентированность методологии. Специфика конкретной модели может предполагать для агентов необходимость совершать выбор. Обладание агентами элементами интеллекта обуславливает когнитивную составляющую агент-ориентированного подхода.

Таким образом, суть агентного моделирования заключается в представлении феноменов реального мира в виде совокупностей элементарных субъектов, обладающих индивидуальной целевой функцией и определенной степенью рациональности. Каждый агент стремится оптимизировать

свою целевую функцию через взаимодействие с окружающей средой и/или другими агентами. Из локальных взаимодействий агентов рождается глобальная динамика системы, представляющая особый интерес для исследования.

В истории научной мысли одной из первых попыток вывести возникающее поведение в сфере общественных отношений снизу вверх является аналитическая концепция Т. Гоббса, представленная в его знаменитом трактате «Левиафан». Рассматривая ее сквозь призму агентного подхода, отметим, что в качестве агентов в ней выступают подчиняющиеся «универсальным законам природы индивиды», целевую функцию каждого из которых, по Гоббсу, определяют естественные «желания» и «отвращения». Стремясь к максимизации целевой функции и осознавая свои потери от «войны всех против всех», агенты естественным образом приходят к заключению договора о создании государства — Левиафана, карающего нарушителей общепринятых правил. Безусловно, Гоббс в своих построениях не использовал категорий агентного моделирования, и тем не менее его описательный подход хорошо укладывается в его рамки.

Гоббс является одним из основоположников мировоззрения механицизма, отдельные элементы которого имеют концептуальные пересечения с элементами агент-ориентированного подхода. Механицизм рассматривает мир как совокупность элементарных объектов, детерминированных универсальными законами динамики. В основе агентного подхода лежат схожие принципы — моделируемые системы представляются в виде совокупности атомов (агентов), состояние которых детерминировано определенными правилами. Аналитический принцип выведения макропроявлений снизу вверх, составляющий основу агент-ориентированного подхода, сформировался в недрах естественно-научного анализа, а именно в статистической механике, объясняющей феномены материи, проявляющиеся на макроуровне, через свойства и законы взаимодействия ее элементов (молекул, атомов).

1. АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБЩЕСТВЕННЫЕ НАУКИ

Экстенсивное развитие социологической науки, основанное на накоплении новых статистических закономерностей, отодвигало кризис позитивистской программы до середины XX в., кульминацией которого стал знаменитый спор о позитивизме (нем.: *Positivismusstreit*) в 1961 г. между критическими рационалистами и представителями Франкфуртской школы (Strubenhoff, 2017). Наибольший интерес для нас представляют аргументы Т. Адорно и К. Поппера, касающиеся позитивистского подхода к социологическим исследованиям. Последний, в частности, выражал критическое отношение к бессистемной аккумуляции статистических фактов, настаивая на том, что социальная наука не должна сводиться к коллекционированию корреляционных связей.

Т. Адорно отмечал невозможность построения в социологии столь же элегантных математических теорий, как и в естествознании. В другом своем тезисе ученый выражал скепсис относительно дедуктивного подхода в социологии: «Без предвосхищения структурного момента — целого, которое вряд ли можно перевести в отдельные наблюдения, ни одно единичное наблюдение не может обрести своего места» (Adorno, 1970, 127 (цит. по (Полякова, 2012, 36))). Адорно полагал, что общество и индивиды могут быть познаны только во взаимосвязи.

Лауреат Нобелевской премии по экономике Г. Саймон обосновывал сложность социальных наук невозможностью редукции — разложения социальных процессов на подпроцессы (экономические, демографические, культурные, пространственные), которые можно было бы подвергнуть сепаратному анализу, не упустив из виду эмерджентные эффекты (Simon, 1987). Таким образом, стала ясно ощущаться потребность социологической науки в интегральном подходе, позволяющем вскрывать связи между миром индивидуальных наклонностей и феноменами общественной динамики.

В 1996 г. на страницах трактата «Выращивание искусственных обществ» Д. Эпштейн и Р. Акстелл выдвигают новую исследовательскую программу, основанную на агент-ориентированном моделировании. Безусловно, они были не первыми, кто использовал агентный подход при исследовании социально-экономических феноменов. Первые осмысленные попытки его применения можно отметить в работах (Schelling, 1971, 1978; Albin, Foley, 1990; Axelrod, Bennett, 1993; Axelrod, 1997; Danielson, 1992, 1996) и др. Однако Эпштейн и Акстелл оказались первыми, кому удалось в явной форме обозначить контуры новой методологии. «Наша широкая цель состоит в том, чтобы начать развитие единой социальной науки, в которой эволюционные процессы встраивались бы

в вычислительную среду, имитирующую социальные и экономические явления. Однажды люди, задавая вопрос о возможности объяснения чего-либо, будут подразумевать способность вырастить это *in silico* (в пробирке), демонстрируя, каким образом ограниченный набор микрофакторов генерирует макрофеномены. Развитие IT-технологий открывает для нас перспективу взглянуть на мир социальных феноменов сквозь призму новой науки» (Epstein, Axtell, 1996, 20).

2. ПРАКТИКА ПРИМЕНЕНИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ К ИССЛЕДОВАНИЮ СОЦИАЛЬНЫХ И ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

2.1. Демаркация агентных моделей

Перспективу преодоления проблемы субъективной составляющей общественных процессов исследовательская программа искусственных обществ видит в развитии вычислительных технологий и методологии агент-ориентированного моделирования. Виртуальные аналоги проектируемых систем позволяют проводить имитационные эксперименты, генерировать и осуществлять верификацию сложных гипотез. За последние десятилетия появилось большое число работ, заявляющих в качестве своей методологической основы агент-ориентированный подход. В академической литературе существуют отдельные исследования, посвященные вопросам демаркации имитационных моделей, в частности отделению агент-ориентированного подхода от дискретно-событийного моделирования, системной динамики и моделирования динамических систем (Борщев, 2004). Такое же условное разделение можно провести внутри самой практики агентного моделирования.

Несмотря на обладание общими фундаментальными чертами — наличие нескольких автономно действующих субъектов, стремящихся максимизировать имманентную целевую функцию, — агентные модели могут значительно различаться по степени абстрактности и детализации анализируемых процессов (рис. 1). В одной модели в качестве агентов могут выступать элементарные субъекты социально-экономических отношений — индивиды (покупатели, продавцы, избиратели, участники дорожного трафика) или агрегированные субъекты, действующие от лица нескольких индивидов (юридические лица, публично-правовые образования, союзы, коалиции). Различия в уровне абстракции агентных моделей определяются конкретностью репрезентируемых субъектов, качеством содержания их целевых функций и способов их взаимодействия.

