

===== МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ =====

**Агент-ориентированная модель «Интеллектуальная Россия»:
конструкция модели и анализ начальной популяции**

© 2022 г. А.А. Акиншин, О.И. Кузнецова, Н.К. Хачатрян, С.В. Борисова

А.А. Акиншин,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: aaa@cemi-ras.ru

О.И. Кузнецова,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: olgaku1992@bk.ru

Н.К. Хачатрян,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: nerses@cemi.rssi.ru; nerses_khachatryan@yandex.ru

С.В. Борисова,

ЦЭМИ РАН, Москва; e-mail: boriss@cemi.rssi.ru

Поступила в редакцию 30.03.2022

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-010-00339).

Аннотация. В последние годы большую популярность получило прогнозирование на основе агент-ориентированного моделирования. Это объясняется существенным увеличением вычислительных мощностей и, как следствие, возможностью проведения большого числа экспериментов. Моделирование основано на создании децентрализованных агентов и исследовании их поведения, определяющего поведение всей системы в целом. В данной статье описан процесс разработки агент-ориентированной модели «Интеллектуальная Россия». Подробно описано формирование начальной популяции агентов-людей, имитирующей население регионов России, и изложены правила их действий. Каждому агенту-человеку в начальной популяции назначаются индивидуальные свойства, в том числе вычисляются уровни удовлетворенности и трудового потенциала. Регионы России характеризуются совокупными показателями агентов-людей, проживающих на их территории, а также рядом постоянных экзогенных показателей. Изложенные в статье правила действия агентов должны определить, в частности, внутреннюю миграцию и структуру занятых по видам экономической деятельности, что позволит прогнозировать уровень трудового потенциала работников каждой отрасли в регионе. Получена начальная популяция агентов с использованием статистических данных, для которой проанализированы и визуализированы полученные в результате запуска модели характеристики регионов и отраслей.

Ключевые слова: агент-ориентированная модель, прогнозирование, регионы России, отрасли экономики, уровень трудового потенциала, уровень удовлетворенности, компьютерные эксперименты.

Классификация JEL: C53, C80, J21.

Для цитирования: Акиншин А.А., Кузнецова О.И., Хачатрян Н.К., Борисова С.В. (2022). Агент-ориентированная модель «Интеллектуальная Россия»: конструкция модели и анализ начальной популяции // Экономика и математические методы. Т. 58. № 3. С. 79–93. DOI: 10.31857/S042473880021777-3

ВВЕДЕНИЕ

Агент-ориентированное моделирование — один из самых активно развивающихся методов компьютерного моделирования. Он требует значительных технических мощностей для решения масштабных задач, поэтому он стал распространяться только сейчас — с активным развитием ПК и появлением доступа к суперкомпьютерам.

Этот инструмент позволяет моделировать поведение одного агента и наблюдать за поведением популяции таких агентов и всей системы, в том числе в динамике. Причем в роли агента может выступать практически любой объект, который можно описать: это может быть атом или частица,

человек или животное, фирмы или страны, военные единицы или вирусы, и даже потоки и процессы. Каждый такой агент наделяется конкретными свойствами и возможными вариантами действий в различных ситуациях (алгоритмом поведения). Агенты в модели действуют и взаимодействуют автоматически на каждом шаге модельного времени, формируя в результате каждой такой итерации данные о себе и общие данные о своей популяции. Агент-ориентированные модели (АОМ) часто используются для прогнозирования: сформировав начальную популяцию, можно наблюдать над ее поведением и в будущие периоды.

Стоит отметить, что в России тема прогнозирования особенно актуальна ввиду действующего закона о государственном стратегическом планировании (в первую очередь — в плане промышленного и экономического развития)¹. Также АОМ как аналитический и прогнозный инструмент может быть полезен практически для национальных проектов России: «Демография», «Здравоохранение», «Экология», «Наука» «Производительность труда и поддержка занятости» и пр.²

АОМ не являются оптимизационными, но они подходят для проведения множественных компьютерных экспериментов. Таким образом, от вариации входных данных на старте запуска модели будут зависеть результаты в итоге. Поэтому такого рода модели могут быть очень эффективными на стадии именно принятия решений.

АОМ имеют ряд преимуществ, например, — очень гибкий инструмент, который можно изменять, дополнять, адаптировать на любой стадии разработки и апробации. В отличие от классических методов экстраполяции агент-ориентированные модели могут включать огромное число показателей. Каждая модель может быть уникальной в зависимости от поставленных целей и задач. Кроме того, АОМ может включать различные методы: клеточные автоматы, элементы теории игр, сложных систем, мультиагентных систем и эволюционного программирования, методы Монте-Карло и пр.

Традиционно АОМ используется в сфере логистики, пространственного распределения (Дорошенко, 2019; Низамутдинов, Атнабаева, Ахметзянова, 2020), демографии (Макаров и др., 2016; Макаров и др., 2018б; Макаров и др., 2019а; Макаров и др., 2019в). Однако в настоящее время спектр применения таких моделей растет (Макаров и др., 2018а; Макаров и др., 2019б; Наумов, 2019). Например, набирает популярность тема создания *искусственного общества* для моделирования социально-экономических процессов (Хачатрян, Кузнецова, 2018; Хачатрян, Кузнецова, 2020б; Кузнецова, 2021).

В качестве примера можно привести демографическую АОМ России (Бахтизин и др., 2021), которая была использована не только для прогнозирования численности и структуры населения РФ до 2030 г., но и для оценки эффективности федеральной программы материнского капитала. Было проведено два типа компьютерных экспериментов (с учетом программы и без нее) и выявлено, что к концу расчетного периода (к 2030 г.) численность населения страны при проведении программы превышает численность населения без ее проведения на 3 млн человек (около 2,14% общей численности населения).

В качестве еще одного примера можно рассмотреть модель Вологодской области³. Она имитирует сложную социально-экономическую структуру субъекта РФ (Вологодской области). В рамках модели предусмотрено функционирование нескольких типов агентов на разных уровнях: люди, предприятия, муниципальные районы. Модель предназначена для апробации различных управленческих решений на уровне распределения бюджета и изменения экономической политики региона.

На международной арене можно отметить крупный журнал JASSS⁴, где публикуются работы по агент-ориентированному моделированию ученых из США, Великобритании, Испании, Германии, Пакистана, Китая и многих других стран.

¹ Федеральный закон «О стратегическом планировании в Российской Федерации» от 28 июня 2014 г. № 172-ФЗ. Принят Государственной Думой 20 июня 2014 г.

² Национальные проекты России. Проекты: <https://xn-80aараррррррррррррр7а3с9еhј.хn-р1аi/>

³ Лаборатория искусственных обществ и информационных технологий (ABM laboratory), Общее описание модели Вологодской области «Губернатор» (<http://abm.center/info/publications/420328/>).

⁴ The Journal of Artificial Societies and Social Simulation (<https://www.jasss.org/JASSS>).

