
ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей

© 2020 г. В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Г.Л. Бекларян, А.С. Акопов,
Е.А. Ровенская, Н.В. Стрелковский

В.Л. Макаров,

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

А.Р. Бахтизин,

ЦЭМИ, Москва; e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

Г.Л. Бекларян,

ЦЭМИ, Москва; e-mail: glbeklaryan@gmail.com

А.С. Акопов,

ЦЭМИ, Москва; e-mail: akopovas@mail.ru

Е.А. Ровенская,

IIASA, Австрия; МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: rovenska@iiasa.ac.at

Н.В. Стрелковский,

IIASA, Австрия; e-mail: strelkon@iiasa.ac.at

Поступила в редакцию 19.03.2020

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-51-14010 АНФ_а).

Аннотация. В данной статье представлен новый агент-ориентированный подход к моделированию миграционных и демографических процессов на основе компьютерной имитации популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей, реализующих различные стратегии принятия решений. Предлагаемый в статье подход основан на известной модели взаимодействия «кочевников» и «землепашцев» и ориентирован на исследование поведения сообществ с более сложными паттернами поведения, чем в оригинальной модели: коренного населения и мигрантов, — а также их влияния на социально-экономическую и экологическую системы. При этом члены обоих сообществ, т.е. агенты-мигранты (условные «кочевники») и агенты—коренные жители (условные «землепашцы»), воспроизводят ресурсы (рабочие места), необходимые для повышения уровня личного благосостояния и реализации возможностей вступления в брак и рождения детей. Агенты-мигранты создают ресурсы с наименьшим уровнем отдачи — «низкотехнологичные» рабочие места, а агенты—коренные жители воспроизводят «высокотехнологичные» рабочие места, обеспечивающие больший вклад в уровень личного благосостояния и экономический рост в целом. Общее число подобных рабочих мест ограничено пространственными и демографическими характеристиками системы. В предложенной модели учитывается влияние множества параметров, в частности продолжительность жизни, доля новых мигрантов от иммигрировавших ранее, минимальные уровни личного благосостояния и другие важные характеристики, отражающие особенности поведения членов исследуемых сообществ. При этом изучается влияние подобных параметров на миграционные и демографические процессы и связанные с ними макроэкономические и экологические характеристики.

Ключевые слова: агентное моделирование миграционных, агентное моделирование демографических процессов, миграционная политика, поведенческая экономика, AnyLogic.

Классификация JEL: C02, C63, F22, J11, J61.

DOI: 10.31857/S042473880009217-7

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуализируется задача исследования миграционных и демографических процессов, динамика которых во многом обусловлена сложившимися моделями (паттернами) поведения членов соответствующих сообществ. Так, например, наблюдается устойчивое снижение темпов рождаемости в экономически развитых странах Европейского союза. Если еще в 1950-е годы у каждой женщины за ее жизнь рождалось в среднем 4,7 ребенка, то, по данным на 2018 г.¹, во многих странах ЕС (например, в Австрии, Венгрии, Испании, Италии, Польше, Португалии, Финляндии и др.) суммарный коэффициент рождаемости не превышает 1,5. Также наблюдаются дальнейшее увеличение средней продолжительности жизни, старение населения и др., оказывающие сдерживающее влияние на темпы воспроизводства популяции. При этом мигранты характеризуются существенно более высоким (на 62% и более) уровнем фертильности по сравнению с коренным населением (Stonawski et al., 2016). Подобная динамика в долгосрочной перспективе не только влияет на этнический состав соответствующих стран, но может привести к кардинальной перестройке соответствующих социально-экономических и экологических систем. В связи с существенной дифференциацией в паттернах поведения мигрантов и коренного населения, в частности, из-за превалирования среди представителей первого сообщества (мигрантов) более простой формы участия в экономической деятельности страны (например, получение пособий, ориентация на рабочие места, требующие меньшего уровня квалификации и знания языка) могут возникать риски деградации социально-экономической и экологических систем. Поэтому важно исследовать возможности государственной миграционной политики и интеграционных (адаптационных) процессов социально-экономической системы и демографии, определить условия целесообразности притока и ограничения использования внешней рабочей силы и др.