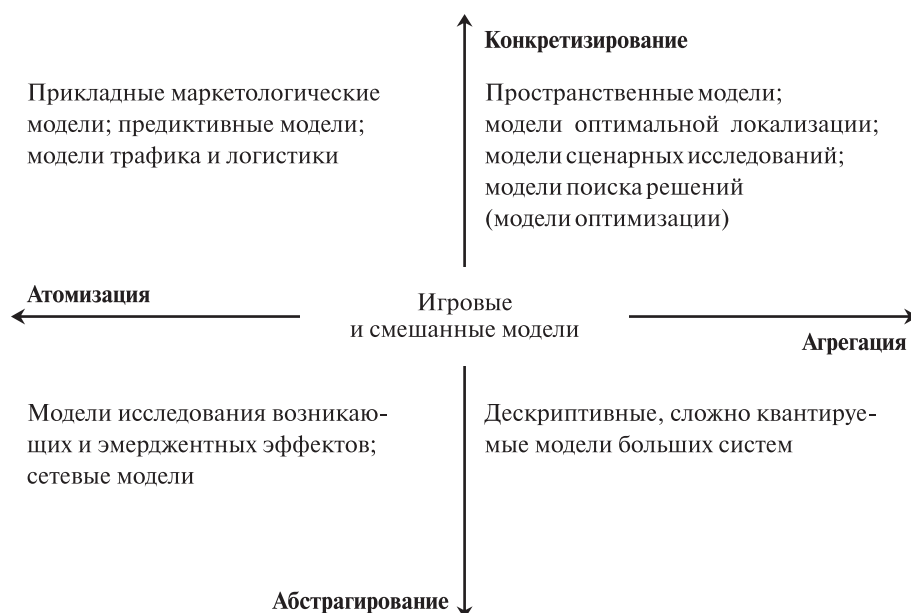


Рис. 1. Демаркация агент-ориентированных моделей

2.2. Мультиагентные модели высокого уровня абстракции

Модели, представленные большим количеством агентов, механизмы и цели взаимодействия которых носят абстрактный характер, отличаются сложностью параметризации и ориентированы на исследование возникающего поведения и/или эмерджентных эффектов. Сведения о способах взаимодействия отдельных субъектов позволяют формулировать и исследовать гипотезы о глобальной динамике систем — выращивать возникающее снизу вверх поведение *in silico*. Однако обладание информацией о глобальной динамике сложной системы позволяет формулировать и проверять гипотезы о правилах функционирования составляющих ее агентов.

Высокоабстрактное мультиагентное моделирование, как правило, применяется в исследованиях объектов, отличающихся высокой субъективной составляющей. Примером такого объекта может послужить брачный рынок, участники которого, одновременно являясь товаром и потребителями, осуществляют свой выбор, основываясь на ряде субъективных критериев, таких как возраст, уровень образования и достатка, цвет кожи, этническая принадлежность партнера и др. (Kalick, Hamilton, 1986; Todd, Billari, 2003; Hills, 2008; Walker, Davis, 2013).

Широту и аналитическую мощь агентного подхода при анализе абстрактных предметов отражают примеры его применения в исследованиях феноменов расовой сегрегации (Schelling, 1978), закономерностей жизненного цикла фирм (Axtell, 2006); феноменов динамики фондовых рынков (Souissi, Bensaid, Ellaia, 2018); культурной конвергенции (Axelrod, 1997); электоральных процедур (Hahn, Sydow, Merdes, 2019; Bernardes, Stauffer, Kertesz, 2002) и др.

От классических статистических и эконометрических подходов, ориентированных на простое вычисление коэффициентов, определяющих связи результирующих переменных с предполагаемыми регрессорами, агентное моделирование отличается нацеленностью на вскрытие черного ящика исследуемого явления. Именно это преимущество делает его безальтернативным при исследовании структурных эффектов.

Для примера рассмотрим работу (Medina, Quesada, Lozano, 2014), посвященную исследованию влияния конфигурации социальных сетей и уровня взаимодоверия в обществе на процесс принятия коллективных решений относительно производства общественных благ. На рис. 2 представлен пример социальной сети.

Принимая решение, агенты обладают информацией 1) о численности субъектов социальной сети, 2) о величине индивидуального пожертвования, 3) о числе принявших решение соседей и 4) о величине собранных на текущий момент средств.

В момент выбора каждый агент может попасть в одну из шести взаимоисключающих ситуаций (условия принятия решения).

Ситуация 1. Необходимая сумма уже собрана. Агент не будет вносить плату.

Ситуация 2. Вклад агента может оказаться решающим. Решение об участии агента будет зависеть от его убежденности в том, что никто, кроме него, не внесет необходимую сумму.

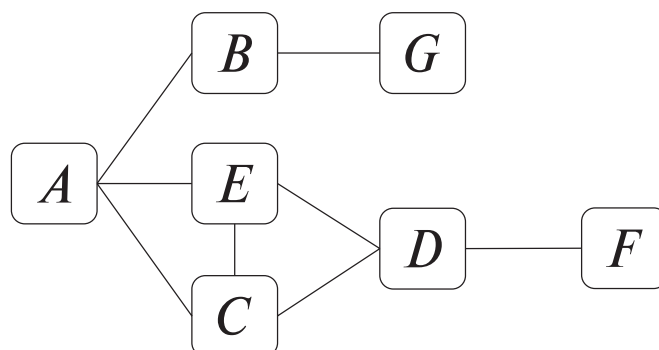


Рис. 2. Пример социальной сети в модели Медины—Кесадаба—Лозаноса

Примечание. Агент *A* может общаться с агентами *B*, *E* и *C*; агент *E* — с *A*, *C* — *D*; агент *G* — только с *B*, и т.д.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
2	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-	-
3	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-	-
4	-	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-	-
5	-	-	x	x	x	x	x	-	-	-	-	-
6	-	-	-	x	x	x	x	x	-	-	-	-
7	-	-	-	-	x	x	x	x	x	-	-	-
8	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	-	-
9	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x	-
10	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x	x
11	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x	x
12	-	-	-	-	-	-	-	-	-	x	x	x

а) матрица локального влияния ($p = 0$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	x	-	x	-	-	-	-	x	-	-	-	x
2	-	x	x	x	-	-	-	x	-	-	-	x
3	-	x	x	-	x	x	-	-	x	-	-	-
4	-	-	-	x	x	x	x	-	-	x	-	-
5	-	-	-	x	x	x	x	-	x	-	-	-
6	-	x	-	-	-	x	x	x	x	-	-	-
7	-	-	-	x	-	-	x	x	x	-	x	-
8	-	x	-	-	-	-	-	x	x	-	x	x
9	-	-	-	x	-	-	-	x	-	x	-	x
10	-	-	-	x	-	-	-	-	x	x	x	-
11	-	-	x	-	-	-	-	-	x	x	x	x
12	-	x	-	-	-	-	-	x	x	-	x	-

б) матрица влияния малого мира ($p = 0,33$)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	x	-	-	-	-	x	x	-	x	-	-	x
2	x	x	-	-	-	-	x	-	x	-	x	-
3	-	x	x	-	x	-	x	-	-	x	x	-
4	x	-	x	x	-	-	-	x	-	x	-	-
5	-	x	-	-	x	-	x	-	x	-	-	x
6	-	x	-	x	-	x	-	-	x	-	-	x
7	-	x	-	x	-	-	x	-	-	-	x	-
8	-	x	-	x	-	-	x	x	-	-	-	x
9	x	-	-	x	x	-	x	-	x	-	-	-
10	-	-	-	x	-	x	-	x	x	x	-	-
11	-	-	x	-	x	-	-	x	-	x	x	x
12	x	-	-	x	-	-	-	x	-	x	-	x

в) матрица случайного влияния ($p = 1$)

Рис. 3. Условия трех типов задач: матрица

Примечание. Символ «х» обозначает влияние элемента j на элемент i . Например, в матрице влияния малого мира (рис. 3в) на элемент решения 3 оказывают влияние элементы 2, 5, 6, 9. Число других элементов, на которое влияет тот или иной элемент, определяет его условную значимость. Например, в матрице на рис. 3в элемент 6 влияет на 5 элементов: 3, 4, 5, 7, 10. Матрица локального влияния (рис. 3а) является наиболее простой и исходной для формирования двух других, более сложных матриц.

