

Для цитирования: Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Агеева А. Ф. Агент-ориентированная модель Евразии и имитация реализации крупных инфраструктурных проектов // Экономика региона. — 2018. — Т. 14, вып. 4. — С. 1102-1116

doi 10.17059/2018-4-4

УДК 519.876.5; 314.74; 314.186; 004.942

**В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Е. Д. Сушко, А. Ф. Агеева**  
Центральный экономико-математический институт РАН  
(Москва, Российская Федерация; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com)

## АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННАЯ МОДЕЛЬ ЕВРАЗИИ И ИМИТАЦИЯ РЕАЛИЗАЦИИ КРУПНЫХ ИНФРАСТРУКТУРНЫХ ПРОЕКТОВ<sup>1</sup>

*Реализация крупных инфраструктурных проектов оказывает существенное воздействие на пространственное размещение производства и изменение торговых потоков, что вызывает соответствующие изменения миграционных потоков и влияет на социально-экономическое развитие вовлеченных в проект территорий. Для предварительной оценки последствий реализации подобных проектов необходимо использование модельного инструментария. Одним из современных направлений моделирования является агент-ориентированный подход, позволяющий воссоздавать в искусственной среде структуру и поведение реально существующих социально-экономических систем и имитировать их поведение при изменении внешних условий. Успешность применения агент-ориентированных моделей для решения задач прогнозирования определяется правдоподобием имитации в них основных социально-экономических процессов. В статье представлена конструкция агент-ориентированной модели стран Евразии, имитирующей демографические процессы в этих странах, а также последствия реализации большого инфраструктурного проекта как результата действий множества самостоятельных агентов. В модели присутствуют агенты двух типов: страны, способные лоббировать реализацию привлекательных для них проектов и люди — жители этих стран, создающие семьи, рождающие детей и выбирающие вид деятельности и место жительства, исходя из внутренних установок. Учет в алгоритме поведения агентов факторов, выявленных в результате исследования фактических миграционных процессов в странах Евразии, позволил воссоздать в модели максимально приближенную к реальности имитацию поведения людей. Конструкция модели была апробирована на условном примере двух маршрутов прохождения Нового шелкового пути. В ходе экспериментов отслеживались изменения экономических и демографических показателей для каждой из стран-участниц. Так, для России наблюдались приросты общего товарооборота (9,6 %) и чистого экспорта (1,5 %). Китаю участие в проекте давало приросты соответственно до 3,8 и 7,7 %. Небольшие страны (Грузия, Болгария) демонстрировали сокращение миграционного оттока и улучшение возрастной структуры населения. Модель может использоваться для предварительной оценки последствий реализации крупных инфраструктурных проектов.*

**Ключевые слова:** цифровое имитирование и моделирование систем, агент-ориентированное моделирование, искусственное общество, демография, типы воспроизводства населения, международная миграция, трудовая миграция, анализ миграционных процессов в Евразии, влияние больших инфраструктурных проектов на миграцию населения, программное обеспечение, исследование поведения объекта на основе его цифровой модели

### Введение

Целью представленного в статье исследования является расширение комплекса компьютерных моделей, разрабатываемых для воссоздания в виртуальной среде основных конструкций социально-экономической системы Евразийского континента (с детализации до уровня отдельных индивидуумов). Эти модели должны имитировать основные процессы, про-

исходящие в экономике и социальной сфере стран континента, и позволять прогнозировать их динамику — как естественную, обусловленную логикой развития самих процессов, так и вызванную реализацией масштабных экономико-политических проектов.

В настоящей работе под проектом понимается любое комплексное воздействие на исследуемую социально-экономическую систему, изменяющее условия существования отдельных групп экономических акторов (в качестве которых могут выступать люди, предприятия

<sup>1</sup> © Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Агеева А. Ф. Текст. 2018.

или более крупные игроки вплоть до отдельных стран). Соответственно, неотъемлемыми свойствами проекта являются указание на условия его инициации, перечень участников, перечень работ и (или) спецификация управляемых параметров, этапы реализации и необходимые ресурсы. Кроме того, поскольку речь идет об имитации в модели процессов реализации проекта, разворачивающихся во времени и позволяющих отслеживать вызванные этими процессами изменения состояния всей моделируемой системы и различных ее подсистем, необходимо также специфицировать правила, позволяющие рассчитывать реакцию процессов реализации проекта на изменения в объеме необходимых ресурсов и (или) условий среды.

При таком широком подходе к определению понятия проекта к этой категории можно отнести и строительство жилья, и открытие новых производств, и модернизацию инфраструктуры, и реформирование социальной сферы. Очевидно, что проекты различаются масштабами, то есть шириной охвата групп акторов, на условия деятельности которых они оказывают влияние. Так, речь может идти о локальных проектах, связанных с одним предприятием, об отраслевых или региональных проектах, о крупных проектах, оказывающих воздействие на экономику и социальную сферу целой страны, а также о больших инфраструктурных проектах, затрагивающих несколько стран. Причем любой проект может оказывать влияние не только на непосредственных его участников, но и на другие связанные с этими участниками группы акторов.

В данной работе, являющейся развитием исследований последних лет [1–3], авторы ставили задачу рассмотрения именно большого инфраструктурного проекта, способного оказать значительное влияние на экономику нескольких стран Евразийского континента. Примером проекта такого масштаба может служить планируемый в последнее время Новый шелковый путь, который должен пройти через весь Евразийский континент и связать сухопутным путем Китай с европейскими рынками. Очевидно, что реализация такого проекта неизбежно связана и с политическими решениями. Так, обсуждаются различные варианты маршрутов прохождения Нового шелкового пути, каждый из которых имеет своих сторонников (страны, заинтересованные в прохождении маршрута через собственную территорию и (или) через территорию стран-союзниц) и противников (на-

пример, страны, для которых страны — участницы данного варианта проекта являются конкурентами).

Для моделирования динамики больших социально-экономических систем — «больших» (или «активных» в терминологии В.Н. Буркова [4]), то есть систем, объединяющих множество самостоятельных акторов, действующих независимо, каждый в собственных интересах, — в последнее время все чаще применяется агент-ориентированное моделирование [1, 5]. Агент-ориентированные модели (АОМ) являются особым видом имитационных моделей, а их построение основано именно на моделировании поведения отдельных акторов (агентов), которые своими действиями и определяют изменения состояния большой системы в целом. В рамках АОМ становится возможным создавать сообщества виртуальных агентов, достаточно точно имитирующих структуру и поведение реально существующих социально-экономических систем для исследования поведения этих систем при изменении внешних условий и (или) наступлении каких-либо важных событий.

Агент-ориентированный подход находит применение в моделировании самых разнообразных социально-экономических процессов, влияющих на демографическое, технологическое и экологическое состояние стран Евразийского континента, и эти модели создаются для поиска решения актуальных на сегодняшний день проблем в этих областях. Разнообразие можно проиллюстрировать примерами: моделирование родословной одного из самых успешных семейных родов Китая, представители которого занимали высшие государственные посты в течение двенадцати поколений во времена правления династий Мин и Цзин [6], модель индийских ученых для анализа схем бюджетного финансирования лечения эпилепсии [7], АОМ распространения инновационно ориентированных предприятий в Китае [8].