В качестве примера можно привести АОМ, которая оценивает макроэкономические последствия так называемого вымогательства (Platas-López, Guerra-Hernández, Grimaldo, 2021). В модели рассматривается ситуация здоровой экономики с умеренными инфляцией и безработицей, воспроизводятся процессы взаимодействия работников, фирм и банков (рынок труда, рынок товаров, кредитный рынок). Для ряда агентов предусмотрена возможность осуществлять некую преступную деятельность, определяемую как вымогательство (extortion). Таким образом, оценивается влияние вымогательства на макроэкономическую ситуацию. Авторы утверждают, что даже низкий уровень вымогательства ведет к значительному снижению ВВП и росту безработицы, кроме того, вымогательство пагубно влияет на уровень потребления, инфляции, а также на распределение богатства. Причем вымогательство на рынках лучше предотвращать на ранней стадии, так как все способы борьбы с ним в ходе эксперимента не были достаточно эффективными, чтобы предотвратить снижение макроэкономических показателей.

В продолжение темы рынка труда можно привести в пример еще одну АОМ (Takacs, Squazzoni, 2015). Она моделирует идеализированную ситуацию на рынке труда, где уровень работников примерно одинаковый. Тем не менее, неравенство в сфере занятости все равно неизбежно возникает. Это происходит в силу асимметрии информации: работодатель ориентируется скорее на уровень амбициозности претендентов, чем на их реальный уровень знаний и умений. Интересный результат состоит в том, что ситуация тем хуже, чем выше должности претендентов.

Еще одна АОМ, разработанная учеными из Китая, представляет собой пространственную модель использования сельскохозяйственных угодий (Wang et al., 2021). Эта модель призвана оценить влияния нескольких государственных программ (восстановления лесов, а также субсидирования сельскохозяйственной деятельности) использования сельскохозяйственной земли.

Дополнительно можно отметить, что АОМ может использоваться и в довольно неожиданных направлениях. Например, для предсказания поведения толпы и формирования возможных беспорядков на спортивных мероприятиях (Clements, Fadai, 2022), спортивных симуляций с целью выявления наиболее эффективной игровой стратегии (Hulme et al., 2019) и даже симуляций игр на выживание (Rosenbusch, Röttger, Rosenbusch, 2020).

АОМ «Интеллектуальная Россия», описываемая в данной статье (далее — модель), используется для создания искусственного общества жителей России с целью оценки и прогнозирования динамики развития той или иной отрасли в регионах с точки зрения трудового потенциала.

В первую очередь модель призвана оценить *средний уровень трудового потенциала* в регионах России по предложенной авторами методологии посредством использования агент-ориентированного моделирования и выявить *точки концентрации*. Это поможет рассмотреть различные варианты стимулирования более равномерного распределения трудового потенциала по регионам, а также развития наиболее отсталых регионов и отраслей экономики. Решение данной задачи (в том числе, в виде готового программного продукта) может быть полезным при принятии управленческих решений на региональном и федеральном уровнях.

Работу над моделью можно условно разделить на два этапа. На первом этапе по регионам России формируется популяция агентов-людей на начальный момент модельного времени, всем агентам назначаются их индивидуальные свойства (возраст, пол и пр.). Регионы России характеризуются совокупными показателями агентов-людей внутри региона, а также рядом постоянных экзогенных показателей (престиж, климат). На втором этапе работы модели реализуются алгоритмы действий агентов-людей, на основе которых формируются прогнозные показатели. В представленной статье дано описание выполнения первого этапа работы над моделью и изложены правила действий агентов, которые на втором этапе лягут в основу формирования алгоритмов поведения агентов-людей.

1. ОПИСАНИЕ ПЕРВОГО ЭТАПА МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для формирования начальной популяции необходимо задать свойства каждого агента-человека и описать сферу его жизнедеятельности, как социальную, так и профессиональную.

1.1. Агенты и их свойства

На данный момент в модели присутствует один тип агентов — агенты-люди. Каждый агент-человек наделяется следующим набором свойств:

- 1) идентификационный номер (ID);
- 2) пол;
- 3) возраст;
- 4) регион проживания;
- 5) идентификационный номер семьи (ID семьи);
- 6) уровень образования (высшее, среднее профессиональное, среднее общее, основное общее, образование отсутствует);
- 7) сфера деятельности/статус (ребенок, студент, безработный, пенсионер, занятый в одной из отраслей);
- 8) рабочий стаж;
- 9) уровень квалификации (образование, опыт, профессиональные навыки; подробное описание см. в (Хачатрян, Акиншин, Кузнецова, 2020а));
- 10) группа доходности (используется при распределении общего объема денежных доходов по 20%-м группам населения, подробное описание см. в (Хачатрян, Акиншин, Кузнецова, 2020а));
- 11) размер дохода (присваивается индивидуальный уровень дохода внутри границ группы доходности, подробное описание см. в (Хачатрян, Акиншин, Кузнецова, 2020а));
- 12) ученая степень (для агентов, занятых в отрасли «Наука и инновации»);
- 13) уровень удовлетворенности;
- 14) уровень трудового потенциала.

Свойства 2–4, 6–8 и 10–12 агентов задаются в соответствии с реальными статистическими данными по регионам России, официально публикуемыми Федеральной службой государственной статистики (Росстат)⁵, Единой межведомственной информационно-статистической системой (ЕМИСС)⁶.

Последние два свойства: уровень удовлетворенности и уровень трудового потенциала — рассчитываются с использованием характеристик как самого агента, так и региона его проживания. Приведем их подробное описание.

Уровень удовлетворенности агента формируется, исходя из личных свойств агента и характеристик региона его проживания, и вычисляется для каждого агента на основе следующих показателей: X_1 — отношение индивидуального уровня заработной платы агента к среднему уровню заработной платы в отрасли, в которой он занят, в рамках региона проживания; X_2 — отношение индивидуального уровня заработной платы агента к прожиточному минимуму в регионе; X_3 — отношение численности занятых в отрасли «Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг» к общей численности агентов в регионе; X_4 — отношение численности занятых в отрасли «Образование» к общей численности агентов-детей в регионе; X_5 — отношение численности занятых в отрасли «Наука и инновации» к общей численности агентов в регионе; X_6 — престиж региона (задается экспертно в начальный момент времени и в дальнейшем не меняется); X_7 — климат региона (задается экспертно в начальный момент времени и в дальнейшем не меняется).

Показатели X_1, X_2 нормируются следующим образом:

$$X_{ij,n} = \left(X_{ij,n} - x_{i,n}^{\min} \right) / \left(x_{i,n}^{\max} - x_{i,n}^{\min} \right), \quad (1)$$

где i — номер показателя, j — номер агента, n — номер региона; $x_{i,n}^{\max}$ — максимальное значение показателя i среди всех агентов региона n ; $x_{i,n}^{\min}$ — минимальное значение i показателя среди всех агентов региона n .

Особенность модели состоит в том, что агенты имеют *разные приоритеты* (k_i) в отношении показателей X_i , $i = 1, \dots, 7$. Поэтому при вычислении уровня удовлетворенности агентов разных

⁵ Федеральная служба государственной статистики (rosstat.gov.ru).

⁶ ЕМИСС (fedstat.ru).