Ситуация 3. Вклада агента может быть недостаточно, но оставшиеся агенты способны собрать необходимую сумму. Агент принимает решение на основе оценки численности неопределившихся соседей и общей численности членов социальной сети.

Ситуация 4. Вклад агента является критическим, только если он добавлен ко вкладам всех без исключения оставшихся агентов, о которых у него нет информации.

Ситуация 5. Агент сталкивается с ситуацией, когда необходимая сумма априори недостижима. Агент не будет вносить платы.

Ситуация 6. Решение агента является определяющим. Если полезность от получаемого блага окажется выше полезности совершаемого пожертвования, рациональный агент примет финансовое участие в производстве блага.

Результаты моделирования говорят о том, что успеху кооперации способствует ощущение ответственности и умеренные ожидания агентов относительно склонности своих соседей к сотрудничеству. Если агент не верит в сотрудничество других агентов, то не станет вносить плату в производство услуги. Точно так же агент склонен приуменьшать свой выигрыш в случае принятия решения о сотрудничестве, если существует гипотетическая возможность переложить ответственность за успех кооперации на других членов социальной сети. Полученные результаты, в частности, вносят вклад в объяснение неэффективности функционирования некоторых социальных институтов.

Другим примером является работа (Yang, Liu, Zhang, 2018), в которой моделирование используется для исследования проблем эффективности краудсорсинг-кампаний, различающихся характером поставленных задач и типом привлекаемых к их решению добровольцев. Сложность задачи в модели определяет систематичность расположения элементов в матрице задачи; рациональность агентов определяет их способность идентифицировать эти элементы (рис. 3).

Агенты в модели не знают, сколько решений есть у задачи (в матрицах на рис. 3 их 12). Интеллектуальные способности агентов определяют две эндогенные характеристики: так называемый уровень и уклон ограниченной рациональности. От уровня рациональности агента зависит число видимых им решений. Так, при уровне 0,5 агент видит только 6 ($0,5 \times 12$) направлений решения. От уклона рациональности зависит способность индивида определять значимость тех или иных решений. Таким образом, интеллектуальная эффективность агента определяется числом и качеством выявленных им решений.

На основе имитационных экспериментов авторы демонстрируют влияние сложности задач и уровня компетенции привлекаемых добровольцев на эффективность проведения краудсорсинг-кампаний. Практические рекомендации, вытекающие из результатов анализа экспериментов, говорят о целесообразности дифференцирования стратегии проведения краудсорсинг-кампаний.

Так, для решения задач традиционных отраслей целесообразно обращаться к широкому кругу лиц. Решение сверхсложных задач требует обращения к подготовленной аудитории. Ограниченная рациональность обывателей, как правило, не позволяет им приходить к качественным решениям нетривиальных задач.

2.3. Мультиагентные модели низкого уровня абстракции

Мультиагентные модели низкого уровня абстракции, как правило, имеют прикладной характер. Субъекты в них определяются на уровне индивидов, взятых в конкретных системах отношений. Относительная простота количественной параметризации и низкий разброс вариации результатов при одинаковых вводных делает такие модели удобными и надежными инструментами прогнозирования. Влияние вариации отдельных элементов на глобальную динамику моделируемых систем может быть интуитивно предсказуемо. Однако включение в анализ большого числа факторов и типов взаимодействующих субъектов значительно снижает качество умозрительных прогнозов. Как раз здесь проявляется прикладная значимость моделей данного типа, широко применяемых в демографических исследованиях (Макаров и др., 2017, 2019б), исследованиях потребительского выбора, моделях эвакуации (Helbing, Vicsek, 2000), оптимизации транспортного (Nagel, Schreckenberg, 1992; Nagel, Paczuski, 1995; Макаров и др., 2019а) и пешеходного движения (Helbing, Mulnar, 1995) и др.

В качестве примера прикладного использования агентного подхода как прогнозного инструментария приведем модель конкуренции на рынке телекоммуникационных услуг, представляющую собой экспертную систему, позволяющую осуществлять прогнозирование изменения доли рынка условного провайдера в ответ на изменение его тарифного плана и/или тарифных планов его конкурентов.

Помимо провайдеров в качестве агентов в рассматриваемой модели выступают индивиды — потребители телекоммуникационных услуг (Каталевский, Солодов, Кравченко, 2012). Основными факторами выбора провайдера для них является цена и скорость передачи данных; второстепенными факторами — качество соединения и специальные коммерческие предложения; к прочим факторам, определяющим конкурентные преимущества провайдеров, относятся надежность, качество технической поддержки и удобство подключения.

Авторами также был выделен ряд латентных поведенческих факторов, неочевидно детерминирующих потребительский выбор. Первый поведенческий фактор — так называемая инерция перехода, обуславливающая липкость потребительских предпочтений. Агенты готовы изменять тарифный план только при существовании значительно лучшей альтернативы. Второй поведенческий фактор обуславливает ориентированность агентов на внутренние переходы. Прежде чем перейти к другому провайдеру, предлагающему более привлекательный тарифный план, индивид проконсультируется со своим текущим поставщиком на предмет аналогичного предложения. Третий поведенческий фактор фиксируется в нацеленности некоторых индивидов на возможность извлечения выгод из мимолетных маркетинговых акций. Такие агенты отличаются чрезвычайно низкой потребительской лояльностью. Формула перехода агентов от одного провайдера к другому интегрирует все перечисленные факторы:

$$P_i n_j + S_j m_j > (P_{j+1} n_j + S_{j+1} m_j)(1 + k_j), \quad (1)$$

где P — привлекательность цены; S — привлекательность скорости; k — коэффициент лояльности; i — текущий тариф; $i + 1$ — предлагаемый новый тариф; j — социальная группа пользователя; n , m — веса параметров.

Рассмотренная модель является коммерческой разработкой и создавалась авторами в сотрудничестве с маркетинговым отделом компании заказчика. Калибровка весов формулы осуществлялась на основе экспертных оценок и реальной статистики. Таким образом, при наличии большого числа участников рынка и сложности их конкурирующих стратегий имитационное моделирование оказывается чрезвычайно полезным инструментом поддержки управленческих решений.