Рассмотрим публикации об АОМ, созданных для решения задач, аналогичных поставленной в работе. К основным процессам, определяющим развитие масштабной социально-экономической системы, относятся воспроизводство населения и его миграция (как внутри отдельных стран, так и международная), последствия перемещения людей для развития территорий, реализация крупных проектов, влияющих на пространственное размещение производства и (или) изменение торговых и миграционных потоков.

Пожалуй, один из наиболее распространенных типов АОМ — это модели, в которых имитируются демографические процессы. Здесь можно найти работы, в которых детально рассматриваются самые различные аспекты процессов воспроизводства населения и его миграции. Отметим некоторые интересные работы последних лет, в которых рассматриваются демографические процессы в их взаимосвязи с отдельными социальными и экономическими процессами в обществе.

Так, в работе [9] описаны три АОМ, имитирующие различные составляющие демографической системы, такие как процесс создания браков, изменение рождаемости и др. В работе также исследуются различия в поведении людей, связанные с их принадлежностью к разным типам культуры и неравномерностью процессов демографического перехода в разных странах. А в работе [10] изучаются экономические последствия низких показателей фертильности. Авторы провели сравнительный анализ показателей фертильности и социальных семейных норм жителей стран Европы (Австрия, Германия) и Азии (Китай, Южная Корея). В работе [11] анализируется влияние социально-экономических факторов (таких как материальные возможности жениха и невесты, а также возраст матери) на принятие агентами-индивидуумами решения о вступлении в брак и рождении ребенка. Апробированные в данной модели алгоритмы были использованы в более общей работе [12], в которой на примере корейского общества исследовалось изменение важнейших демографических параметров (фертильность, количество населения в целом и в разных возрастных группах и др.) вплоть до 2050 г.

Представленная в [13] модель разрабатывалась по аналогии с моделью шведских ученых SVERIGE [14]. Агентами в ней являются индивидуумы, образующие семьи (домохозяйства), а последние являются динамическими объектами, имеющими конкретное географическое местоположение с полной информацией о характеристиках его агентов. Модель предназначена для прогнозирования демографических показателей и направлений миграции граждан Китая и для решения на этой основе широкого спектра прикладных социальных, демографических и экономических задач.

К наиболее важным факторам, влияющим на миграционные процессы, относится состояние рынка труда в различных регионах. В работе [15] имитируются условия французского рынка труда. В этой модели воспроизводятся

взаимоотношения различных агентов: индивидуумов (соискатели, безработные, не относящиеся к рынку труда), организаций, правительства, запускающего экономические инициативы в отношении рынка труда, направленные на преодоление проблемы безработицы.

С помощью АОМ успешно исследуются различные миграционные процессы:

- внутренней трудовой миграции и миграции из села в город на примере Китая [16–19];

- трансформации территорий, связанных с возникновением, развитием или деградацией крупных городских агломераций [20–22]. В [20–21] речь идет об ускоренной урбанизации территорий и их промышленном росте в связи с увеличением численности населения (а во второй работе — и о феномене дезакоты — процесса стремительной урбанизации сельских территорий Китая). В то время как в третьей работе рассматривается прямо противоположная ситуация, когда актуальными становятся проблемы обезлюдения территорий некогда крупных промышленных центров (на примере г. Лейпциг);

- межстрановой миграции [23, 24, 2]. В [2] приводится краткий обзор АОМ, посвященных этой тематике с анализом используемых в этих моделях стимулов, побуждающих агентов к миграции, а также условий и механизмов реализации их миграционных решений. В этих работах, наряду с использованием демографических и экономических данных, в процедурах принятия и реализации агентами миграционных решений учитываются также их социальные связи.

Особый интерес для авторов представляли также модели, связанные с транспортными системами и инфраструктурой. Наиболее близкой по тематике представляется работа [25]. В данной АОМ имитируются грузовые транспортные потоки и взаимодействия участников транзитных грузоперевозок на примере Восточно-Западного транспортного коридора (транзитный маршрут из Китая и России, через регион Балтийского моря, по направлению к Великобритании). Агентами модели являются: транспортный координатор, транспортный заказчик, транспортный диспетчер, поставщик, клиент, а физическими субъектами — транспортные средства и транспортная сеть, которая представлена набором узловых точек (терминалы и т. п.). Модель предназначена для апробации властями европейских стран вариантов мер, направленных на улучшение транспортной инфраструктуры и уменьшение негативного влияния транспорта на экологическую ситуацию.

### Метод агент-ориентированного моделирования и имитация социально-экономических процессов в странах Евразии

В работе [3] представлена конструкция АОМ стран Евразии, предназначенной для имитации основных процессов движения населения этих стран, их экономики, а также последствий реализации крупных проектов как результата действий множества самостоятельных агентов. В модели присутствуют агенты двух типов: страны, способные лоббировать реализацию проектов и люди — жители этих стран, создающие семьи, выбирающие вид деятельности и место жительства. Агенты этих типов взаимодействуют: страны создают условия для жизни и работы людей, а люди, участвуя в деятельности той или иной отрасли страны, вносят вклад в результаты этой деятельности, а значит, и в экономику страны в целом. С началом реализации крупного проекта создаются новые рабочие места, что изменяет среду агентов-людей и может побуждать их к смене работы и (или) места жительства.

В ходе компьютерных экспериментов агенты-страны выбирали маршрут прохождения «Нового Шелкового пути» из двух предложенных альтернативных. В качестве условного примера были взяты маршруты с одинаковыми граничными пунктами — от Пекина до Лондона (рис.). Один из маршрутов (северный) пролегал по территории семи стран и включал Транссибирскую магистраль, а другой (южный) полностью пролегал за пределами России и охватывал шестнадцать стран (маршруты задавались в виде цепочек участков, проходящих по каждой из стран).

Для построения и калибровки модели использовались данные Росстата, данные статистической службы Европейского союза Eurostat<sup>1</sup>, данные Национального бюро статистики Китая<sup>2</sup> и др.

Алгоритм выбора странами предпочтительного маршрута учитывал:

а) экономические интересы этих стран (страны стремились участвовать в проекте);

б) требования к безопасности транспортных связей с другими странами (в качестве уровня угрозы безопасности участка маршрута, проходящего по территории той или иной страны, принималось значение для нее международ-

ного индекса терроризма<sup>3</sup>, а в качестве фактора, снижающего опасность, — военные расходы данной страны);

в) характер двусторонних отношений (страны стремились заблокировать вариант, в котором маршрут проходит через территорию страны-антагониста);

г) взаимозависимость в рамках международных союзов (учитывалось членство стран в Евросоюзе и (или) НАТО и коллективное мнение этих союзов. Причем значимость голоса каждой страны внутри ЕС была пропорциональна ее доле в суммарном ВВП, а значимость голоса страны внутри НАТО — пропорциональна ее доле в суммарном объеме военных расходов стран-участниц).

В итоге странами был выбран южный маршрут, пролоббированный Евросоюзом и НАТО.

Следующим этапом имитации должно стать движение агентов-людей, вызванное изменениями их среды в результате начала реализации проекта. Механизм имитации трудовой миграции был подробно рассмотрен в работе [2] на примере миграции из Китая в Россию и учитывал ключевые особенности менталитета жителей. Насколько полно он учитывает особенности населения более широкого круга стран Евразии, — это вопрос, который требовал дополнительного исследования.