Таблица 1. Веса показателей в определении уровня удовлетворенности для разных групп агентов

Показатель	Зарботная плата к среднему уровню заработной платы, k_1	Зарботная плата к прожиточному минимуму, k_2	Здравоохранение, k_3	Образование, k_4	Наука и инновации, k_5	Престиж, k_6	Климат, k_7
Агент состоит в браке, имеет детей	0,3	0	0,3	0,3	0	0,05	0,05
Агент состоит в браке, не имеет детей	0,2	0	0,1	0	0,6	0,1	0
Студент	0,5	0	0,1	0	0,1	0,3	0
Безработный	0	0,5	0,2	0	0	0,2	0,1
Пенсионер	0	0,2	0,4	0	0	0,1	0,3
Занятый	0	0	0,1	0	0,6	0,3	0

групп, представляющего собой средневзвешенное значение всех показателей X_i , используется свой набор весовых коэффициентов для каждой группы (табл. 1).

Значения коэффициентов значимости k_i вычислялись на основании последовательного перебора наборов значений этих коэффициентов. Было проведено 16 экспериментов, в результате которых выявлен набор значений с минимальной волатильностью уровня удовлетворенности и уровня трудового потенциала по исследуемым годам; см. подробное описание в (Акиншин, Хачатрян, Кузнецова, 2021).

Формула расчета уровня удовлетворенности ($S_{j,n}$) для каждого отдельного агента j из региона n имеет вид

$$S_{j,n} = k_1 X_{1j,n} + k_2 X_{2j,n} + k_3 X_{3j,n} + k_4 X_{4j,n} + k_5 X_{5j,n} + k_6 X_{6j,n} + k_7 X_{7j,n}. \tag{2}$$

Со временем (на каждом следующем шаге модельного времени) статус агента может меняться, соответственно, будут меняться и его приоритеты. Например, агент, состоящий в браке, но не имеющий детей, будет иметь наибольший приоритет в уровне личного дохода. Но с рождением ребенка тот же агент поменяет приоритеты и будет в большей степени ориентироваться на уровни здравоохранения и образования в регионе. Аналогичным примером может быть переход агента из статуса «Занятый» в статус «Безработный» или наоборот.

Уровень трудового потенциала агента рассчитывается аналогичным образом и включает следующие свойства агента Y_i : возраст — Y_1 ; стаж — Y_2 ; уровень образования — Y_3 ; уровень квалификации — Y_4 ; уровень удовлетворенности — Y_5 .

Все показатели $Y_i, i = 1, \dots, 5$, также нормируются по формуле (1). Уровень трудового потенциала агента вычисляется как средневзвешенное всех значений Y_i , причем в этом случае применяются веса h_i — единые для всей популяции агентов (табл. 2).

Увеличение значений показателей $Y_i, i = 1, \dots, 5$, за исключением возраста Y_1 , напрямую влияет на рост трудового потенциала. Возраст же дает максимальный вклад в трудовой потенциал в определенной точке (70 лет), а затем этот вклад начинает убывать. В связи с этим получаем формулу для вычисления уровня трудового потенциала для каждого агента:

$$P_j = h_1(Y_{1j})Y_{1j} + h_2 Y_{2j} + h_3 Y_{3j} + h_4 Y_{4j} + h_5 Y_{5j}, \tag{3}$$

где $h_1(Y_1)$ — возрастает на множестве значений аргумента $Y_1 \leq 70$, а далее убывает.

Поскольку свойства агента меняются каждый момент модельного времени, то будет меняться и уровень трудового потенциала.

Таблица 2. Веса показателей в определении уровня трудового потенциала

Показатели	Возраст, h_1	Стаж, h_2	Уровень образования, h_3	Уровень квалификации, h_4	Уровень удовлетворенности, h_5
Веса показателей	0,1	0,1	0,2	0,3	0,3



Рис. 1. Схема присвоения свойств агентам

1.2. Формирование начальной популяции

Вначале внутри каждого региона создается популяция с определенным количеством агентов (соответствующим реальной численности жителей субъекта РФ). Далее каждому агенту назначаются его индивидуальные свойства 1–14. Присвоение свойств производится в определенной последовательности, согласно разработанной авторами методике, по схеме, представленной на рис. 1.

1.3. Характеристики и отраслевая структура регионов

На следующем шаге для каждого региона задаются характеристики и отраслевая структура экономики. Каждый регион характеризуется уровнем доходности, качеством здравоохранения и образования, уровнем развития науки и инноваций, состоянием окружающей среды и привлекательностью региона, а также *индексом удовлетворенности*. Подробное описание характеристик региона представлено в табл. 3.

Таблица 3. Показатели, характеризующие регион

Показатель	Описание
Уровень доходности	Отношение среднего значения заработной платы к прожиточному минимуму в регионе
Здравоохранение	Отношение численности занятых в отрасли «Деятельность в области здравоохранения и социальных услуг» к общей численности агентов в регионе
Образование	Отношение численности занятых в отрасли «Образование» к общей численности агентов-детей в регионе
Наука и инновации	Отношение численности занятых в отрасли «Наука и инновации» к общей численности агентов в регионе
Престиж	Задается экспертно в начальный момент времени и в дальнейшем не меняется
Климат	Задается экспертно в начальный момент времени и в дальнейшем не меняется
Индекс удовлетворенности	Средний уровень удовлетворенности по всем агентам, проживающим в регионе

В каждом регионе в соответствии с официальными данными Росстата определена отраслевая структура экономики. По видам экономической деятельности (ОКВЭД2) рассматриваются отрасли:

- 1) сельское, лесное хозяйство, охота, рыболовство и рыбоводство;
- 2) добыча полезных ископаемых;
- 3) обрабатывающие производства;
- 4) обеспечение электрической энергией, газом и паром; кондиционирование воздуха;
- 5) водоснабжение, водоотведение, организация сбора и утилизации отходов, деятельность по ликвидации загрязнений;
- 6) строительство;
- 7) торговля оптовая и розничная, ремонт автотранспортных средств и мотоциклов;
- 8) транспортировка и хранение;
- 9) гостиницы и предприятия общественного питания;
- 10) информация и связь;
- 11) операции с недвижимым имуществом;
- 12) образование;
- 13) здравоохранение и социальные услуги;
- 14) наука и инновации (исследователи);
- 15) прочее.

Отрасли характеризуются свойствами занятых в них агентов. Особенно показательным является уровень *трудового потенциала отрасли*, определяемый как среднее значение по всем персональным показателям уровня трудового потенциала агентов в отрасли. Такой усредненный показатель можно назвать *индексом трудового потенциала отрасли*.

2. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ПЕРВОГО ЭТАПА

Программная реализация модели требует значительных вычислительных ресурсов — оперативной памяти и ресурсов процессора. При создании начальной популяции были использованы следующие доступные программно-аппаратные средства.

Одно- или многопроцессорный сервер на базе процессоров с многоядерной архитектурой. Язык программирования C# 7.3. Среда разработки Visual Studio 2017, 2019.

Применялись средства распараллеливания вычислений, реализованные в библиотеке параллельных задач TPL (Task Parallel Library) в пространстве имен System.Threading.Tasks. Использовался класс Parallel, который является частью TPL, он предназначен для упрощения параллельного выполнения кода. Parallel включает ряд методов, которые позволяют распараллелить выполнение задачи: Parallel.For — позволяет выполнять итерации цикла параллельно; Parallel.ForEach — осуществляет итерацию по коллекции, реализующей интерфейс IEnumerable, подобно циклу foreach, но выполняет параллельный перебор.