Подобные исследования могут быть выполнены с использованием методов агент-ориентированного моделирования (АОМ), позволяющих изучить динамику сложной децентрализованной системы, в которой алгоритм принятия решений каждого индивидуума задается с помощью простых правил, учитывающих характеристики внешней среды и возможности взаимодействия с другими членами популяции (например, через брак).

Среди наиболее важных работ, использующих АОМ для исследования развития человеческой популяции, следует выделить следующие: (Schelling, 1971; Epstein, Axtell, 1996; Heckbert, 2013; Акоров, Beklaryan, 2015; Белоусов, 2017; Макаров и др., 2019).

Первая работа (Schelling, 1971) посвящена исследованию процессов сегрегации, в ней объясняется феномен образования гетто в США в 1970-е годы, обусловленный стремлением каждого индивидуума выбирать места проживания с похожими на него людьми. В настоящее время подобное явление в большей степени характерно для мигрантов в силу существенных языковых, конфессиональных и этнических различий. Данная особенность отражена в моделях сегрегации с учетом миграции (Urselmans, 2018; Urselmans, Phelps, 2018).

Хорошо известна так называемая сахарная модель (Epstein, Axtell, 1996), в которой агенты перемещаются в двумерном пространстве в поиске ресурса — «сахара». Данная модель считается прообразом первого искусственного общества, описывающего конкуренцию за ресурс, она была адаптирована для решения различных практических задач (в частности, выбора оптимальных местоположений ресторанов сети «Pizza Hut» в США²).

Одним из наиболее важных примеров применения АОМ для изучения развития сообществ с простейшей организационной структурой является модель «кочевников и землепашцев», описанная в работе (Белоусов, 2017). Данное исследование использует ранее предложенный подход, основанный на моделировании выживания популяций с учетом влияния внутривнутрипопуляционных факторов (Макаров и др., 2014). В модели условные землепашцы производят продукт, используя свои навыки, а условные кочевники ничего не производят, а только потребляют ресурс, который отбирают у других кочевников и землепашцев. При этом важной характеристикой агентов являются состояния «сыт» и «голоден», определяющие поведение агентов: «размножение» или «поиск ресурса». Таким образом, система принятия решений агентами задается на индивидуальном уровне с использованием простых правил, в зависимости от текущего состояния агента, наличия или отсутствия доступного ресурса и др.

¹ По данным Eurostat (<https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/ce94f8b9-7c23-430b-aa53-11b14a7bbba3?lang=en>).

² См. <http://www.cemi.rssi.ru/publication/e-publishing/makarov/text.pdf>

В другой работе (Макаров и др., 2019) представлена агент-ориентированная модель миграционных потоков стран Европейского союза, созданная на основе расширенной «гравитационной модели», в соответствии с которой индивидуальные решения агентов-мигрантов основываются на комплексной оценке социально-экономической, географической и прочей дифференциации рассматриваемых для миграции стран. При этом одни факторы притягивают мигрантов, а другие отталкивают. Во многих случаях мигрантов привлекают наиболее доступные ресурсы — рабочие места, не требующие высокой квалификации и свободного владения языком.

В области моделирования миграции большинство АОМ применяются для исследования причин возникновения миграции и ее механизмов, например (Suleimenova et al., 2017). Подробный обзор подобных моделей приводится в работе (Klabunde, Willekens, 2016). В последнее время было опубликовано несколько работ, изучающих влияние миграции на экономику принимающей страны, в частности на рынок труда, систему социального обеспечения (Marini et al., 2019a) и рынок жилья (Marini et al., 2019b).

Наряду с работой (Kaufmann et al., 2018) данная статья является пионерской в развитии теоретического аппарата для изучения влияния миграционных процессов на динамику рабочих мест в принимающей стране. Ее цель — исследование миграционных и демографических процессов на основе компьютерной имитации популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей, реализующих различные стратегии принятия решений. Основная задача состоит в определении условий, обеспечивающих устойчивое развитие соответствующих популяций, достижение позитивного эффекта от миграции для социально-экономической и экологических систем, в том числе за счет интеграционных и ассимиляционных механизмов, а также трансформации моделей поведения коренных жителей и мигрантов.