Основными элементами конструкции АОМ, имитирующей миграцию, служат показатели среды, характеризующие основные факторы, которые побуждают агентов к перемене места жительства, а также факторы, которые способствуют (или препятствуют) осуществлению этих намерений агентов. Агенты при этом обладают соответствующими свойствами, позволяющими дифференцировать их относительно целевых групп, на которые влияют различные факторы среды. Агенты, кроме того, снабжены внутренними процедурами, которые позволяют им выводить необходимость и возможность смены юрисдикции исходя из собственных характеристик и свойств среды.

С этой точки зрения рассмотрим данные, характеризующие экономическое положение в странах — участницах выбранного проекта, а также миграционные потоки, в которые вовлечено население этих стран. Причем нас будет интересовать как мощность миграционных потоков, так и их структура. Именно рассмотренные структуры миграционного притока и от-

<sup>1</sup> Бюро статистики Евросоюза [Электронный ресурс]. URL:<http://ec.europa.eu/eurostat/> (дата обращения: 05.05.2018).

<sup>2</sup> Национальное бюро статистики Китая [Электронный ресурс]. URL:<http://www.stats.gov.cn/english/> (дата обращения: 05.05.2018).

<sup>3</sup> The Global Terrorism Index 2016. Institute for Economics and Peace [Электронный ресурс]. URL:<http://economicsandpeace.org/wp-content/uploads/2016/11/Global-Terrorism-Index-2016.2.pdf> (дата обращения: 05.05.2018).



Рис. Маршруты Нового шелкового пути, использованные в экспериментах

тока позволит более детально разобрать причины этих явлений и выстроить механизмы их имитации в искусственном обществе, основываясь на поведении отдельных агентов. Исследование проводилось на основе аналитических публикаций ООН<sup>1</sup>. В таблицах 1–3, рассчитанных с использованием данных ООН<sup>3</sup>, представлены основные характеристики состояния экономики шестнадцати стран-участниц, такие как численность населения, в том числе трудоспособного, уровень безработицы и ВВП на душу населения, а также характеристики миграционных процессов в этих странах.

Данные таблицы 1 убедительно свидетельствуют о том, что основными причинами миграции служат низкий уровень экономического

развития и высокая безработица. Так, лидирующей по убыли населения в результате миграции в данном перечне стран является Грузия (ВВП на душу населения 4,459 млрд долл., безработица — 16,7 %, убыль — 18,1 % от численности населения), а на втором месте Болгария (7,875 млрд долл. и 10,2 %, убыль — 14,92 %). Соответственно, миграционный прирост населения наблюдается в странах, у которых ВВП на душу населения свыше 20 млрд долл., причем максимальный прирост в Швейцарии — стране с самым высоким из выборки ВВП и низкой безработицей (85,488 млрд долл. и 3,3 %, прирост — 21,64 %).

Однако только экономическими причинами нельзя объяснить, например, то, что при высоком уровне безработицы в Сербии (19,3 %) отток населения превышает приток всего на 2,21 %, или то, что относительный приток в более благополучную, чем Франция, Великобританию меньше, чем во Францию (5,64 % против 8,8 %).

Некоторые предположения о важных мотивах людей к миграции в ту или иную страну, а также о факторах, сдерживающих эту миграцию, можно сделать, рассмотрев данные о структуре миграционных потоков, представленные в таблицах 2 и 3.

Например, большинство мигрантов из пяти стран, входивших ранее в СССР, — от 53,7 % из Грузии до 76,42 % из Туркменистана — направлялись в Россию. И почти такие же доли в общем миграционном притоке в эти страны со-

<sup>1</sup> United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2015). Population Division World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance Tables / Working Paper No. ESA/P/WP.241 [Электронный ресурс]. URL: [https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key\\_findings\\_wpp\\_2015.pdf](https://esa.un.org/unpd/wpp/publications/files/key_findings_wpp_2015.pdf) (дата обращения: 05.05.2018).

<sup>2</sup> United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2016). Population Division International Migration Report 2015: Highlights (ST/ESA/SER.A/375) [Электронный ресурс]. URL: [http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/publications/migrationreport/docs/MigrationReport2015\\_Highlights.pdf](http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/publications/migrationreport/docs/MigrationReport2015_Highlights.pdf) (дата обращения: 05.05.2018).

<sup>3</sup> United Nations, Department of Economic and Social Affairs (2015). Trends in International Migrant Stock: Migrants by Destination and Origin (United Nations database, POP/DB/MIG/Stock/Rev.2015) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.un.org/en/development/desa/population/migration/data/estimates2/estimates15.shtml> (дата обращения: 05.05.2018).

Таблица 1

Население, его экономическое положение и миграционные процессы в странах — участницах проекта Нового шелкового пути, Южный маршрут, данные 2015 г.

№№ п/п	Страна	Среднегодовая численность населения, млн чел.	Численность трудоспособного населения, млн чел.	Уровень безработицы, %	ВВП на душу населения, млрд долл.	Миграционный приток		Миграционный отток		Миграционный прирост, %
						Тыс. чел.	Доля от постоянного населения, %	Тыс. чел.	Доля от постоянного населения, %	
1	Китай	1364,3	922,3	4,20	8,179	978,0	0,07	9546,1	0,70	-0,63
2	Казахстан	17,5	11,0	5,00	12,343	3546,8	20,27	4075,7	23,29	-3,02
3	Узбекистан	31,3	20,1	4,80	2,013	1170,9	3,74	1991,0	6,36	-2,62
4	Туркменистан	5,4	3,5	11,00	8,870	196,4	3,64	242,9	4,50	-0,86
5	Азербайджан	9,6	6,5	5,30	7,833	264,2	2,75	1146,8	11,95	-9,19
6	Грузия	3,7	2,3	16,70	4,459	168,8	4,56	838,4	22,66	-18,10
7	Турция	76,9	48,5	10,40	10,377	2964,9	3,86	3114,5	4,05	-0,19
8	Болгария	7,2	4,2	10,20	7,875	102,1	1,42	1176,4	16,34	-14,92
9	Сербия	7,1	4,2	19,30	6,183	807,4	11,37	964,6	13,59	-2,21
10	Хорватия	4,2	2,5	19,30	13,595	576,9	13,74	865,1	20,60	-6,86
11	Словения	2,1	1,3	12,00	23,571	236,0	11,24	140,5	6,69	4,55
12	Италия	60,8	35,1	2,20	29,951	5788,9	9,52	2900,9	4,77	4,75
13	Швейцария	8,2	5,1	3,30	85,488	2438,7	29,74	664,6	8,10	21,64
14	Франция	64,1	36,1	9,90	37,722	7784,4	12,14	2146,0	3,35	8,80
15	Бельгия	11,2	6,6	8,60	47,500	1387,9	12,39	531,0	4,74	7,65
16	Великобритания	64,3	38,1	5,40	44,448	8543,1	13,29	4917,5	7,65	5,64

ставила миграция из России, то же относится и к миграции между другими странами бывшего СССР. Причем миграцию в Армению из более благополучного Азербайджана трудно объяснить экономическими причинами (ВВП Армении — 3,6 млрд долл. на душу населения против 7,833 млрд долл. в Азербайджане). Такие же взаимобмены наблюдаются между странами бывшей Югославии — так, львиную долю притока в Сербию, Хорватию и Словению составляют выходцы из Боснии и Герцеговины, а остальное приходится, в основном, на встречные потоки.