2.4. Агрегативные агентные модели

Агрегативные агентные модели репрезентируются комплексными субъектами — фирмами, союзами, кооперативами, городами, публично-правовыми образованиями. Проводя их внутреннюю демаркацию, можно условно выделить дескриптивные, квазивычислимые модели и модели оптимальной локализации. Дескриптивные модели ориентированы на абстрактно-объектное описание сложных неквантируемых феноменов. Например, в работах (Makarov, Bakhtizin, 2009; Зулькарнай, 2014) исследуются

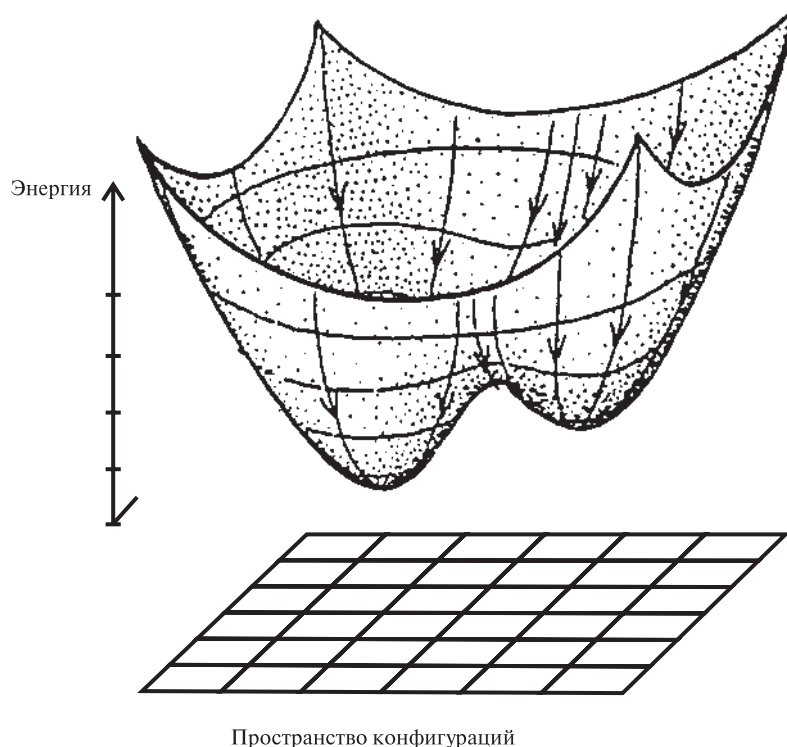


Рис. 4. Энергетический ландшафт решений моделей Аксельрода

феномены возникновения государственных структур снизу вверх; в (Saama, Kerberb, 2013) — гипотеза Хайека об инновационных преимуществах федеративных государств.

В квазивычислимых моделях процесс параметризации усложняет агрегативный и абстрактный характер субъектов и предметов их отношений друг с другом и с окружающей средой. Так, агентами в (Berger, 2001) являются фермерские хозяйства, а модель ориентирована на исследование феномена распространения инноваций. Модели оптимальной локализации позволяют определять эффективное расположение моделируемых объектов. Например, в (Зулькарнай, 2019) решается задача определения эффективного расположения системообразующих вузов.

Междисциплинарный потенциал агентного подхода в полной мере раскрывается в модели прогнозирования военных альянсов (Axelrod, Bennett, 1993), с помощью которой авторам удалось воспроизвести конфигурацию двух противоборствующих лагерей времен Второй мировой войны. Задача, включавшая 17 независимых европейских государств, имела 65 536 решений.

Инфографика реализации модели представляется с помощью схемы энергетического ландшафта (рис. 4). Нижняя плоскость, образуемая осями длины (x) и ширины (y), разбивается на множество равных клеток, каждой из которых соответствует одно из возможных решений модели. По оси высоты (z) откладывается их потенциальная энергия. Совокупность описывающих решение точек образует своеобразное покрывало решений. Места наибольших изгибов соответствуют наиболее вероятным решениям.

Потенциальная энергия существования коалиции рассчитывается по формуле

$$E(X) = \sum_i s_i s_j p_{ij}, \quad (2)$$

где i, j — индексы государств, принадлежащих к одному альянсу; s_i — вес государства i , зависящий от его экономических и демографических характеристик; p_{ij} — коэффициент взаимной склонности к сотрудничеству государств i и j , определяемый культурой и историей их взаимоотношений. Чем больше E , тем менее органично существование условного альянса. В экспериментах Аксельрода решение, обладавшее наименьшей потенциальной энергией, почти полностью повторило эмпирический сценарий, неверно было определено только место Польши и Португалии.

Аналитическая концепция энергетического ландшафта также была применена автором для построения предиктивной модели слияний и поглощений на американском рынке IT-технологий

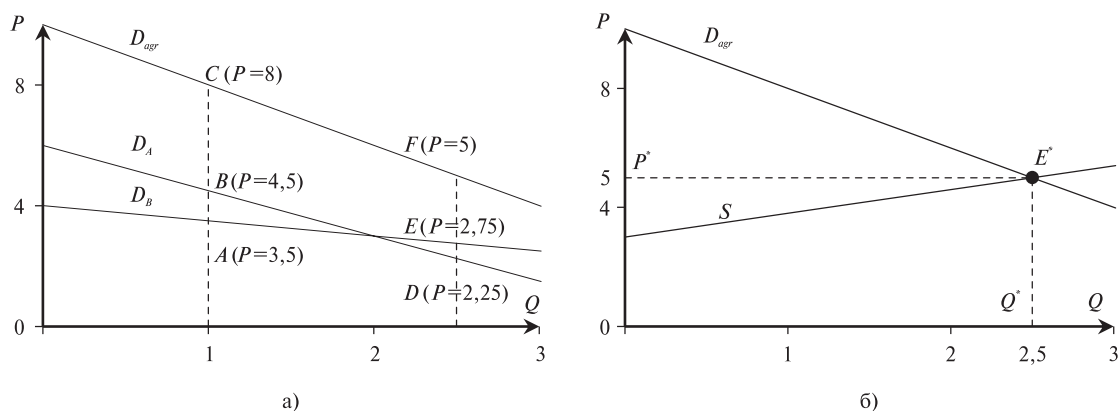


Рис. 5. Расчет цены и объема производства блага

Примечание. Кривая спроса условного региона D_{agr} определяется путем сложения ординат кривых спроса его жителей — индивидов D_A и D_B (рис. 5а). Объем производства и цена блага в регионе находится на пересечении кривой его предложения и агрегированного спроса его респондентов (рис. 5б).

(Axelrod, Mitchell, 1995). Агентами в ней выступили фирмы двух специализаций: первые занимались производством компьютерной техники; вторые — производством программного обеспечения. Анализируя фундаментальную динамику рынка, Аксельрод исходил из предположения о неизбежности формирования на рынке двух кластеров. Свою задачу он видел в построении инструментария оценки вероятности тех или иных конфигураций поглощения. С помощью модели автору удалось успешно воспроизвести эмпирическую конфигурацию поглощений.