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Рассматривается социально-экономическая система, состоящая из двух взаимодействующих сообществ — мигрантов и коренных жителей. В отличие от ранее предложенной модели «кочевников» и «землепашцев» (Белоусов, 2017) агенты-мигранты и агенты—коренные жители характеризуются более сложными индивидуальными системами принятия решений, исключающими возможность ведения войн за ресурсы. Тем не менее так же, как в модели «кочевников» и «землепашцев», существование обоих сообществ моделируется в двумерном пространстве с фиксированной размерностью $dim \times dim$, которая ограничивает общее число агентов и используемых ими ресурсов. В отличие от «кочевников» агенты-мигранты воспроизводят ресурсы, но только те, которые относятся к условно низкотехнологичному типу, т.е. мигранты создают для себя рабочие места, не требующие высшего профессионального образования, свободного владения языком и др. При этом наличие подобных низкотехнологичных рабочих мест обеспечивает агентов-мигрантов ежегодным ростом уровня личного благосостояния, сопоставимым со значимостью условно высокотехнологичных рабочих мест у агентов—коренных жителей. Рост популяции агентов-мигрантов сопровождается увеличением числа низкотехнологичных рабочих мест и сокращением возможностей создания высокотехнологичных рабочих мест для агентов—коренных жителей. При этом вклад низкотехнологичных и высокотехнологичных рабочих мест в темпы экономического роста (суммарный объем выпуска продукции) и экологические характеристики среды обитания (объемы вредных выбросов) существенно различаются. Производительность труда (соотношение выпуска к используемым трудовым ресурсам) в высокотехнологичных отраслях экономики существенно выше, а объемы вредных выбросов ниже, чем на предприятиях, основанных на использовании преимущественно низкоквалифицированных трудовых ресурсов. Данное обстоятельство может нивелировать положительный эффект от увеличения числа мигрантов.

Важной характеристикой предлагаемой модели является встроенный механизм трансформации агента-мигранта в агента—коренного жителя, обусловленный процессами интеграции и ассимиляции, занимающими, как правило, несколько лет. Таким образом, в отличие от модели кочевников-землепашцев рассматриваемая система является открытой, т.е. имеет место постоянный приток новых агентов-мигрантов из внешней среды с их последующей ассимиляцией и трансформацией в агентов—коренных жителей. Темпы притока мигрантов задаются с учетом механизма усиливающей обратной связи, обусловленной «гравитационным эффектом» (Макаров и др., 2019; Акопов, 2015), т.е. чем больше мигрантов прибыло в страну ранее и осталось неассимилированным, тем больше новых мигрантов прибывает в текущий момент времени (рис. 1).

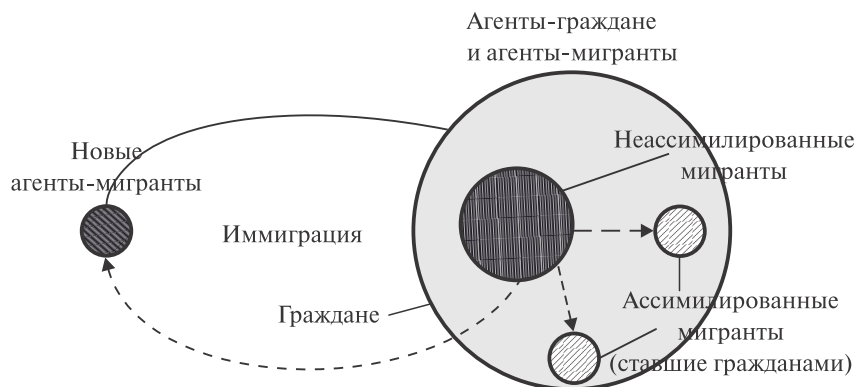


Рис. 1. Схема привлечения новых агентов-мигрантов и их интеграции в общую популяцию

Другой важной особенностью модели является механизм поиска ресурса (рабочего места) или партнера (для создания семьи и рождения детей). В частности, используется подход, основанный на последовательной оценке соседних ячеек, характеризующих состояние внешней среды (например, наличие или отсутствие рабочих мест) («Мурово соседство») в двумерном дискретном пространстве размещения агентов (рис. 2).