Применение этих средств на этапе начального создания популяции позволило значительно (до десятков раз по сравнению с «линейной» программой в зависимости от числа доступных ядер) сократить время вычислений. Например, на 16-ядерном сервере (2 x Intel Xeon E5–2640v2), при доступных программе 15 ядрах (30 потоках), время вычислений сократилось более чем в 20 раз по сравнению с непараллельной версией программы.

Эффективное распараллеливание на данном этапе возможно на уровне одновременного выполнения одинаковых задач назначения свойств для агентов различных регионов. Одновременно обрабатывается до N регионов (где N — число доступных программе потоков). Так как число агентов в различных регионах значительно отличается, то и время завершения соответствующих потоков различно. Это приводит к непропорциональному уменьшению времени работы программы в зависимости от числа доступных ядер/потоков.

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Результатом работы модели являются выгружаемые в виде csv-файлов базы данных (БД). Они формируются на каждом шаге модельного времени (т.е. каждый модельный год) и представляют собой таблицу, где столбцы — свойства агентов, строки — сами агенты (пронумерованные в соответствии с персональными ID). Аналогичные БД формируются по семьям, а также по регионам.

На первом этапе формируется начальная популяция агентов-людей. В результате выгружается таблица, представляющая характеристики агентов-людей в начальный момент модельного времени, что позволяет рассчитать индексы удовлетворенности и трудового потенциала для каждого региона и отрасли. Начальная популяция была сформирована на основе статистических данных за 2019 г.

Часть характеристик агентов-людей имеет стохастический характер (в частности, заработная плата отдельного агента, уровни его квалификации, удовлетворенности и др.), для них была подтверждена устойчивость (более подробное описание см. в (Хачатрян, Акиншин, Кузнецова, 2020a)).

Ниже представлен анализ рассчитанных для начальной популяции индексов по отраслям и регионам.

На рис. 2 приведены лучшие по индексу удовлетворенности регионы, на рис. 3 — худшие. Каждый столбец диаграммы показывает значение индекса удовлетворенности в регионе для отдельно взятой отрасли.

Можно заметить, что среди ТОП-10 регионов (рис. 3) не наблюдается значительного разброса индекса удовлетворенности как по отраслям, так и по регионам — в большинстве случаев он не превышает 0,3. Тем не менее, выделяется отрасль науки и инноваций (исследователей): в Петербурге и Москве, а также в Московской и Нижегородской областях уровень удовлетворенности значительно выше среднего и почти достигает 0,5. В Республиках Саха (Якутия) и Коми, а также Архангельской и Белгородской областях, уровень удовлетворенности исследователей, наоборот, значительно ниже среднего.

Среди 10 худших регионов по индексу удовлетворенности (рис. 4) можно увидеть более ощутимый разброс, однако максимальное значение не превышает и 0,2.