Проведенный анализ позволил понять, влияние каких факторов должно имитироваться в АОМ для более правдоподобной имитации миграционных процессов. В результате была разработана оригинальная конструкция АОМ, учитывающая исторические связи агентов-стран, а также степень информированности агентов-людей о реальном положении разных стран и их взаимоотношениях. С этой целью в модели используются данные о доступности интернета среди населения<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Internet World Stats. Usage and Population Statistics [Электронный ресурс]. URL: <https://www.internetworldstats.com/stats3.htm> и URL: <https://www.internetworldstats.com/stats4.htm> (дата обращения: 05.05.2018).

### Агент-ориентированная модель Евразии

При современном — объектно ориентированном — подходе к программированию объекты реального мира заменяются в виртуальном цифровом мире их моделями, то есть определенными формальными конструкциями (классами), представляющими эти реальные объекты в программной системе. Таким образом, основой архитектуры АОМ Евразии служит следующая система классов, представляющая агентов разных типов, а также объекты окружающей их среды:

**Класс агентов-стран.** Характеристики внутренней структуры: код и название страны, международный индекс терроризма, доля пользователей интернета среди населения, образ страны на географической карте (контур, ограничивающий территорию страны и включающий образы всех объектов на этой территории, таких как населенные пункты, транспортные узлы, участки дорог и др.), коллекции населенных пунктов.

**Характеристики международных связей:** список (коллекция) международных союзов, к которым принадлежит страна и к которым принадлежала ранее, коллекция близких агентов-стран с указанием отношений с ними: лояльность, нейтралитет, напряженность, конфликт.

Таблица 2

Структура миграционного притока в страны — участницы проекта Нового шелкового пути, Южный маршрут, 2015 г., %

№№ п/п	Страна-участница проекта	Число стран, миграция из которых > 10000 чел.	Страна происхождения 1	Доля, %	Страна происхождения 2	Доля, %	Страна происхождения 3	% ВПОЦ	Страна происхождения 4	% ВПОЦ	Страна происхождения 5	% ВПОЦ	Суммарная доля в общем потоке, %
1	Китай	10	Гонконг	27,6	Респ. Корея	19,1	Бразилия	7,6	Филиппины	7,5			61,8
2	Казахстан	12	РФ	66,3	Украина	9,5	Узбекистан	7,9	Германия	6,2			90,0
3	Узбекистан	6	РФ	75,0	Украина	10,6							85,6
4	Туркменистан	3	Узбекистан	43,3	РФ	31,7	Казахстан	9,2					84,3
5	Азербайджан	4	Армения	56,2	Грузия	19,4	РФ	10,9	Узбекистан	6,4			92,9
6	Грузия	3	РФ	55,1	Украина	13,2	Казахстан	6,4					74,6
7	Турция	18	Сирия	52,9	Болгария	16,3	Германия	9,3					78,5
8	Болгария	1	РФ	20,1	Греция	7,6	Турция	6,4	Украина	6,3	Румыния	5,5	46,0
9	Сербия	6	Босния и Герцеговина	41,6	Хорватия	35,1	Черногория	8,8	Македония	5,8			91,3
10	Хорватия	5	Босния и Герцеговина	70,2	Сербия	9,0	Германия	5,9					85,1
11	Словения	4	Босния и Герцеговина	44,6	Хорватия	21,1	Сербия	12,0	Македония	7,0			84,7
12	Италия	61	Румыния	17,6	Албания	7,7	Марокко	7,3					32,7
13	Швейцария	34	Германия	14,9	Италия	10,9	Португалия	8,4	Сербия	6,9	Франция	6,2	47,3
14	Франция	69	Алжир	18,4	Марокко	11,9	Португалия	9,2					39,4
15	Бельгия	23	Италия	12,6	Франция	12,3	Нидерланды	11,6	Марокко	6,7			43,2
16	Великобритания	93	Индия	9,1	Польша	8,2	Пакистан	6,3	Ирландия	5,9			29,5

Таблица 3

## Структура миграционного оттока из стран — участниц проекта Нового шелкового пути, Южный маршрут, 2015 г., %

№№ п/п	Страна-участница проекта	Число стран, миграция в которые > 10000 чел.	Страна на-значения 1	Доля, %	Страна на-значения 2	Доля, %	Страна на-значения 3	Доля, %	Страна на-значения 4	Доля, %	Страна на-значения 5	Доля, %	Суммарная доля в общем потоке, %
1	Китай	39	Гонконг	24,2	США	22,0	Респ. Корея	7,9	Канада	7,5	Япония	6,8	68,4
2	Казахстан	12	РФ	62,8	Германия	24,9	Украина	5,5					93,2
3	Узбекистан	10	РФ	57,6	Казахстан	14,1	Украина	11,0					82,8
4	Туркменистан	2	РФ	76,4	Украина	9,3							85,7
5	Азербайджан	11	РФ	66,9	Армения	7,6	Украина	7,2					81,7
6	Грузия	9	РФ	53,7	Греция	9,9	Украина	7,7	Азербайджан	6,1			77,4
7	Турция	22	Германия	53,2	Франция	9,5	Нидерланды	6,4	Австрия	5,9			75,1
8	Болгария	14	Турция	41,0	Испания	11,1	Германия	9,0	Греция	6,2	США	5,5	72,8
9	Сербия	14	Австрия	20,2	Швейцария	17,5	Германия	11,1	Франция	8,8	Хорватия	5,4	63,0
10	Хорватия	12	Сербия	32,7	Германия	24,2	Австралия	8,1	Словения	5,7	США	5,2	75,9
11	Словения	4	Германия	28,3	Хорватия	13,9	Австрия	12,7	Сербия	7,8	Канада	6,5	69,3
12	Италия	19	Германия	14,3	США	13,0	Франция	12,7	Канада	9,7	Австралия	7,2	56,9
13	Швейцария	12	Италия	29,8	Франция	14,3	Германия	12,7	Испания	9,2	США	6,2	72,3
14	Франция	31	Испания	9,4	Бельгия	8,0	США	7,8	Швейцария	7,1	Германия	6,8	39,0
15	Бельгия	10	Франция	28,9	Нидерланды	10,2	Италия	8,7	Испания	8,1	Германия	6,6	62,5
16	Великобритания	32	Австралия	26,2	США	14,5	Канада	12,4	ЮАР	6,5	Испания	6,3	65,9

*Характеристики экономики:* ВВП, курс национальной валюты, уровень безработицы, объем экспорта, объем импорта, ВВП на душу населения, отраслевая структура ВВП, численность занятых по отраслям (видам деятельности), средняя заработная плата по отраслям; военные расходы; коллекция из объектов — видов деятельности, которые представляют отрасли на территории страны.

*Характеристики населения:* коэффициенты смертности, дифференцированные по полу и возрасту, суммарные коэффициенты рождаемости, численность постоянного населения и его возрастно-половая структура в разрезе социальных групп (здесь различаются граждане, живущие в своей стране, граждане, проживающие в других странах, и граждане других стран, проживающие в данной стране), распределение населения по уровням образования; коллекции агентов-людей — граждан и жителей страны.

*Характеристики планируемых проектов:* коллекция инфраструктурных проектов, планируемых (реализуемых) на территории страны и представленных в виде цепочек участков.