Отдельного внимания заслуживают смешанные модели, отличающиеся агентной неоднородностью и неклассифицируемостью по признакам абстрактности и агрегативности. Так, в качестве агентов в модели аукционных интервенций (Huang, Liu, Shi, 2016) одновременно фигурируют правительство и два вида предприятий — оптовой и розничной торговли. Особенность смешанных моделей часто состоит в акценте не на самих агентах, а на факторах, формирующих среду их функционирования. Например, в работе (Ghazi, Dugdale, Khadir, 2016), посвященной проблеме загрязнения городского воздуха, вся калькуляционная мощь сосредоточена на нейросетевом модуле, имитирующем движение воздушных масс.

Другим примером здесь является авторская модель исследования эффектов децентрализации расходных полномочий между публично-правовыми образованиями в обеспечении населения локальными общественными благами (Рамазанов, 2019а). В качестве агентов в ней выступают индивиды, одновременно являющиеся налогоплательщиками и потребителями локальных общественных благ, и регионы, осуществляющие их производство за счет средств своих резидентов. Каждый потребитель в модели обладает индивидуальной функцией спроса на благо; регион — функцией предложения. Цена и объем производства блага в регионе лежит на пересечении кривой его предложения и кривой агрегированного спроса его резидентов (рис. 5).

Результаты моделирования говорят о положительной связи между общественной полезностью и децентрализацией бюджетных полномочий (когда потребители локальных общественных благ сами платят за их производство). Внутренняя миграция, изменяя параметры кривых агрегированного спроса, приводит к кластеризации населения по признаку совпадения экономических предпочтений. Возможность свободно выбирать регион проживания с подходящим соотношением режимов налогообложения и обеспечения локальными общественными благами позволяет индивидам максимально приближаться к параметрам своих индивидуальных предпочтений.

В другой авторской модели (Рамазанов, 2019б), посвященной исследованию эффектов распределения бюджетных полномочий между уровнями государственного управления, в качестве агентов выступают индивиды, являющиеся налогоплательщиками и потребителями локальных общественных благ, а также осуществляющие производство этих благ уровни публично-правовых образований: муниципальный, региональный и федеральный. Индивиды способны дифференцировать полезность благ в зависимости от уровня их предоставления. Каждый уровень обладает индивидуальной функцией предложения, определяющей связь между объемом блага и величиной налогообложения, необходимого для его производства (рис. 6).

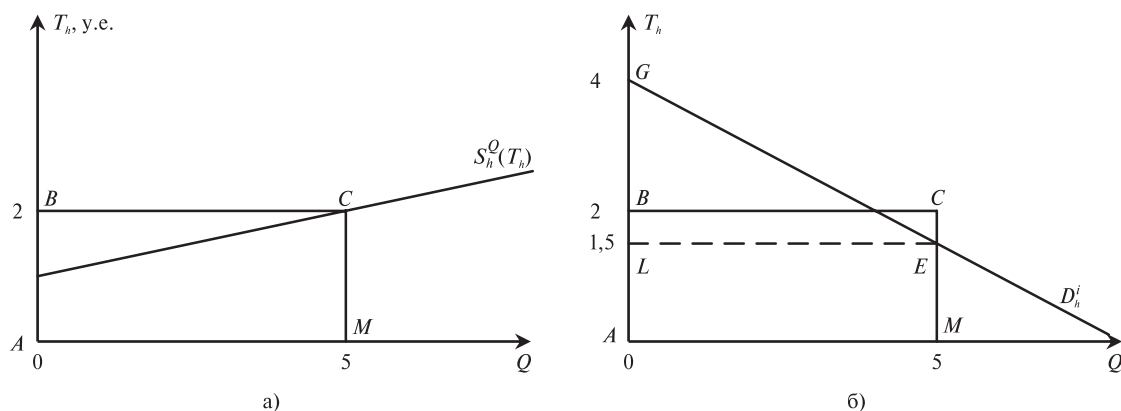
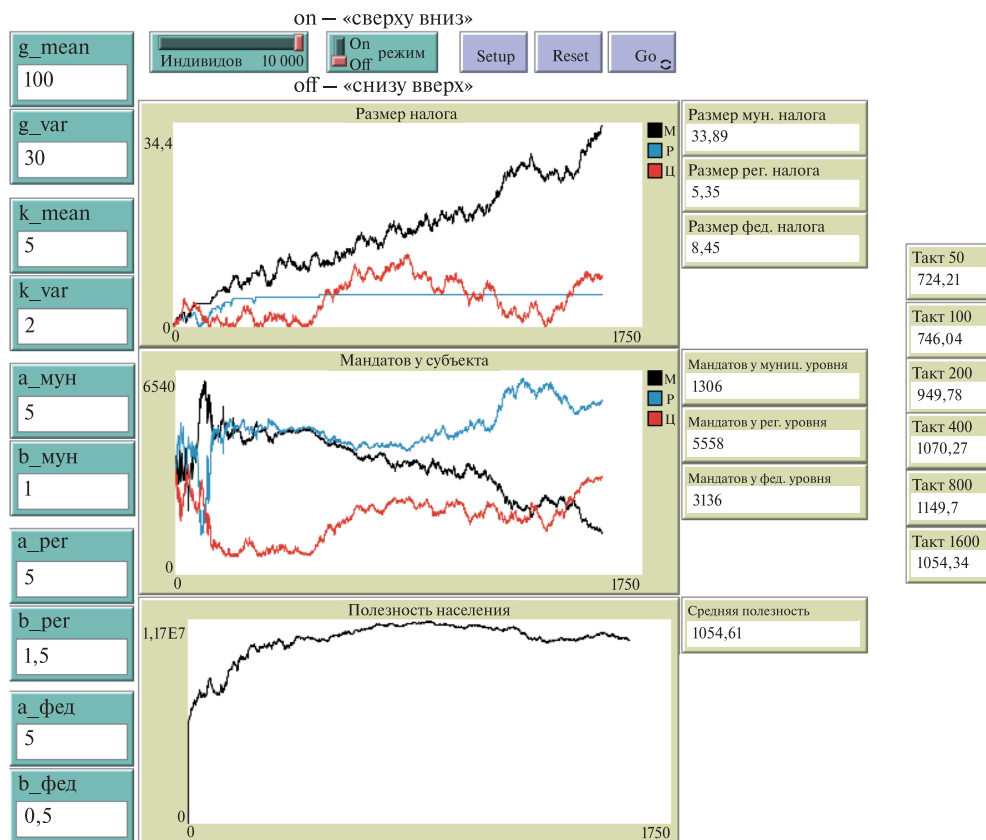


Рис. 6. Концепция расчета полезности агента

Примечание. Кривая предложения (S_h^Q) условного уровня государственного управления описывает его возможности обеспечения населения общественным благом h при том или ином размере налога. Так, согласно примеру, размеру налога в 2 у.е. соответствует объем регионального производства в 5 ед. (рис. 6а). D_i — кривая спроса индивида i , вынужденного потреблять 5 ед. по цене 2 у.е., при том, что субъективная цена блага для него эквивалентна 15 у.е. Таким образом, полезность индивида эквивалентна разности площади трапеции $AGEM$ и прямоугольника $ABCM$ (рис. 6б).



м — муниципальный уровень; р — региональный; ц — центральный (федеральный).