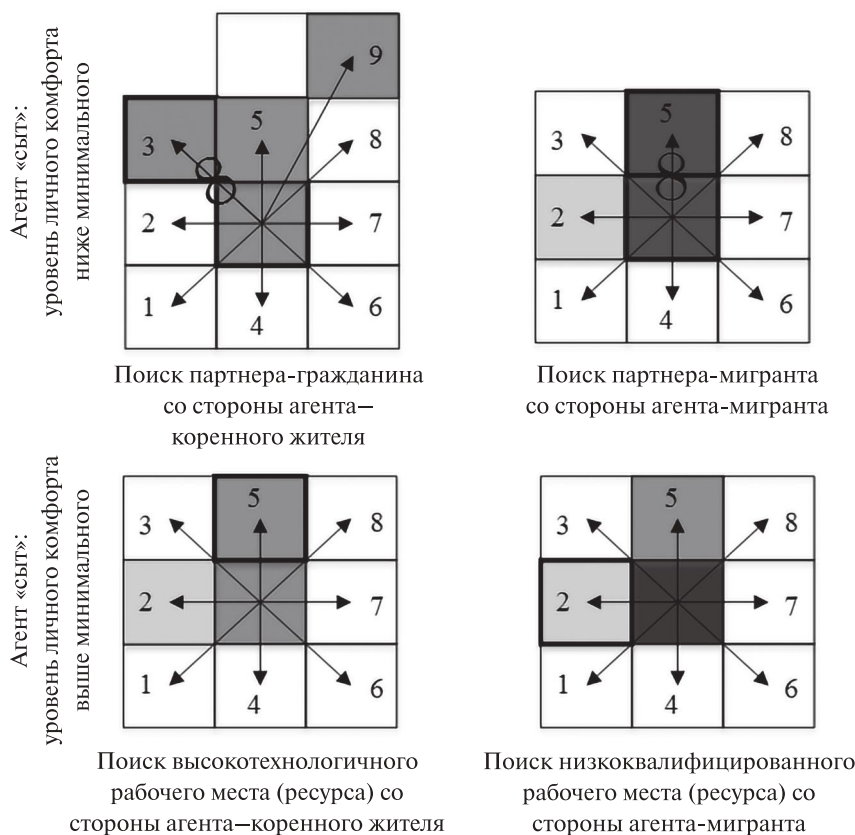


Рис. 2. Поиск ресурса или партнера со стороны агента

В модели для каждого агента задаются два основных состояния: 1) агент «сыт» — уровень личного благосостояния выше минимального; 2) агент «голоден» — уровень личного благосостояния ниже минимального.

В состоянии условной сытости агент ищет себе партнера. При этом у агентов—коренных жителей имеется некоторое преимущество, в том смысле, что поиск осуществляется не только среди соседних агентов, но также среди любых других удаленных членов данной популяции с ограниченным числом попыток в течение года. Предполагается, что агенты—коренные жители имеют более широкий набор потенциальных партнеров в результате сложившихся социальных связей (например, общая школа, институт, язык, культура и т.д.). В отличие от коренного населения агенты-мигранты осуществляют поиск потенциально-го партнера только среди ближайших соседей (см. рис. 2) из-за естественного дефицита социальных связей. При нахождении партнера, соответствующего заданным требованиям (пол, возраст, принадлежность к данному сообществу и др.), между агентами возникает устойчивая связь в форме брака (см. рис. 2).

В состоянии условного голода агенты осуществляют итерационный поиск близлежащих ресурсов. Агенты—коренные жители стремятся занимать высокотехнологичные рабочие места, а агенты-мигранты — низкотехнологичные соответственно. Агенты-мигранты могут временно занимать высокотехнологичные рабочие места и, наоборот, агенты—коренные жители могут занимать низкотехнологичные рабочие места, не являющиеся для них целевыми. При этом уровень отдачи (т.е. совокупная ценность, включающая как заработную плату, так и социальную удовлетворенность) подобных рабочих мест для агентов—коренных жителей является существенно меньшим, чем для агентов-мигрантов.

Оба типа агентов могут находиться в *стационарном (т.е. неподвижном) состоянии*, если, например, они уже состоят в браке или уровень их личного благосостояния выше минимального (т.е. агенты не нуждаются в работе). Также в стационарном состоянии остаются агенты, которые по тем или иным причинам не могут искать работу или партнера для создания семьи (например, из-за нерелевантного, слишком раннего или преклонного, возраста).