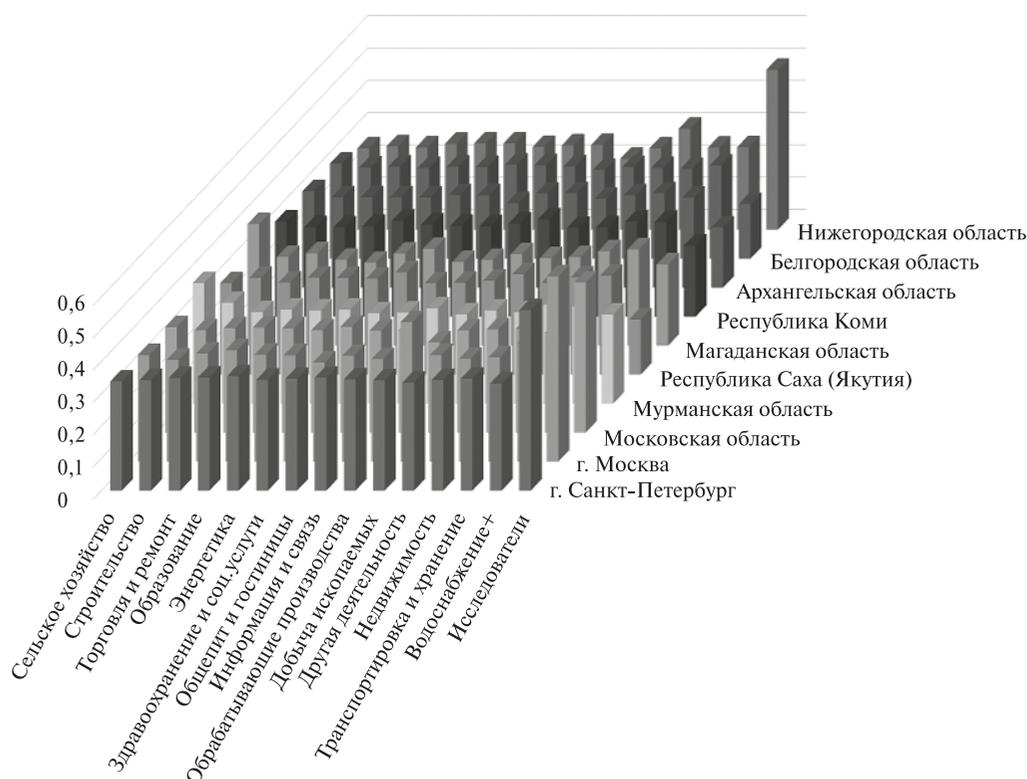


Рис. 2. Лучшие 10 регионов по индексу удовлетворенности в разрезе отраслей

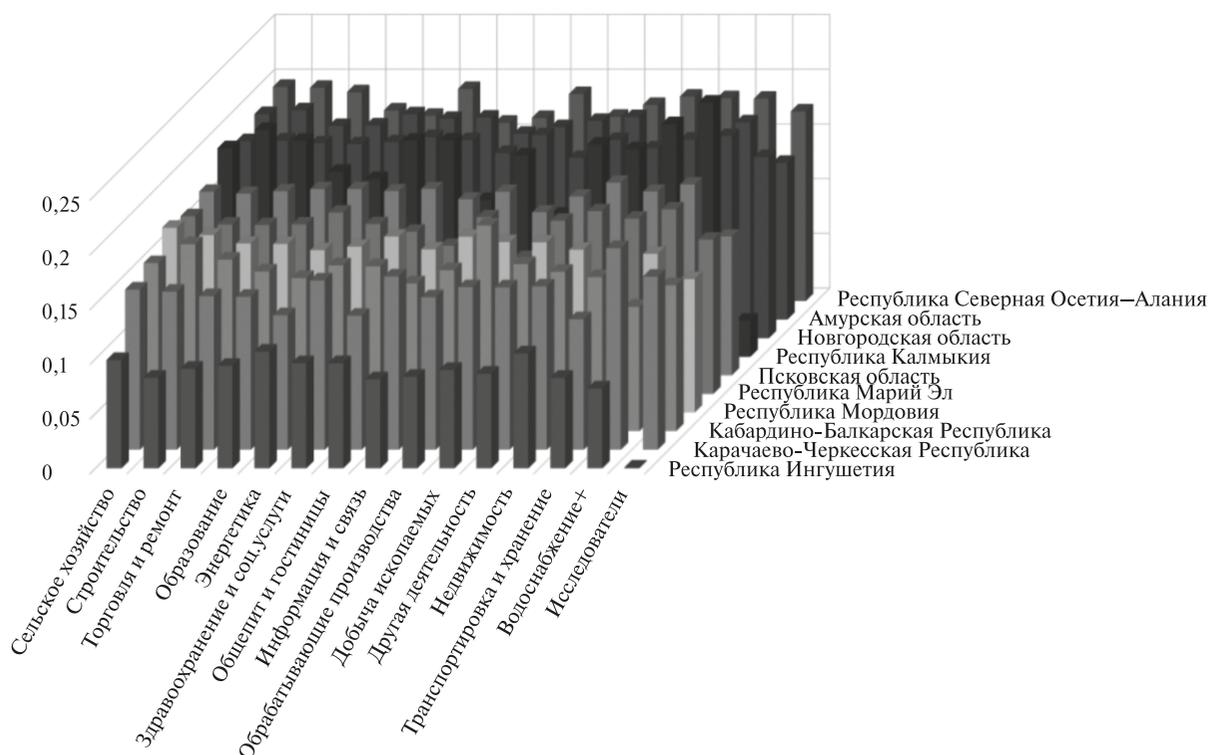


Рис. 3. Худшие 10 регионов по индексу удовлетворенности в разрезе отраслей

На рис. 4–5 представлены лучшие и худшие регионы по индексу трудового потенциала в разрезе отраслей. В лучших регионах (рис. 4) индекс трудового потенциала в среднем варьирует около значения 0,4; в худших регионах по этому показателю (рис. 5) — 0,3. На обоих рисунках можно также выделить сферу науки и инноваций (исследователей), для которой значение индекса трудового потенциала заметно выше, чем в других отраслях региона.

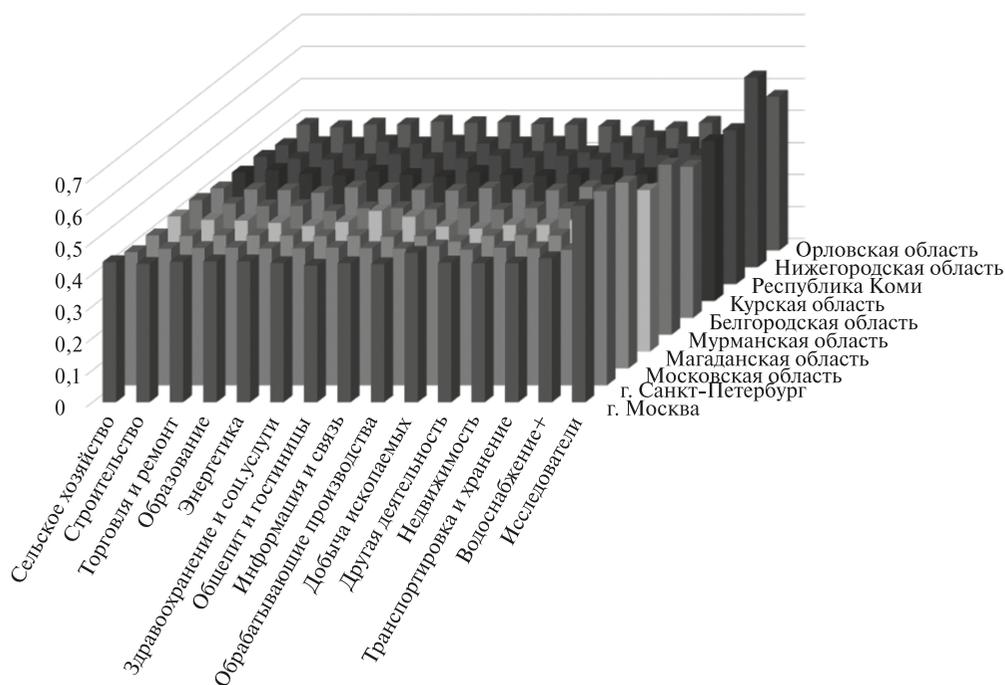


Рис. 4. Лучшие 10 регионов по индексу трудового потенциала в разрезе отраслей

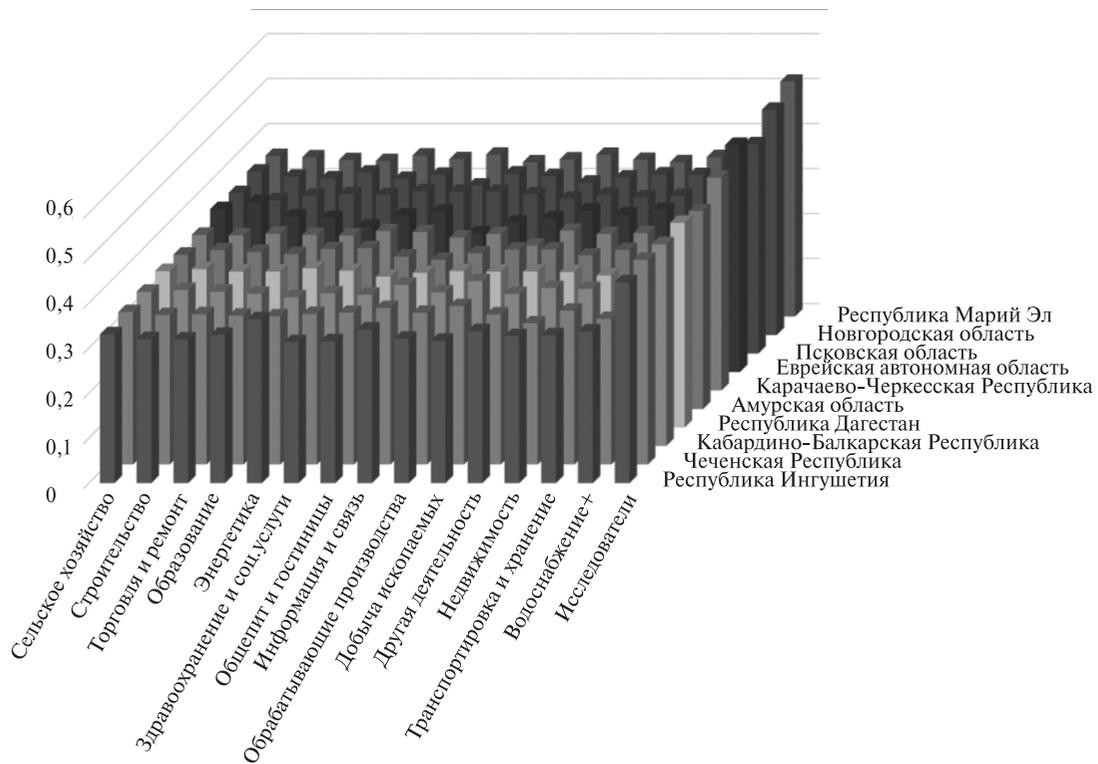


Рис. 5. Худшие 10 регионов по индексу трудового потенциала в разрезе отраслей

На рис. 6 можно видеть распределение уровня удовлетворенности агентов по возрастам. Высота каждого столбика гистограммы отражает численность агентов по всем регионам для каждой возрастной группы, уровень удовлетворенности которых попадает в заданный промежуток. Анализ гистограмм позволяет сделать следующие выводы:

– наибольшее число агентов имеет низкий уровень удовлетворенности (от 0,2 до 0,3) и относится к возрастной группе 28–57 лет;