Рис. 7. Интерфейс модели, реализованной в программной среде NetLogo

Примечание. Показатель мандатов отражает численность индивидов, делегировавших ответственность за обеспечение услугой тому или иному уровню государственного управления. Бегунок индивидов задает число индивидов, генерируемых программой на старте реализации, переключатель режима — эмуляция модели. Кнопка «setup» инициирует принятие стартовых установок; «reset» — сбрасывает результаты предыдущей эмуляции. Кнопка «go» запускает процесс эмуляции. На экранах в правой части интерфейса фиксируются результаты вычисления модели в контрольных точках, соответствующие тактам 50, 100, 200, 400, 800 и 1600.

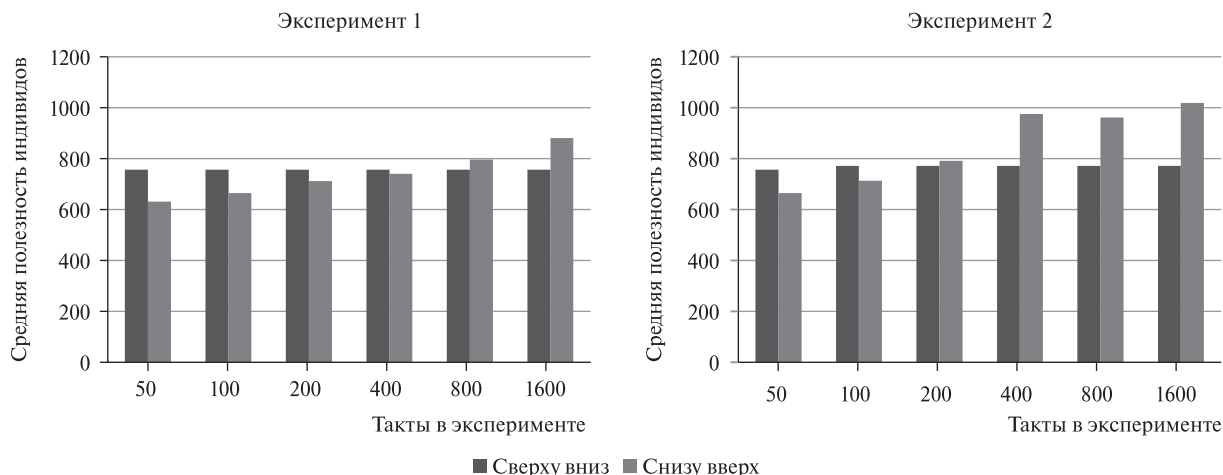


Рис. 8. Результаты двух случайных имитационных экспериментов с моделью

С помощью модели было исследовано два подхода. Первый подход — сверху вниз предполагал делегирование ответственности за обеспечение населения благом в пользу уровня, способного его производить с минимальными издержками; второй — снизу вверх — возможность для каждого индивида осуществлять самостоятельный выбор уровня в зависимости от своих индивидуальных предпочтений (рис. 7). При втором подходе динамика модели реализуется в ходе вертикальной конкуренции юрисдикций за налогоплательщиков путем варьирования налоговых ставок и, соответственно, объемов производства блага.

Результаты имитационного моделирования продемонстрировали большую краткосрочную эффективность подхода обеспечения населения общественными благами сверху вниз (рис. 8). Однако в долгосрочной перспективе большую эффективность демонстрирует демократический подход снизу вверх, при котором уровни управления в ходе конкуренции за налоговых резидентов приходят к максимально эффективному соотношению налоговых ставок и объемов производства общественных благ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Критически высказываясь о методологии агентного моделирования, американский антрополог С. Хельмрайх отмечает, что выращивание структур искусственных обществ является формализацией исследовательских предрассудков (Helmreich, 1998). Данное замечание не лишено оснований. Однако, несмотря на уязвимость агентного подхода к подобной критике, нельзя отрицать его прочных научных оснований — любые получаемые с его помощью выводы принципиально фальсифицируемы (в попперовском смысле), а значит, открыты для эмпирической верификации.

На сегодняшний день методология агент-ориентированного подхода продолжает активно развиваться. В литературе появляется все больше публикаций, посвященных критическому анализу практики ее применения (Ligmann-Zielinska, Kramer, 2014; Troitzsch, 2014; Broeke, Voorna, Ligtenberg, 2016). Высокий междисциплинарный потенциал методологии препятствует выработке универсальных критериев валидности агентных моделей. Активно дискутируются проблемы требований к условиям имитационных экспериментов. В частности, обсуждается проблема устойчивости (робастности) результатов и рамок количественной достаточности эмуляционных прогонов (Lee et al., 2015).

Тенденция роста обращений к агентному моделированию при исследовании абстрактных объектов позволяет прогнозировать его интервенцию в предметную область гуманитарных наук — в проблемы философии, психологии и творчества (рис. 9). В ближайшем будущем агентный подход будет испытывать на себе трансформирующее влияние со стороны активно развивающейся сферы искусственного интеллекта. Появляются возможности для построения сверхсложных симуляторов на основе высокоинтеллектуальных агентов (Friedenberg, 2008; Guillermo, 2012; Vallacher, 2017). Следует ожидать реконструкции старых моделей на основе более совершенных алгоритмов функционирования. Актуальная повестка позволяет прогнозировать рост применения агентного