Другими возможными состояниями агентов являются:

- *готовность к рождению детей* (при наличии партнера и достаточном уровне личного благосостояния);
- *рождение ребенка*, при котором осуществляется воспроизводство популяции (с определенной вероятностью);
- *ассимиляция* (только для агентов-мигрантов), при которой осуществляется трансформация агента-мигранта в агента—коренного жителя с изменением численности соответствующих популяций;
- *естественная смерть* агента.

Переходы между указанными выше состояниями осуществляются на основе простых правил, реализуемых на индивидуальном уровне каждым агентом. В зависимости от текущего состояния агент либо неподвижен, либо перемещается по ячейкам дискретного пространства. Каждая подобная ячейка может находиться в одном из нескольких состояний:

- быть полностью свободной (от агентов и ресурсов);
- содержать высокотехнологичное рабочее место, привлекательное для агентов—коренных жителей, и быть при этом незанятой;
- содержать низкотехнологичное рабочее место, привлекательное для агентов-мигрантов, и быть при этом незанятой;
- содержать рабочее место и быть занятой некоторым агентом. В этом случае, как правило, реализуется положительный вклад в экономический рост с учетом производительности труда, характерной для соответствующего ресурса;
- не содержать рабочего места и быть занятым некоторым агентом. В этом случае, как правило, реализуется отрицательный вклад в экономический рост, так как соответствующий агент с высокой долей вероятности будет являться безработным и получать пособие.

Таким образом, если какой-либо агент занимает свободную от ресурсов клетку, уровень его личного благосостояния понижается (т.е. агент расходует имеющийся накопленный ресурс либо на поиск партнера, либо на поиск новой работы). И наоборот, если агент занимает ячейку, содержащую рабочее место, уровень личного благосостояния агента повышается (до некоторого предельного значения). У всех рабочих мест имеется некоторый срок жизни, после которого ресурс самоуничтожается и агент вынужден искать новое рабочее место.

Перейдем к краткому формальному описанию данной модели.

T — набор временных моментов (по годам), $|T|$ — общее число временных моментов; $t_0 \in T$, $t_{|T|} \in T$ — начальные и конечные моменты времени, $t_k \in T$, $k=0, \dots, |T|$, — все индексы моментов времени; $I=\{1, \dots, |I|\}$ — набор индексов агентов-коренных жителей, $|I|$ — общее число агентов-коренных жителей; $\tilde{I}=\{1, \dots, |\tilde{I}|\}$ — набор индексов агентов-мигрантов (переселенцев), $|\tilde{I}|$ — общее число агентов-мигрантов.

$s_i(t_k) \in \{0, \dots, 5\}$ — возможные состояния агента-коренного жителя i ($i \in I$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) (1 — статичное (неподвижное) состояние, 2 — состояние поиска рабочего места (высокотехнологического ресурса), 3 — состояние поиска партнера (для создания семьи), 4 — состояние готовности к рождению детей (при наличии партнера и достаточном уровне благосостояния), 5 — состояние рождения ребенка, 0 — уничтожение агента (по естественным причинам)).

$\tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) \in \{0, \dots, 6\}$ — возможные состояния агента-мигранта $\tilde{i}$ ($\tilde{i} \in \tilde{I}$) в момент времени t_k ($t_k \in T$) (1 — статичное (неподвижное) состояние, 2 — состояние поиска рабочего места (низкотехнологического ресурса), 3 — состояние поиска партнера, 4 — состояние готовности к рождению детей, 5 — состояние рождения ребенка, 6 — состояние полной ассимиляции и трансформации в агента-коренного жителя, 0 — уничтожение агента).

$\{c_i(t_k), \tilde{c}_{\tilde{i}}(t_k)\}$ — уровни личного благосостояния агента-коренного жителя i и агента-мигранта $\tilde{i}$ в момент времени t_k ($t_k \in T$); $\{\underline{c}_i, \underline{\tilde{c}}_{\tilde{i}}\}$ — минимально необходимые уровни личного благосостояния агента-коренного жителя i и агента-мигранта $\tilde{i}$, при которых они могут не находиться в поиске работы, вступать в брак, рожать детей и др.; $\{\bar{c}_i, \bar{\tilde{c}}_{\tilde{i}}\}$ — максимально возможные уровни личного благосостояния агента-коренного жителя i и агента-мигранта $\tilde{i}$.