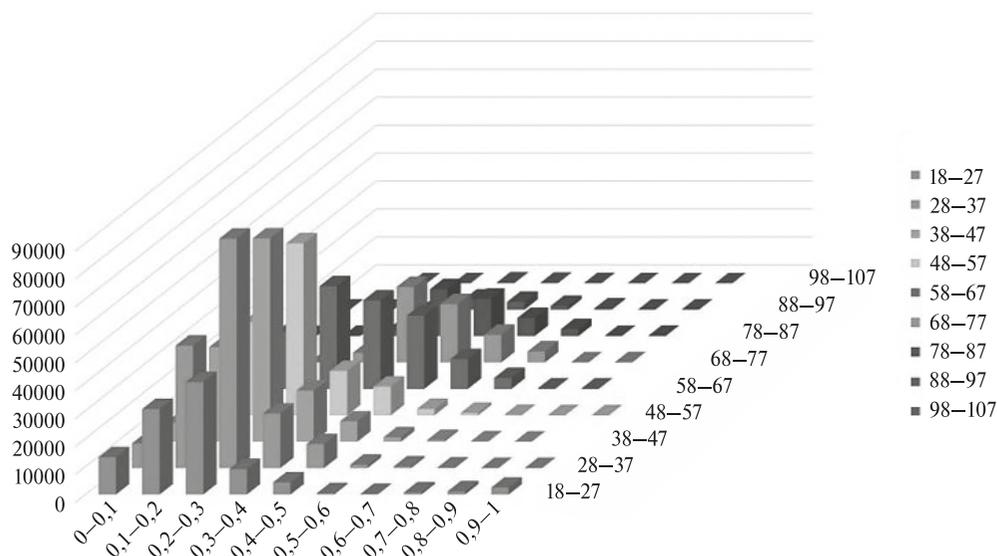


Рис. 6. Распределение агентов по уровню удовлетворенности и возрасту

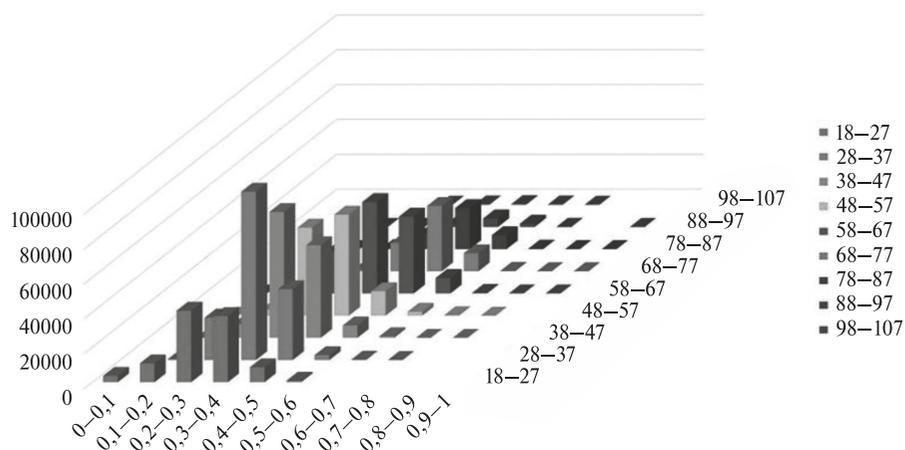


Рис. 7. Распределение агентов по уровню трудового потенциала и возрасту

– для значений уровня удовлетворенности от 0,3 до 0,4 и от 0,4 до 0,5 можно видеть две примерно одинаковые по численности группы агентов в возрастных категориях 28–57 и 58–77 лет соответственно;

– наибольшая численность агентов со значением уровня удовлетворенности от 0,5 до 0,7 приходится на возрастную группу 58–87 лет;

– наибольшее значения уровня удовлетворенности (от 0,8 до 1,0) имеет небольшая по численности группа агентов возрастной категории 18–27 лет.

На рис. 7 представлено распределение уровня трудового потенциала агентов по возрастам.

Анализ гистограмм в этом случае позволяет сделать следующие выводы:

– наибольшее число агентов имеет невысокий уровень трудового потенциала (от 0,3 до 0,4) и относится к возрастной группе 28–47 лет;

– для значений уровня трудового потенциала от 0,4 до 0,5 можно видеть примерно одинаковые по численности группы агентов в трех возрастных категориях 38–47, 48–57 и 58–67 лет;

– для значений уровня трудового потенциала от 0,5 до 0,6 и от 0,6 до 0,7 можно видеть две примерно одинаковые по численности группы агентов в возрастных категориях 58–77 лет.

В качестве основных выводов можно отметить следующее. В целом значения уровня удовлетворенности и уровня трудового потенциала незначительно варьируют в зависимости от региона и отрасли, хотя есть и исключения. Отдельно можно выделить сферу «Наука и инновации» — ее волатильность по индексу удовлетворенности по регионам значительно выше, чем в других отраслях. По значению индекса трудового потенциала эта отрасль превышает остальных как в лучших, так и в худших регионах.

Формирование начальной популяции агентов завершает первый этап работы над моделью. Далее будут изложены правила действия агентов, которые на втором этапе лягут в основу формирования алгоритмов действий агентов-людей.

4. ОПИСАНИЕ ВТОРОГО ЭТАПА МОДЕЛИРОВАНИЯ: ДЕЙСТВИЯ АГЕНТОВ В МОДЕЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

На втором этапе работы реализуются алгоритмы действий агентов-людей, на основе которых формируются прогнозные показатели. Перейдем к описанию правил действий агентов, которые будут задавать динамику модели, определяемую следующими типами процессов: демографически-ми; сменой статуса агента; «самостоятельным» поведением агента.

Таблица 4. Типы действий агентов

Типы процессов	Демографические и другие процессы	Изменение статуса агента	Поведение агента (варианты действий)
Осуществление	Автоматически и/или исходя из статистики	Автоматически по наступлению определенных критериев и с учетом статистики	Самостоятельное принятие решение агентом
Реализация	Увеличение возраста. Смерть. Рождение. Увеличение трудового стажа. Увеличение уровня квалификации	Ребенок → студент. Студент → занятый. Студент → безработный. Занятый → безработный. Безработный → занятый. Занятый → пенсионер. Безработный → пенсионер.	Переезд в другой регион. Смена сферы деятельности. Повышение квалификации. Решение ничего не менять

Таблица 5. Правила поведения агента

Действие	Условия	
	Описание	Значения характеристик
Переезд в другой регион	Неприемлемый уровень удовлетворенности	$S_{j,k}$
	Высокий относительный уровень квалификации	$Q_{j,k} > \alpha_3$
Смена сферы деятельности без переезда в другой регион	Низкий уровень удовлетворенности	$\lambda_1 < S_{j,k} < \lambda_2$
	Значение относительного уровня заработной платы ниже порогового	$X_1 < \beta$
Повышение квалификации	Невысокий уровень удовлетворенности	$\lambda_2 < S_{j,k} < \lambda_3$
	Низкий уровень квалификации	$\alpha_1 < Q_{j,k} < \alpha_2$
Решение ничего не менять	Высокий уровень удовлетворенности или случаи, не описанные выше	$S_{j,k} > \lambda_3$

Описание реализации этих процессов в модели представлено в табл. 4.