*Процедуры:*

а) процедура выбора странами варианта проекта в соответствии с заданным алгоритмом, учитывающим привлекательность каждого варианта с учетом собственных экономических интересов страны и ее международных связей. Возможные действия: лоббирование маршрута инфраструктурного проекта;

б) процедура расчета последствий реализации проекта в соответствии с заданным алгоритмом, учитывающим последовательность и сроки реализации этапов, а также наличие необходимых ресурсов (финансовых, трудовых). Результат работы процедуры — изменения характеристик страны в соответствии с ожидаемыми результатами этапов (численность занятых по отраслям, уровень безработицы и т.д.).

**Класс агентов-людей.** *Характеристики:* общие (индивидуальный номер; пол, возраст, уровень образования, гражданство, страна — место жительства, населенный пункт — место жительства, страна — место рождения, уровень недовольства, измеряемый по шкале, соответствующей таким состояниям агента, как «удовлетворенность», «недовольство», «готовность к переменам», признак готовности к миграции, социальные связи (коллекции агентов — родственников и коллег), характеристики репродуктивного поведения (желаемое число детей в семье (зависит от типа репродуктивной стра-

тегии агента), фактическое число детей), характеристики экономического положения (вид деятельности, заработная плата).

*Процедуры:*

а) процедура смерти агента: реализуется вероятностным выбором в соответствии с коэффициентом смертности для заданных пола и возраста агента;

б) процедура образования семьи, реализующая заданный алгоритм поиска партнера в своей среде, который учитывает возможность встречи агентов, близость их установок на желаемое число детей в семье и отсутствие близких родственных связей между претендентами;

в) процедура рождения ребенка, актуальна для агентов-женщин репродуктивного возраста, имеющих пару и не родивших столько детей, сколько желала. Алгоритм процедуры основан на использовании вероятности рождения ребенка в соответствии с возрастом матери. В результате работы процедуры в населенном пункте-месте жительства матери создается новый агент-младенец, которому вероятностным образом присваивается пол, а также устанавливаются все его родственные связи;

г) процедура трудовой миграции, актуальна для агентов трудоспособного возраста, готовых к миграции. Алгоритм процедуры учитывает уровень притязаний агента (уровень его образования), его профессиональный опыт (вид деятельности), его информированность о возможностях работы в других населенных пунктах (странах), а также «близость» стран как в смысле наличия хороших отношений, так и в смысле открытости границ для граждан страны-места жительства агента.

**Класс отраслей.** *Характеристики:* код страны, к которой принадлежит отрасль, код населенного пункта, на территории которого работает отрасль, численность занятых, распределение занятых по уровню образования; производственная функция (зависимость объема производства от фактора труда и капитала), объем производства; средняя заработная плата, коллекция агентов-работников.

**Класс населенных пунктов.** *Характеристики:* код страны, к которой принадлежит населенный пункт, численность постоянного населения и его половозрастная структура, уровень безработицы, численность занятых по видам деятельности, средняя заработная плата по видам деятельности, численность мигрантов и их половозрастная структура, коллекция агентов-людей — его жителей, коллекция из

объектов — видов деятельности, которые представляют отрасли на его территории, образ населенного пункта на географической карте.

**Класс транспортных узлов.** *Характеристики:* код страны, на территории которой расположен узел, код населенного пункта, на территории которого расположен узел, техническое состояние узла, пропускная способность, объем средств, численности работников и периода времени, необходимых для модернизации (строительства), численность занятых на стадии эксплуатации, образ узла на географической карте.

**Класс участков инфраструктурных проектов.** *Характеристики:* код страны, по территории которой пролегает участок, протяженность участка, коды начального и конечного транспортных узлов, вид транспорта, скорость движения по участку, пропускная способность, техническое состояние участка, объем средств, численности работников и периода времени, необходимых для модернизации (строительства), численность занятых на стадии эксплуатации; образ участка на географической карте.

Общее управление работой модели осуществляет главный класс. Он обеспечивает ввод исходной информации, создание популяций агентов разных типов и экземпляров других классов модели заданной численности, установку начального состояния системы, соответствующего базовому году имитации, взаимодействие с геоинформационной системой, отображение состояния популяций агентов и других обобщающих показателей мультиагентной системы на экране, организацию диалога с пользователем; организацию процесса имитации на каждом шаге.

Кроме того, есть классы, интегрирующие экземпляры других классов, такие как класс агентов — международных союзов (куда входят агенты-страны) и класс маршрутов инфраструктурных проектов (куда входят транспортные узлы и соединяющие их участки инфраструктурных проектов).

Для реализации представленной конструкции АОМ Евразии и алгоритмов поведения агентов было разработано программное обеспечение, которое было апробировано в ходе компьютерных экспериментов.

### Обсуждение результатов компьютерных экспериментов

Целью апробации модели была оценка правдоподобия имитации реализации выбранного варианта маршрута Нового шел-

кового пути и ее влияния на экономические и миграционные процессы. При проведении экспериментов были сделаны некоторые упрощения. Так, в качестве меры «близости» стран использовались данные о структуре фактических миграционных потоков, а возрастно-половая структура исходящих миграционных потоков калибровалась в соответствии с имеющимися данными о входящих потоках в тех странах, куда направлялись мигранты. Кроме того, размеры финансирования этапов проекта, как и экономическая целесообразность этих вложений, не рассматривались. Считалось, что средства вкладывают страны, заинтересованные в реализации проекта. Также, наряду с фактическими, в экспериментах использовались и условные данные (например, пропускная способность участков проектов или число открывающихся вакансий). В качестве базового рассматривался сценарий, при котором мощность маршрута равна лишь 50 тыс. TEU в год<sup>1</sup>.

С использованием АОМ проводились эксперименты по прогнозированию различных показателей до 2025 г. по следующим сценариям:

1. Имитировались процессы воспроизводства населения каждой страны без учета миграции, показатели смертности и рождаемости оставались постоянными. Полученные оценки сверялись с оценкой ООН (отклонение не превысило 1 %).

2. К первому варианту добавлялись миграционные процессы, причем считалось, что продолжатся наблюдавшиеся тенденции (постоянными принимались вероятности миграции в зависимости от пола и возраста агентов).

3. Отдельно имитировались последствия реализации двух вариантов проекта с грузопотоком в 50 тыс. TEU в год. Строительство велось в течение двух лет, после чего маршруты выходили на проектную мощность.

4. Имитировались последствия реализации каждого из проектов с грузопотоком в 500 тыс. TEU в год, то есть были реализованы этапы проекта по модернизации участков и транспортных узлов для увеличения их пропускной способности. К предыдущим вариантам добавлялось продолжение строительства еще в течение трех лет с выходом на проектную мощность к 2020 г. Это вызывало как снижение миграционного оттока из стран, участвующих в проекте, так и увеличение миграционного притока в эти страны.

<sup>1</sup> TEU — единица измерения груза, равная объему одного 20-футового контейнера.

## Оценка экономических эффектов от реализации вариантов проекта Нового шелкового пути

№№ п/п	Страна	До начала эксперимента		Результаты эксперимента	
		товарооборот по маршруту, млн долл.	чистый экспорт, млн долл.	ожидаемый общий прирост товарооборота, %	ожидаемый общий прирост чистого экспорта, %
<i>Северный маршрут</i>					
1	Китай	3 953 033	593 904	3,8	7,7
2	Россия	526 690	161 126	9,6	1,5
3	Германия	2 386 166	270 933	7,2	-6,2
4	Великобритания	1 096 547	-163 955	8,7	-8,0
<i>Южный маршрут</i>					
1	Китай	3 953 033	593 904	4,0	6,7
2	Турция	351 057	-63 356	8,1	24,0
3	Великобритания	1 096 547	-163 955	5,8	-10,2

5. Кроме мощности грузопотока, в экспериментах варьировался еще один параметр — доля увеличения товарооборота в связи с появлением нового транспортного коридора. Так, в первом варианте грузопоток в основном обеспечивался за счет перераспределения между новым и уже имевшимися маршрутами доставки, а товарооборот между отдельными странами возрастал не более чем на 25 %. В дальнейших экспериментах товарооборот мог увеличиваться до 50 % и даже до 100 %.