$\{a_i(t_k), \tilde{a}_{\tilde{i}}(t_k)\}$ — возраст агентов i и $\tilde{i}$ в момент времени t_k ($t_k \in T$); $\{\underline{a}_i^*, \underline{\tilde{a}}_{\tilde{i}}^*\}$ — минимальный возраст агентов i и $\tilde{i}$, при котором они начинают искать работу; $\{\bar{a}_i^*, \bar{\tilde{a}}_{\tilde{i}}^*\}$ — пенсионный возраст агентов i и $\tilde{i}$ (не превышающий среднюю продолжительность жизни); $\{\underline{a}_i, \underline{\tilde{a}}_{\tilde{i}}\}$ — минимальный возраст агентов i и $\tilde{i}$, при котором они вступают в брак и рожают детей; $\{\bar{a}_i, \bar{\tilde{a}}_{\tilde{i}}\}$ — максимальный возраст агентов i и $\tilde{i}$, при котором они прекращают вступать в брак и рожать детей; $\{a_i, \tilde{a}_{\tilde{i}}\}$ — средняя продолжительность жизни агентов i и $\tilde{i}$.

$m_i(t_k), \tilde{m}_{\tilde{i}}(t_k) \in \{0, 1\}$ — признак того, что агенты i и $\tilde{i}$ состоят в браке в момент времени t_k ($t_k \in T$) (0 — не состоит в браке, 1 — состоит).

$\{l_i(t_k), \tilde{l}_{\tilde{i}}(t_k)\}$ — вероятности того, что агенты i и $\tilde{i}$ не будут заводить ребенка в момент времени t_k ($t_k \in T$):

$$l_i(t_k) = \exp\{o_i^{\gamma}(t_k) a_i^{\lambda}(t_k)\}, \quad (1)$$

$$\tilde{l}_{\tilde{i}}(t_k) = \exp\{\tilde{o}_{\tilde{i}}^{\tilde{\gamma}}(t_k) \tilde{a}_{\tilde{i}}^{\tilde{\lambda}}(t_k)\}, \quad (2)$$

где $\{o_i(t_k), \tilde{o}_{\tilde{i}}(t_k)\}$ — число детей у агентов i и $\tilde{i}$ к моменту времени t_k ; $\{\gamma_i, \tilde{\gamma}_{\tilde{i}}\}$, $\{\lambda_i, \tilde{\lambda}_{\tilde{i}}\}$ — коэффициенты значимости числа имеющих детей и возраста агента при принятии решения о рождении нового ребенка: $\gamma_i + \lambda_i = 1$, $\tilde{\gamma}_{\tilde{i}} + \tilde{\lambda}_{\tilde{i}} = 1$.

$h(0, 1)$ — случайная величина, равномерно распределенная на отрезке $[0, 1]$; $\tilde{\tau}_{\tilde{i}}(t_k)$ — время, прошедшее с момента въезда в страну (иммиграции) агента-мигранта $\tilde{i}$ к моменту времени t_k .

С учетом выше представленных обозначений правила перехода к новым состояниям для агентов i и $\tilde{i}$ в момент времени t_k будут следующими:

$$s_i(t_k) = \begin{cases} 0, & \text{если } a_i(t_{k-1}) > a_i, \\ 1, & \text{если выполняется условие I,} \\ 2, & \text{если выполняется условие II,} \\ 3, & \text{если выполняется условие III,} \\ 4, & \text{если выполняется условие IV,} \\ 5, & \text{если выполняется условие V;} \end{cases} \quad (3)$$

$$\tilde{s}_i(t_k) = \begin{cases} 0, & \text{если } \tilde{a}_i(t_{k-1}) > \tilde{a}_i, \\ 1, & \text{если выполняется условие VI,} \\ 2, & \text{если выполняется условие VII,} \\ 3, & \text{если выполняется условие VIII,} \\ 4, & \text{если выполняется условие IX,} \\ 5, & \text{если выполняется условие X,} \\ 6, & \text{если } t_{k-1} > \tilde{t}_i(t_{k-1}). \end{cases} \quad (4)$$

Условие I. $(s_i(t_{k-1})=2 \text{ и } c_i(t_k) \geq \underline{c}_i)$ или $(s_i(t_{k-1}) \in \{3, 4, 5\} \text{ и } a_i(t_k) \geq \bar{a}_i)$ — агент—коренной житель занял рабочее место на предыдущем шаге и уровень его благосостояния выше минимального либо агент достиг пенсионного возраста.