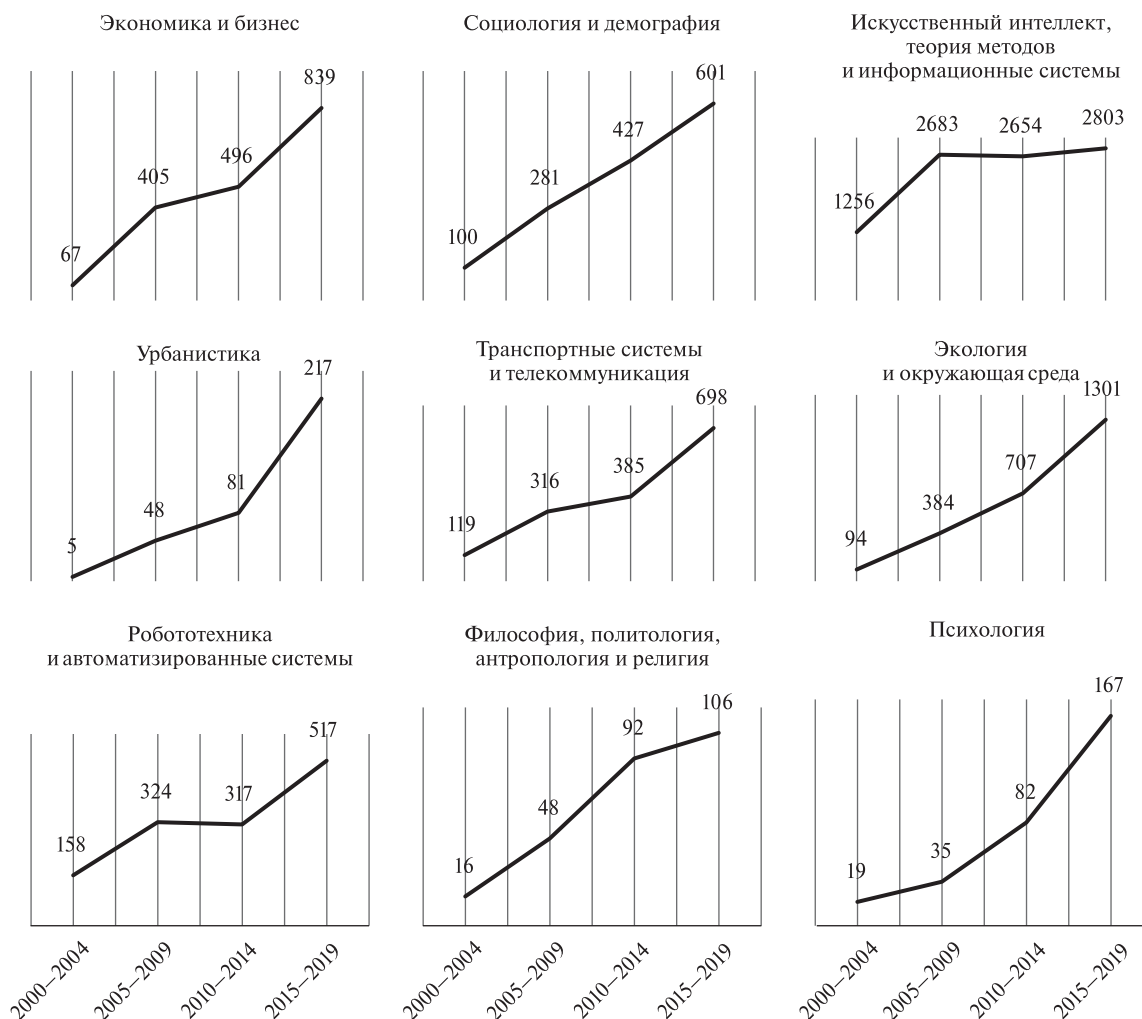


Рис. 9. Динамика числа и тематическая структура публикаций, проиндексированных базой Web of Science по ключевым словам «agent», «based», «modeling»

подхода при анализе проблем эпидемий и последствий иных внешнеэкономических шоков (Yang, Liu, Zhang, 2018; Mao, 2015; Zhang, Verbraeck, Meng, 2019; Teruhiko, Sanmay, Krishnamoorthya, 2012).

Развитие цифровых технологий привело к качественному изменению утилитарных свойств вычислительной техники. Программная адаптация сложных когнитивных схем превратила компьютер в инновационный инструмент решения творческих задач. Увеличение вычислительных мощностей современных компьютеров, развитие новых когнитивных технологий и агент-ориентированного подхода в частности, приближает человечество к возможностям разрешения задач неограниченной степени сложности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Борщев А.В.** (2004). От системной динамики и традиционного ИМ — к практическим агентным моделям: причины, технология, инструменты. XJ Technologies, СПбПУ. [Borshchev A. (2004). *From system dynamics and discrete event to practical agent Based modeling: Reasons, techniques, and tools*. XJ Technologies, SPbSTU (in Russian).]
- Зулькарнай И.У.** (2014). Задача агент-ориентированного моделирования распределения функций по вертикали в асимметричной федерации // *Вестник Башкирского университета*. Т. 19. № 4. С. 1249–1255. [Zulkarnay I.U. (2014). A task of agent-base modeling for allocation of functions on vertical in asymmetric. *Bulletin of Bashkir University*, 19, 4, 1249–1255 (in Russian).]

- Зулькарнай И.У.** (2019). Имитационное моделирование в исследовании вопросов оптимального размещения системообразующих вузов по территории страны // *Искусственные общества*. Т. 14. № 4. С. 9. [Zulkarnay I.U. (2019). Simulation modeling in the study of the optimal placement of systemically important universities across the country. *Artificial Societies*, 14, 4, 9 (in Russian).]
- Каталевский Д.Ю., Солодов В.В., Кравченко К.К.** (2012). Моделирование поведения потребителей // *Искусственные общества*. Т. 7. № 1–4. С. 3. [Katalevsky D., Solodov V., Kravchenko K. (2012). Modeling of consumer behavior. *Artificial Societies*, 7, 1–4, 3 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С.** (2019а). Имитационное моделирование системы «умный город»: концепция, методы и примеры // *Национальные интересы: приоритеты и безопасность*. Т. 15. № 2 (371). С. 200–224. [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019a). Simulation modeling of the smart city system: The concept, methods, and cases. *National Interests: Priorities and Security*, 15, 2 (371), 200–224 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф.** (2017). Искусственное общество и реальные демографические процессы // *Экономика и математические методы*. Т. 53. № 1. С. 3–18. [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F. (2017). Artificial society and real demographic processes. *Economics and Mathematical Methods*, 53, 1, 3–18 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б.** (2019б). Агент-ориентированная суперкомпьютерная демографическая модель России: анализ апробации // *Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз*. Т. 12. № 6. С. 74–90. [Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2019b). Agent-based supercomputer demographic model of Russia: Approbation analysis. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 12, 6, 74–90 (in Russian).]
- Полякова Н.Л.** (2012). Методологическая саморефлексия социологии в конце 60-х — начале 70-х гг. XX в.: спор о позитивизме // *Вестник Московского университета. Социология и политология*. № 4. С. 24–52. [Polyakova N.L. (2012). Methodological self-reflection of sociology of the end of 1960–1970's: A dispute about positivism. *Moscow State University Bulletin. Series 18. Sociology and Political Science*, 4, 24–52 (in Russian).]
- Рамазанов Р.Р.** (2019а). Моделирование межрегиональной миграции при дифференциации характеристик одной локальной общественной услуги // *Искусственные общества*. Т. 14. № 1. С. 7. [Ramazanov R.R. (2019a). Modeling interregional migration in differentiating the characteristics of one local public service. *Artificial Societies*, 14, 1, 7 (in Russian).]
- Рамазанов Р.Р.** (2019б). Агентное моделирование распределения полномочий между уровнями государства // *Искусственные общества*. Т. 14. № 3. С. 10. [Ramazanov R.R. (2019b). Agent-based modeling the distribution of authorities between the levels of the state. *Artificial Societies*, 14, 3, 10 (in Russian).]
- Adorno Th.** (1970). Zur Logik der Sozialwissenschaften. *Der Posotivismusstreit in der deutschen Soziologie*, 125–144.
- Albin P., Foley K.** (1990). Decentralized, dispersed exchange without an auctioneer: A simulation study. *JEBO*, 18 (1), 27–51.
- Axelrod R.** (1997). The dissemination of culture: A model with local convergence and global polarization. *J. Conflict Resolute*, 41, 203–226.
- Axelrod R., Bennett D.** (1993). A landscape theory of aggregation. *British Journal of Political Science*, 23 (2), 211–233.
- Axelrod R., Mitchell W.** (1995). Coalition formation in standard-setting alliances. *Management Science*, 41 (9), 1493–1508.
- Axtell R.** (2006). Firm sizes: Facts, formulae and fantasies. *CSED Working Paper*, no 4.
- Berger T.** (2001). Agent-based spatial models applied to agriculture: A simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics*, 25 (2–3), 245–260.
- Bernardes A., Stauffer D., Kertesz J.** (2002). Election results and the Sznajd model on Barabasi network. *Eur. Phys. J.*, 25, 123–127.
- Broekea G., Voorna G., Ligtenberg A.** (2016). Which sensitivity analysis method should I use for my agent-based model? *JASSS*, 19 (1), 5.
- Danielson P.** (1992). *Artificial morality: Virtuous robots for virtual games*. N.Y.: Routledge.
- Danielson P.** (1996). *Modelling rationality, morality and evolution*. N.Y.: Oxford UP.
- Epstein J.M., Axtell R.** (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Brookings Institution Press, 224.
- Friedenberg J.** (2008). *Artificial psychology: The quest for what it means to be human*. Taylor & Francis: Basingstoke.
- Ghazi S., Dugdale J., Khadir T.** (2016). Modelling air pollution crises using multi-agent simulation. *49th Hawaii International Conference on System Sciences*, 1530–1605.
- Guillermo M.** (2012). Using artificial societies to understand the impact of teacher student match on academic performance: The case of same race effects. *JASSS*, 15 (4), 8.