В ходе экспериментов отслеживались изменения экономических и демографических показателей, связанных с реализацией каждого варианта проекта. Основными экономическими показателями были экспорт и импорт для каждой из стран, а также производные от них показатели, такие как товарооборот и чистый экспорт, который напрямую влияет на ВВП. В таблице 4 представлены полученные оценки прироста этих показателей относительно фактических уровней (рассчитанных по данным ООН<sup>1</sup>) в результате реализации вариантов проекта для стран, на товарооборот которых проекты оказали наибольшее влияние.

Видно, что увеличение товарооборота происходит несимметрично, заметна экспансия Китая, для которого в обоих случаях растет не только товарооборот, но и чистый экспорт, в то время как в Германии он снижается, а в Великобритании еще более ухудшается изначально отрицательное внешнеторговое

сальдо. В случае Великобритании полученный результат эксперимента обращает внимание на угрожающую тенденцию, которую необходимо переломить с помощью управленческих мер. России, как и ожидалось, выгодно участие в Северном маршруте (прирост общего товарооборота составил 9,6 %, а прирост чистого экспорта — 1,5 %), а Турции — в Южном (8,1 и 24,0 % соответственно, удается улучшить внешнеторговое сальдо).

Эффект от реализации проекта, связанный с появлением мощного транзитного потока по новому транспортному коридору, а также с появлением новых рабочих мест, был также заметен для небольших стран-участниц. Так, для Грузии только плата за транзит при максимальном грузопотоке составила, по разным оценкам, от одного до пяти процентов от ВВП страны. Кроме того, в этих странах наблюдались позитивные демографические изменения — сокращение миграционного оттока и улучшение возрастной структуры населения (так как среди мигрантов преобладали люди трудоспособного возраста). Например, в Болгарии при консервативном прогнозе наблюдалось снижение к 2025 г. доли трудоспособного населения до 49,6 %, а реализация проекта с грузопотоком в 500 тыс. TEU в год увеличивала эту долю до 59,2 %.

Таким образом, разработанная агент-ориентированная модель, несмотря на условность проведенных экспериментов, достаточно правдоподобно воспроизводит динамику отслеживаемых экономических и демографических характеристик стран Евразии, имитируя последствия реализации масштабного инфраструктурного проекта.

<sup>1</sup> United Nations, Department Of Economic And Social Affairs (2015). Statistics Division. Trade Statistics [Электронный ресурс]. URL: <https://comtrade.un.org/data> (дата обращения: 05.05.2018).

## Благодарность

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-18-10296).

## Список источников

1. Макаров В. Л., Бахтизин А. Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв. Агент-ориентированные модели. — М. : Экономика, 2013. — 295 с.
2. Агент-ориентированный подход при моделировании трудовой миграции из Китая в Россию / Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Агеева А. Ф. // Экономика региона. — 2017. — Т. 13. — № 2. — С. 331–341.
3. Имитация социально-экономической системы Евразийского континента с помощью агент-ориентированных моделей / Макаров В. Л., Бахтизин А. Р., Сушко Е. Д., Агеева А. Ф. // Прикладная эконометрика. — 2017. — Т. 48. — С. 122–139.
4. Бурков В. Н., Новиков Д. А. Теория активных систем. Состояние и перспективы. — М.: Синтез, 1999. — 128 с.
5. Тарасов В. Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям. Философия, психология, информатика. — М. : Эдиториал УРСС, 2002. — 352 с.
6. Kurahashi S. Discovery of Family Tradition with Inverse Simulation // Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems V. Springer Series on Agent Based Social Systems / Terano T., Kita H., Takahashi S., Deguchi H. (Eds.). — Springer, Tokyo. — 2009. — Vol 6. — P. 181–192. — doi: 10.1007/978-4-431-87435-5\_15.
7. Health and economic benefits of public financing of epilepsy treatment in India: An agent-based simulation model / Megiddo I., Colson A., Chisholm D., Dua T., Nandi A., Laxminarayan R. // Epilepsia. — 2016. — No 57(3). — P. 464–474.
8. Multi-agent-based simulation on technology innovation-diffusion in China / Wang Z., Yao Z., Gu G., Hu F., Dai X. // Papers in Regional Science, 2014. — Vol. 93. — № 2. — P. 385–409. — doi:10.1111/pirs.12069.
9. Diaz B. A. Agent-Based Models on Social Interaction and Demographic Behaviour (Ph.D. Thesis). — Wien : Technische Universität, 2010. — 93 p.
10. Zamac J., Hallberg D., Lindh T. Low fertility and long run growth in an economy with a large public sector // European Journal of Population. — 2010. — No 26(2). — P. 183–205. — doi:10.1007/s10680-009-9184-z.
11. A data-driven approach for agent-based modeling: simulating the dynamics of family formation / Sajjad M., Singh K., Paik E., Ahn C. // Journal of Artificial Societies and Social Simulation 2016. — 19(1) — P. 1–14. — doi: 10.18564/jasss.2988.
12. Bae J. W., Paik E., Kim K., Singh K., Sajjad M. Combining microsimulation and agent-based model for micro-level population dynamics // Procedia Computer Science, 2016. — Vol. 80. — P. 507–517.
13. An agent-based population model for China / Chen Z., Holm E., Tang H., Mäkilä K., Li W., Liu S. // Springer: Computer And Computing Technologies In Agriculture, 2008. — Vol. I. — P. 441–448. — doi: 10.1007/978-0-387-77251-6\_48.
14. The SVERIGE spatial microsimulation model: Content, validation, and example applications / Holm E., Holme K., Mäkilä K., Mattsson-Kauppi M., Mötvik G. — Kiruna, Sweden: Spatial Modelling Centre, 2002 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.smc.kiruna.se/publications/PDF/SVERIGE.pdf> (дата обращения: 05.05.2018).
15. Lewkovicz Z., Kant J-D. A multi-agent system to model the labor market: simulating a new job contract introduction // The Fourth European Social Simulation Association Conference, ESSA, Toulouse, France, 2007. — P. 151–162.
16. Wu J., Mohamed R., Wang Z. Agent-based simulation of the spatial evolution of the historical population in China // Elsevier: Journal of Historical Geography, 2011. — 37 — P. 12–21. — doi:10.1016/j.jhg.2010.03.006.
17. Hao L., Mitchel C. Agent-Based modeling for rural migration decision and action in China / Annual Meetings of Population Association of America, New Orleans, Louisiana, 2013. [Электронный ресурс]. URL: <http://paa2013.princeton.edu/papers/132566> (дата обращения: 05.05.2018).
18. Zhang L. Labor mobility, intrahousehold decision-making, and agricultural land leasing: an empirical study with agent-based modeling in rural South China. (Ph.D. Thesis). — University Park, Pennsylvania : The Pennsylvania State University, 2011. — 192 p.
19. Laing D., Park C., Wang P. A modified Harris-Todaro model of rural-urban migration for China, 2005 [Электронный ресурс]. URL: [http://pages.wustl.edu/files/pages/imce/pingwang/harris-todaro-china\\_2005.pdf](http://pages.wustl.edu/files/pages/imce/pingwang/harris-todaro-china_2005.pdf) (дата обращения: 05.05.2018).
20. Tian G., Qiao Z. Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou Metropolitan Region of China // Ecology and Society, 2014. — 19(3). — art. 54 [Электронный ресурс]. URL <https://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss3/art52/> (Date of access: 05.05.2018). — doi: 10.5751/ES-06909-190352.
21. Xie Y., Batty M., Zhao K. Simulating emergent urban form using agent-based modeling: desakota in the Suzhou-Wuxian region in China // Annals of the Association of American Geographers, 2007. — 97(3). — P. 477–495.
22. Schwarz N., Haase D. Urban shrinkage: a vicious circle for residents and infrastructure? // Coupling agent-based models on residential location choice and urban infrastructure development. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010. International Congress on Environmental Modeling and Software Modeling for Environment's Sake, 5-th Biennial Meeting. Ottawa, Canada / David A. Swayne, Wanhong Yang, A. A. Voinov, A. Rizzoli, T. Filatova (Eds.), 2010. — Vol. 1. — P. 817–824.