В каждый момент модельного времени агент оценивает свое текущее состояние, исходя из личных свойств, характеристик региона проживания, а также с учетом своих приоритетов. В зависимости от значений личного *уровня удовлетворенности* $S_{j,k}$; относительного уровня квалификации $Q_{j,k}$ (отношение уровня квалификации агента к среднему уровню квалификации по региону) и относительного уровня заработной платы (показатель X_1) агент принимает решение о каком-либо действии (рис. 8).

Действия агента определяются пороговыми значениями уровня удовлетворенности $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ ($\lambda_1 < \lambda_2 < \lambda_3$); относительного уровня квалификации $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ ($\alpha_1 < \alpha_2 < \alpha_3$) и относительного уровня зарплаты β . В табл. 5 описаны условия принятия агентом решения о том или ином действии.

Пороговые значения калибруются с использованием статистических данных по внутренней миграции и структуре занятых по видам экономической деятельности.

При любом действии агента изменяются его свойства, соответственно, меняются характеристики регионов и отраслей в регионе, что позволит спрогнозировать их будущее развитие или упадок.



Рис. 8. Схема принятия решения агентом

5. ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВТОРОГО ЭТАПА

Возможная реализация второго этапа, связанного с моделированием поведения агентов на основе ранее созданной популяции, — распараллеливание вычислений с использованием технологии MPI (Message Passing Interface). С программной точки зрения каждый агент может быть представлен отдельным процессом (поток), взаимодействующим с другими агентами через механизм сообщений. Использование коммутаторов (MPI_Comm) позволяет выделить группу агентов, например, в пределах одного региона.

С начала работы над моделью в качестве языка программирования был выбран C#. Однако на доступной разработчикам вычислительной платформе (Linux, MPICH) в качестве основного языка программирования MPICH приложений используется C++. В связи с этим для выполнения программ, написанных на C#, используется mono — кроссплатформенный фреймворк, реализующий .NET Framework в Linux. Функциональность модели, непосредственно выполняющая процедуры распараллеливания, вынесена в часть проекта, написанную на C++. При сборке проекта необходимо подключить модули mono и MPICH и применить компиляторы mcs и mpicxx. Запуск собранного проекта выполняется с использованием mono. Таким образом, удается реализовать функциональность проекта, написанного на C# в среде Linux/MPICH, с помощью средств параллельных вычислений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для обеспечения точности прогнозных значений в моделировании особую важность имеет формирование начального состояния. Поэтому перенос популяции и ее свойств из реальности в виртуальное пространство с достаточной степенью достоверности требует проработки в первую очередь, что и было выполнено и подтверждено.

В статье описан процесс разработки агент-ориентированной модели, которая воспроизводит искусственное общество граждан России (по состоянию на 2019 г.) с дальнейшей целью прогнозирования состояния популяции с точки зрения трудового потенциала в региональном и отраслевом разрезе. Представлено описание конструкции модели, свойств агентов, технической реализации модели, правил поведения агентов.

Также был произведен анализ и визуализация характеристик начальной популяции: оценены состояния отраслей и регионов с точки зрения уровня трудового потенциала и уровня удовлетворенности агентов. По обоим показателям можно выделить отрасль «Наука и инновации», имеющую наибольшие значения как по индексу удовлетворенности, так и по индексу трудового потенциала; при этом лучшими регионами оказались г. Москва и Санкт-Петербург, а также Московская и Нижегородская области.

Следующий шаг работы авторов над моделью — моделирование действий агентов во времени, в результате которых будут формироваться прогнозные значения, в том числе по уровням удовлетворенности и трудового потенциала как на уровне самих агентов, так и на уровнях отраслей и регионов. Это позволит спрогнозировать динамику развития отраслей в том или ином регионе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акиншин А.А., Хачатрян Н.К., Кузнецова О.И.** (2021). Имитационная модель российского общества: хранение данных модели, обработка и представление результатов // *Вестник ЦЭМИ*. Т. 4. № 1. DOI: 10.33276/S265838870015583-4. Режим доступа: <https://cemi.jes.su/s265838870015583-4-1/> [**Akinshin A.A., Khachatryan N.K., Kuznetsova O.I.** (2021). Simulation model of the Russian society: storage of model data, processing and presentation of results. *Herald of Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences*, 4, 1. DOI: 10.33276/S265838870015583-4. Available at: <https://cemi.jes.su/s265838870015583-4-1/> (in Russian).]
- Бахтизин А.Р., Макаров В.Л., Сушко Е.Д., Максаков А.А.** (2021). Демографическая агент-ориентированная модель России и оценка ее применимости для решения практических управленческих задач // *Искусственные общества*. Т. 16. № 2. DOI: 10.18254/S207751800015357-1. Режим доступа: <https://artsoc.jes.su/s207751800015357-1-1/> [**Bakhtizin A.R., Makarov V.L., Sushko E.D., Maksakov A.A.** (2021). Demographic agent-based model of Russia and assessment of its applicability for solving practical management problems. *Artificial Societies*, 16, 2. DOI: 10.18254/S207751800015357-1. Available at: <https://artsoc.jes.su/s207751800015357-1-1/> (in Russian).]
- Дорошенко Т.А.** (2019). Разработка агент-ориентированной модели образовательной миграции населения региона // *Вестник Евразийской науки*. Т. 11. № 5. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/17ECVN519.pdf> [**Doroshenko T.A.** (2019). Development of an agent-based model of educational migration in the region. *The Eurasian Scientific Journal*, 5 (11). Available at: <https://esj.today/PDF/17ECVN519.pdf> (in Russian).]