- Hahn U., Sydow M., Merdes C. (2019). How communication can make voters choose less well. *Topics in Cognitive Science*, 11 (1), 194–206.
- Helbing D., Vicsek T. (2000). Simulating dynamical features of escape panic. *Nature*, 407 (28), 487–490.
- Helbing D., Mulnar P. (1995). Social force model for pedestrian dynamics. *Phys. Rev.*, 51, 4282–4286.
- Helmreich S. (1998). Silicon second nature: Culturing artificial life in a digital world. *Artificial Life*, 7 (4), 425–428.
- Hills T., Todd P. (2008). Population heterogeneity and individual differences in an assortative agent-based Marriage and Divorce Model (MADAM) using search with relaxing expectations. *JASSS*, 11 (4), 5.
- Huang J., Liu L., Shi L. (2016). Auction policy analysis: An agent-based simulation optimization model of grain market. *Proceedings of the 2016 Winter Simulation Conference*, 3417–3428.
- Kalick S.M., Hamilton T.E. (1986). The matching hypothesis reexamined. *Journal of Personality and Social Psychology*, 51 (4), 673–682.
- Leea Ju-Sung, Filatovaa T., Ligmann-Zielinskab A., Hassani-Mahmoeic B., Stonedahld F., Lorscheide I, Voinova A., Polhill G., Sung Z., Parkerh P. (2015). The complexities of agent-based modeling output analysis. *JASSS*, 18 (4), 4.
- Ligmann-Zielinska A., Kramer D.B. (2014). Using uncertainty and sensitivity analyses in socioecological abm to improve their analytical performance and policy relevance. *PloS one*, 9 (10), 235–247.
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R. (2009). *The 6th Conference of the European Social Simulation Association*. 14th–18th September, University of Surrey. Guildford. UK.
- Medina F., Quesada F., Lozano V. (2014). The production of step-level public goods in structured social networks: An agent-based simulation. *JASSS*, 17 (1), 4.
- Nagel K., Paczuski M. (1995). Emergent Traffic Jams. *Physical Review E*, 51, 2909–2918.
- Nagel K., Schreckenberg M. (1992). A cellular automaton model for freeway traffic. *Journal de Physique I*, 2 (12), 2221.
- Saama N., Kerberb W. (2013). Policy innovation, decentralized experimentation, and laboratory federalism. *JASSS*, 16 (1), 7.
- Schelling T. (1978). *Micromotives and macrobehavior*. N.Y.: W.W. Norton & Company, 252.
- Schelling T.C. (1971). Dynamic models of segregation. *Journal of Mathematical Sociology*, 1, 143–86.
- Simon H. (1987). *Giving the soft sciences a hard sell*. Boston: Boston Globe.
- Souissi M.A., Bensaid Kh., Ellaia R. (2018). Multi-agent modeling and simulation of a stock market. *IMFI*, 15(4), 123–134.
- Strubenhoff M. (2017). The positivism dispute in German sociology, 1954–1970. *History of European Ideas* 44 (2), 260–276.
- Teruhiko Y., Sanmay D., Krishnamoorthya M.A. (2012). Hybrid Model for Disease Spread and an Application to the SARS Pandemic. *JASSS*, 15 (1), 5.
- Todd P.M., Billari F.C. (2003). Population-wide marriage patterns produced by individual mate-search heuristics. *Contributions to Economics*, 117–137.
- Troitzsch K.G. (2014). Simulation experiments and significance tests. In: *Artificial economics and self-organization. 669 of lecture notes in economics and mathematical systems*. Heidelberg, N.Y.: Springer, 669, 17–28.
- Vallacher R. (2017). *Computational social psychology*. London: Routledge.
- Walker L., Davis P. (2013). Modelling “marriage markets”: A population-scale implementation and parameter test. *JASSS*, 16 (1), 6.
- Yang J., Liu R., Zhang G. (2018). Task structure, individual bounded rationality and crowdsourcing performance: An agent-based simulation approach. *JASSS*, 21 (4), 12.
- Zhang M., Verbraeck, A., Meng R. (2019). Modeling spatial contacts for epidemic prediction in a large-scale artificial city. *JASSS*, 19 (4), 3.

Agent modeling in research and forecasting of socio-economic systems and processes

© 2021 R.R. Ramazanov

R.R. Ramazanov,

Ufa Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Ufa, Russia; e-mail: ruslan4729@mail.ru

Received 17.07.2020

This study was supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 19-110-50165).

Abstract. All-pervading digitalization, which is a process of digitizing not only quantitative but also qualitative aspects of objects in the real world, creates new challenges and new opportunities for humanity. The embodiment of such opportunities, in particular, is the use of the growing volume of data in science. And here we are talking not only about classical statistical methods, but also about complex neural network and simulation approaches, many of which are successfully used today. This work is devoted to the study of the experience of using one of such approaches — agent-based modeling. This methodology is universal and allows you to reproduce socio-economic systems and processes of varying degrees of complexity. Its application may be limited only by the theoretical knowledge of the researcher and / or the computing power of the platform for the implementation of simulation models. The introductory part of the work discusses the conceptual foundations of the agent-based approach methodology and certain aspects of its advantages in the study of social processes. An approach to the classification of agent-based models according to the aggregation-atomization and abstraction-concretization scales is presented. The second part is devoted to the analysis of the experience of using agent-based modeling in the field of socio-economic relations. The review includes the works of foreign and Russian authors. In conclusion, the trends in the development of agent-based modeling and its prospects are discussed. Based on the analysis of the dynamics of the number and the thematic structure of studies carried out using the methodology of agent-based modeling, it is concluded that the latter is expanding into the subject areas of the humanities.

Keywords: agent-based approach, simulation, socio-economic systems and processes, computer technology, information technology, cognitive technology, cybernetics.

JEL Classification: B23, B41, 60, C63.

DOI: 10.31857/S042473880010550-4