23. Groen D. Simulating Refugee Movements: Where would you go? // *Procedia Computer Science*, 2016. — Vol. 80. — P. 2251–2255 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916308766> (дата обращения: 05.05.2018). — doi: 10.1016/j.procs.2016.05.400.

24. Sokolowski J. A., Banks C. M., Hayes R. L. Modeling population displacement in the Syrian city of Aleppo / *Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference*. — IEEE. — 2014. — P. 252–263 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.informs-sim.org/wsc14papers/includes/files/023.pdf> (дата обращения: 05.05.2018).

25. Agent-based simulation of freight transport between geographical zones / Holmgren J., Dahl M., Davidsson P., Persson J. A. // *Elsevier: Procedia Computer Science*, 2013. — Vol. 19. — P. 829–834. — doi: 10.1016/j.procs.2013.06.110.

### Информация об авторах

**Макаров Валерий Леонидович** — доктор физико-математических наук, академик РАН, профессор, научный руководитель, Центральный экономико-математический институт РАН; Scopus Author ID: 56470269300; ORCID: 0000-0002-2802-2100; Researcher ID: I-9022-2016 (Российская Федерация, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, 47; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru).

**Бахтизин Альберт Рауфович** — доктор экономических наук, член-корреспондент РАН, профессор, директор, Центральный экономико-математический институт РАН; Scopus Author ID: 55909941500; ORCID: 0000-0002-9649-0168; Researcher ID: S-6203-2016 (Российская Федерация, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, 47; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com).

**Сушко Елена Давидовна** — кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник, Центральный экономико-математический институт РАН; Scopus Author ID 35111795700; ORCID: 0000-0003-3565-5210; Researcher ID: E-4911-2015 (Российская Федерация, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, 47; e-mail: sushko\_e@mail.ru).

**Агеева Алина Фагимовна** — кандидат архитектуры, ведущий инженер, Центральный экономико-математический институт РАН; Scopus Author ID: 57194599986; ORCID: 0000-0003-4902-1489; Researcher ID: S-6016-2017 (Российская Федерация, 117418, г. Москва, Нахимовский пр-т, 47; e-mail: ageevaalina@yandex.ru).

For citation: Makarov, V. L., Bakhtizin, A. R., Sushko E. D. & Ageeva, A. F. (2018). An Agent-Based Model of Eurasia and Simulation of Consequences of Large Infrastructure Projects. *Ekonomika regiona [Economy of Region]*, 14(4), 1102-1116

**V. L. Makarov, A. R. Bakhtizin, E. D. Sushko, A. F. Ageeva**

Central Economic Mathematical Institute of RAS (Moscow, Russian Federation; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com)

### An Agent-Based Model of Eurasia and Simulation of Consequences of Large Infrastructure Projects

*The implementation of large infrastructure projects has a significant impact on the spatial location of production and change of trade flows. It causes the changes in migration flows and influences the socio-economic development of territories involved in the project. Preliminary assessment of the consequences of the implementation of similar projects requires the use of models. One of the modern directions of simulating is the agent-based approach. It allows to recreate a structure and behaviour of real socio-economic systems in an artificial environment and to imitate their behaviour if external conditions change. The realism of the simulation of the main socio-economic processes determines the success of pursuing agent-based models to meet the challenges of forecasting. The article describes the construction of the agent-based model of the countries of Eurasia, imitating the basic processes of population movement in these countries, as well as the consequences of implementing large infrastructure projects as a result of the actions of many independent agents. There are two types of agents in the model: a) countries that are capable of lobbying for the implementation of profitable projects, and b) people who live in these countries, who create families, give birth to children and choose the type of activity and place of residence. In agents behaviour's algorithm, we consider factors, revealed as a result of the research of actual migration processes in the countries of Eurasia. This has allowed to recreate in the model the imitation of people's behaviour close to reality. The model construction was tested for two routes of New Silk Road. During the experiments, we monitored the changes of economic and demographic indicators for each participating country. Thus, for Russia the growth of total trade turnover (9.6 %) and net export (1.5 %) was observed. Participation in the project gave to China the growth 3.8 % and 7.7 %, respectively. The small countries (Georgia, Bulgaria) showed the reduction of migration outflow and improvement of age structure of the population. The model can be used for preliminary assessment of the consequences of the large infrastructure projects implementation.*

**Keywords:** digital simulation of systems, agent-based modelling, artificial society, demography, types of population reproduction, international migration, labour migration, analysis of migration processes in Eurasia, the impact of large infrastructure projects on population migration, software, a study of an object behaviour based on its digital model

### Acknowledgements

*The article has been supported by the Russian Science Foundation (Grant № 16-18-10296).*

### References

1. Makarov, V. L. & Bakhtizin, A. R. (2013). *Sotsialnoye modelirovanie — novyy kompyuternyy proryv. Agent-orientirovannyye modeli [Social simulation is a new computer breakthrough. Agent-based models]*. Moscow: Ekonomika Publ., 295. (In Russ.)