- Кузнецова О.И.** (2021). Агент-ориентированная модель «Интеллектуальная Россия»: исследование уровня трудового потенциала и уровня удовлетворенности в региональном и отраслевом разрезах // *Искусственные общества*. Т. 16. № 4. DOI: 10.18254/S207751800017946–9. Режим доступа: <https://artsoc.jes.su/s207751800017946-9-1/> [**Kuznetsova O.I.** (2021). Agent-based model “Intellectual Russia”: Study of the level of labor potential and the level of satisfaction in the regional and sectoral sections. *Artificial Societies*, 16, 4. DOI: 10.18254/S207751800017946-9. Available at: <https://artsoc.jes.su/s207751800017946-9-1/> (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Агеева А.Ф.** (2018а). Агент-ориентированная модель Евразии и имитация реализации крупных инфраструктурных проектов // *Экономика региона*. Т. 14. № 4. С. 1102–1116. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Ageeva A.F.** (2018a). An agent-based model of Eurasia and simulation of consequences of large infrastructure projects. *Economy of Region*, 14, 4, 1102–1116 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Васенин В.А., Борисов В.А., Роганов В.А.** (2016). Суперкомпьютерные технологии в общественных науках: агент-ориентированные демографические модели // *Вестник Российской академии наук*. Т. 86. № 5. С. 412–421. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Vasenin V.A., Borisov V.A., Roganov V.A.** (2016). Supercomputer technologies in social science: Agent-oriented demographic models. *Herald of the Russian Academy of Sciences*, 86, 5, 412–421 (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. 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, 200–224 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С.** (2019б). Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем // *Программная инженерия*. Т. 10. № 4. С. 167–177. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S.** (2019b). Development of software framework for large-scale agent-based modeling of complex social systems. *Software Engineering*, 10, 4, 167–177 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В.** (2019в). Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского Союза // *Экономика и математические методы*. Т. 55. № 1. С. 3–15. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Rovenskaya E.A., Strelkovsky N.V.** (2019c). Aggregated agent-based simulation model of migration flows of the European Union countries. *Economics and Mathematical Methods*, 55, 1, 3–15 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б.** (2018б). Разработка агент-ориентированной демографической модели России и ее суперкомпьютерная реализация // *Вычислительные методы и программирование*. Т. 19. № 4. С. 368–378. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B.** (2018b). Development of an agent-based demographic model of Russia and its supercomputer implementation. *Numerical Methods and Programming*, 19, 4, 368–378 (in Russian).]
- Наумов И.В.** (2019). Исследование межрегиональных взаимосвязей в процессах формирования инвестиционного потенциала территорий методами пространственного моделирования // *Экономика региона*. Т. 15. № 3. С. 720–735. [**Naumov I.V.** (2019). Investigation of the interregional relationships in the processes of shaping the territories’ investment potential using the methods of spatial modelling. *Economy of Regions*, 15, 3, 720–735 (in Russian).]
- Низамутдинов М.М., Атнабаева А.Р., Ахметзянова М.И.** (2020). Исследование процессов межрегиональной миграции на основе имитационного моделирования // *Известия Уфимского научного центра РАН*. № 3. С. 93–99. [**Nizamutdinov M.M., Atnabaeva A.R., Akhmetzyanova M.I.** (2020). Research of interregional migration processes based on simulation modelling. *Proceedings of the RAS Ufa Scientific Centre*, 3, 93–99 (in Russian).]
- Хачатрян Н.К., Акиншин А.А., Кузнецова О.И.** (2020а). Имитационная модель российского общества. Создание и анализ виртуальной популяции // *Искусственные общества*. Т. 15. № 4. DOI: 10.18254/S207751800012620–1. Режим доступа: <https://arxiv.gaugn.ru/s207751800012620-1-1/> [**Khachatryan N.K., Akinshin A.A., Kuznetsova O.I.** (2020 a). Simulation model of Russian society. Creation and analysis of virtual population. *Artificial Societies*, 15, 4. DOI: 10.18254/S207751800012620-1. Available at: <https://arxiv.gaugn.ru/s207751800012620-1-1/> (in Russian).]
- Хачатрян Н.К., Кузнецова О.И.** (2018). Компьютерное моделирование вариантов распределения инновационной активности по регионам России // *Вестник ЦЭМИ*. Т. 1. № 1. DOI: 10.33276/S0000105-8-1. Режим доступа: <https://cemi.jes.su/s11111110000105-8-1/> [**Khachatryan N.K., Kuznetsova O.I.** (2020). Computer modelling of options of distribution of innovative activity on regions of Russia. *Vestnik CEMI, RAS*, 1, 1. DOI: 10.33276/S0000105-8-1. Available at: <https://cemi.jes.su/s11111110000105-8-1/> (in Russian).]
- Хачатрян Н.К., Кузнецова О.И.** (2020б). Компьютерное моделирование вариантов пространственного развития научно-технологической сферы в Российской Федерации // *Экономика и математические методы*. Т. 56. № 3. С. 45–55. [**Khachatryan N.K., Kuznetsova O.I.** (2020). Computer modelling of options of spatial development of scientific and technological sphere in the Russian Federation. *Economics and Mathematical Methods*, 56, 3, 45–55 (in Russian).]
- Clements A.J., Fadai N.T.** (2022). Agent-based modelling of sports riots. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 597. DOI: 10.1136/bjssports-2017-098871. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.physa.2022.127279>

- Hulme A., Thompson J., Nielsen R.O., Read G.J.M., Salmon P.M.** (2019). Towards a complex systems approach in sports injury research: Simulating running-related injury development with agent-based modelling. *British Journal of Sports Medicine*, 53 (9). DOI: 10.1177/1046878120914336. Available at: <https://bjsm.bmj.com/content/53/9/560>
- Platas-López A., Guerra-Hernández A., Grimaldo F.** (2021). On the macroeconomic effect of extortion: An agent-based approach. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 24 (1), 3. DOI: 10.18564/jasss.4496. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/24/1/3.html>
- Rosenbusch H., Röttger J., Rosenbusch D.** (2020). Would Chuck Norris certainly win the hunger games? Simulating the result reliability of battle Royale games through agent-based models. *Simulation & Gaming*, 51 (4). DOI: 10.1177/1046878120914336. Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1046878120914336>
- Takacs K., Squazzoni F.** (2015). High standards enhance inequality in idealized labor markets. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 18 (4), 2. DOI: 10.18564/jasss.2940. Available at: <https://www.jasss.org/18/4/2.html>
- Wang Y., Zhang Qi, Sannigrahi S., Qirui Li, Tao S., Bilborrow R., Li J., Song C.** (2021). Understanding the effects of China's agro-environmental policies on Rural Households' Labor and Land allocation with a spatially explicit agent-based model. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 24 (3), 7. DOI: 10.18564/jasss.4589. Available at: <https://www.jasss.org/24/3/7.html>

Agent-based model “Intellectual Russia”: Model construction and initial population analysis

© 2022 A.A. Akinshin, O.I. Kuznetsova, N.K. Khachatryan, S.V. Borisova

A.A. Akinshin,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences; Moscow; Russia;
e-mail: aaa@cemi-ras.ru

O.I. Kuznetsova,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences; Moscow; Russia;
e-mail: olgaku1992@bk.ru

N.K. Khachatryan,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences; Moscow; Russia;
e-mail: nerses@cemi.rssi.ru; nerses-khachatryan@yandex.ru

S.V. Borisova,

Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences; Moscow; Russia;
e-mail: boriss@cemi.rssi.ru

Received 30.03.2022

The reported study was funded by Russian Foundation for Basic Research (project no. 20-010-00339).

Abstract. In recent years forecasting with agent-based modeling has become very popular. This is due to a significant increase in computing power and as a result the possibility of conducting a large number of experiments. Agent-based modeling is based on the creation of decentralized agents and the study of their behavior which determines the behavior of the entire system as a whole. This article describes the developing of agent-based model, including information about the creation of initial population of human agents (that simulates the Russian regions' population) and algorithms of their actions (that form the basis for their autonomous behavior). Each human agent of the initial population gets his own individual characteristics including the level of satisfaction and the level of labor potential. All Russian regions are characterized by aggregate indicators of human agents living in its territory, as well as a number of permanent exogenous indicators. The algorithms of action described in this article should determine internal migration processes and the structure of employees by type of economic activity. This will allow predicting the level of labor potential of employees in each industry in the region. The model creates the initial population of human agents using official statistical data and also form the aggregated data on characteristics of regions and industries, that are analyzed and visualized in the article.

Keywords: agent-based model, forecasting, Russian regions, industries, level of labor potential, level of satisfaction, computer experiments.

JEL Classification: C53, C80, J21.

For reference: **Akinshin A.A., Kuznetsova O.I., Khachatryan N.K., Borisova S.V.** (2022). Agent-based model “Intellectual Russia”: Model construction and initial population analysis. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 3, 79–93. DOI: 10.31857/S042473880021777-3