2. Makarov, V. L., Bakhtizin, A. R., Sushko, E. D. & Ageeva, A. F. (2017). Agent-orientirovannyi podkhod pri modelirovaniy trudovoy migratsii iz Kitaya v Rossiyu [Agent-Based Approach for Modelling the Labour Migration from China to Russia]. *Ekonomika regiona [Economy of Region]*, 13(2), 331–341. (In Russ.)
3. Makarov, V. L., Bakhtizin, A. R., Sushko, E. D. & Ageeva, A. F. (2017). Imitatsiya sotsialno-ekonomicheskoy sistemy Evraziyskogo kontinenta s pomoshchyu agent-orientirovannykh modeley [Simulation of the socio-economic system of the Eurasian continent using the agent-based models]. *Prikladnaya ekonometrika [Applied Econometrics]*, 48, 122–139. (In Russ.)
4. Burkov, V. N. & Novikov, D. A. (1999). *Teoriya aktivnykh sistem. Sostoyanie i perspektivy [Theory of Active Systems: State and Prospects]*. Moscow: Sinteg Publ., 128.
5. Tarasov, V. B. (2002). *Ot mnogoagentnykh sistem k intellektualnym organizatsiyam. Filosofiya, psikhologiya, informatika [From multi-agent systems to intellectual organizations: philosophy, psychology, computer science]*. Moscow: Editorial URSS Publ., 352. (In Russ.)
6. Kurahashi, S. (2009). Discovery of Family Tradition with Inverse Simulation. *Agent-Based Approaches in Economic and Social Complex Systems V. Springer Series on Agent Based Social Systems*. In: Terano T., Kita H., Takahashi S., Deguchi H. (Eds). Springer, Tokyo, 6, 181–192. doi: 10.1007/978-4-431-87435-5\_15.
7. Megiddo, I., Colson, A., Chisholm, D., Dua, T., Nandi, A. & Laxminarayan, R. (2016). Health and economic benefits of public financing of epilepsy treatment in India: An agent-based simulation model. *Epilepsia*, 57(3), 464–474.
8. Wang, Z., Yao, Z., Gu, G., Hu, F. & Dai, X. (2014). Multi-agent-based simulation on technology innovation-diffusion in China. *Papers in Regional Science*, 93(2), 385–409. doi:10.1111/pirs.12069.
9. Diaz, B. A. (2010). *Agent-Based Models on Social Interaction and Demographic Behaviour (Ph.D. Thesis)*. Wien: Technische Universität, 93.
10. Zamac, J., Hallberg, D. & Lindh, T. (2010). Low fertility and long run growth in an economy with a large public sector. *European Journal of Population*, 26(2), 183–205. doi:10.1007/s10680-009-9184-z.
11. Sajjad, M., Singh, K., Paik, E. & Ahn, C. (2016). A data-driven approach for agent-based modeling: simulating the dynamics of family formation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 19(1), 1–14. doi: 10.18564/jasss.2988.
12. Bae, J. W., Paik, E., Kim, K., Singh, K. & Sajjad, M. (2016). Combining microsimulation and agent-based model for micro-level population dynamics. *Procedia Computer Science*, 80, 507–517.
13. Chen, Z., Holm, E., Tang, H., Mäkilä, K., Li, W. & Liu, S. (2008). *An agent-based population model for China*. Springer: Computer And Computing Technologies In Agriculture, I, 441–448. doi: 10.1007/978-0-387-77251-6\_48.
14. Holm, E., Holme, K., Mäkilä, K., Mattsson-Kauppi, M. & Mötvik, G. (2002). *The SVERIGE spatial microsimulation model: Content, validation, and example applications*. Kiruna, Sweden: Spatial Modelling Centre. Retrieved from: <http://www.smc.kiruna.se/publications/PDF/SVERIGE.pdf> (date of access: 05.05.2018).
15. Lewkowicz, Z. & Kant, J-D. (2007). *A multi-agent system to model the labor market: simulating a new job contract introduction*. The Fourth European Social Simulation Association Conference, ESSA, Toulouse, France, 151–162.
16. Wu, J., Mohamed, R. & Wang, Z. (2011). Agent-based simulation of the spatial evolution of the historical population in China. *Elsevier: Journal of Historical Geography*, 37, 12–21. doi:10.1016/j.jhg.2010.03.006.
17. Hao, L. & Mitchel, C. (2013). Agent-Based modeling for rural migration decision and action in China. *Annual Meetings of Population Association of America*. New Orleans, Louisiana. Retrieved from: <http://paa2013.princeton.edu/papers/132566> (date of access: 05.05.2018).
18. Zhang, L. (2011). *Labor mobility, intrahousehold decision-making, and agricultural land leasing: an empirical study with agent-based modeling in rural South China. (Ph.D. Thesis)*. University Park, Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 192.
19. Laing, D., Park, C. & Wang, P. (2005). *A modified Harris-Todaro model of rural-urban migration for China*. Retrieved from: [http://pages.wustl.edu/files/pages/imce/pingwang/harris-todaro-china\\_2005.pdf](http://pages.wustl.edu/files/pages/imce/pingwang/harris-todaro-china_2005.pdf) (date of access: 05.05.2018).
20. Tian, G. & Qiao, Z. (2014). *Modeling urban expansion policy scenarios using an agent-based approach for Guangzhou Metropolitan Region of China*. *Ecology and Society*, 19(3): 52. Retrieved from: <https://www.ecologyandsociety.org/vol19/iss3/art52/> (date of access: 05.05.2018). doi: 10.5751/ES-06909-190352.
21. Xie, Y., Batty, M. & Zhao, K. (2007). Simulating emergent urban form using agent-based modeling: desakota in the Suzhou-Wuxian region in China. *Annals of the Association of American Geographers*, 97(3), 477–495.
22. Schwarz, N. & Haase, D. (2010). *Urban shrinkage: a vicious circle for residents and infrastructure? — Coupling agent-based models on residential location choice and urban infrastructure development*. International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010. International Congress on Environmental Modeling and Software Modeling for Environment's Sake, 5-th Biennial Meeting. Ottawa, Canada. In: David A. Swayne, Wanhong Yang, A. A. Voinov, A. Rizzoli, T. Filatova (Eds.), 1, 817–824.
23. Groen, D. (2016). *Simulating Refugee Movements: Where would you go?* *Procedia Computer Science*, 80, 2251–2255. Retrieved from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1877050916308766> (date of access: 05.05.2018). doi: 10.1016/j.procs.2016.05.400.
24. Sokolowski, J. A., Banks, C. M. & Hayes, R. L. (2014). *Modeling population displacement in the Syrian city of Aleppo*. Proceedings of the 2014 Winter Simulation Conference. IEEE, 252–263. Retrieved from: <http://www.informs-sim.org/wsc-14papers/includes/files/023.pdf> (date of access: 05.05.2018).

25. Holmgren, J., Dahl, M., Davidsson, P. & Persson, J. A. (2013). Agent-based simulation of freight transport between geographical zones. *Elsevier: Procedia Computer Science*, 19, 829–834. doi: 10.1016/j.procs.2013.06.110.

### Authors

**Valery Leonidovich Makarov** — Doctor of Physics and Mathematics, Member of RAS, Professor, Academic Advisor, Central Economic Mathematical Institute of RAS; Scopus Author ID: 56470269300; ORCID: 0000–0002–2802–2100; Researcher ID: I-9022–2016 (47, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: makarov@cemi.rssi.ru).

**Albert Raufovich Bakhtizin** — Doctor of Economics, Corresponding Member of RAS, Professor, Head of the Central Economic Mathematical Institute of RAS; Scopus Author ID: 55909941500; ORCID: 0000–0002–9649–0168; Researcher ID: S-6203–2016 (47, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com).

**Elena Davidovna Sushko** — PhD in Economics, Leading Research Associate, Central Economic Mathematical Institute of RAS; Scopus Author ID 35111795700; ORCID: 0000–0003–3565–5210; Researcher ID: E-4911–2015 (47, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: sushko\_e@mail.ru).

**Alina Fagimovna Ageeva** — PhD in Architecture, Leading Engineer, Central Economic Mathematical Institute of RAS; Scopus Author ID: 57194599986; ORCID: 0000–0003–4902–1489; Researcher ID: S-6016–2017 (47, Nakhimovsky Ave., Moscow, 117418, Russian Federation; e-mail: ageevaalina@yandex.ru).