Условие II. $(s_i(t_{k-1})=1 \text{ и } c_i(t_k) < \underline{c}_i \text{ и } \underline{a}_i^* \leq a_i(t_k) \leq \bar{a}_i^*)$ — уровень благосостояния агента—коренного жителя, не занимающего рабочее место и находящегося в трудоспособном возрасте, падает ниже минимального или $(s_i(t_{k-1}) \in \{4, 5\} \text{ и } c_i(t_k) < \underline{c}_i \text{ и } \underline{a}_i^* \leq a_i(t_k) \leq \bar{a}_i^*)$.

Условие III. $s_i(t_{k-1})=1 \text{ и } c_i(t_k) \geq \underline{c}_i \text{ и } \underline{a}_i \leq a_i(t_k) \leq \bar{a}_i \text{ и } m_i(t_k)=0$ — агент—коренной житель находится в статичном положении и детородном возрасте, уровень его благосостояния выше минимального, и агент не состоит в браке.

Условие IV. $s_i(t_{k-1}) \in \{1, 3\} \text{ и } c_i(t_k) \geq \underline{c}_i \text{ и } \underline{a}_i \leq a_i(t_k) \leq \bar{a}_i \text{ и } m_i(t_k)=1$ — агент—коренной житель состоит в браке, находится в детородном возрасте, и уровень его благосостояния выше минимального.

Условие V. $s_i(t_{k-1})=4 \text{ и } h(0, 1) > l_i(t_k)$ — агент—коренной житель готов к рождению детей, и значение случайной величины h превышает значение вероятности того, что агент не будет заводить детей в данный момент времени.

Условие VI. $(\tilde{s}_i(t_{k-1})=2 \text{ и } \tilde{c}_i(t_k) \geq \underline{\tilde{c}}_i)$ или $(\tilde{s}_i(t_{k-1}) \in \{3, 4, 5\} \text{ и } \tilde{a}_i(t_k) \geq \bar{\tilde{a}}_i)$ — агент-переселенец занял рабочее место на предыдущем шаге, и уровень его благосостояния выше минимального либо агент достиг пенсионного возраста.

Условие VII. $(\tilde{s}_i(t_{k-1})=1 \text{ и } \tilde{c}_i(t_k) < \underline{\tilde{c}}_i \text{ и } \underline{\tilde{a}}_i^* \leq \tilde{a}_i(t_k) \leq \bar{\tilde{a}}_i^*)$ — уровень благосостояния агента-переселенца, не занимающего рабочего места и находящегося в трудоспособном возрасте, падает ниже минимального или $(\tilde{s}_i(t_{k-1}) \in \{4, 5\} \text{ и } \tilde{c}_i(t_k) < \underline{\tilde{c}}_i \text{ и } \underline{\tilde{a}}_i^* \leq \tilde{a}_i(t_k) \leq \bar{\tilde{a}}_i^*)$.

Условие VIII. $\tilde{s}_i(t_{k-1})=1 \text{ и } \tilde{c}_i(t_k) \geq \underline{\tilde{c}}_i \text{ и } \underline{\tilde{a}}_i \leq \tilde{a}_i(t_k) \leq \bar{\tilde{a}}_i \text{ и } \tilde{m}_i(t_k)=0$ — агент-переселенец находится в статичном положении и детородном возрасте, уровень его благосостояния выше минимального, и агент не состоит в браке.

Условие IX. $\tilde{s}_i(t_{k-1}) \in \{1, 3\} \text{ и } \tilde{c}_i(t_k) \geq \underline{\tilde{c}}_i \text{ и } \underline{\tilde{a}}_i \leq \tilde{a}_i(t_k) \leq \bar{\tilde{a}}_i \text{ и } \tilde{m}_i(t_k)=1$ — агент-переселенец состоит в браке, находится в детородном возрасте, и уровень его благосостояния выше минимального.

Условие X. $\tilde{s}_i(t_{k-1})=4 \text{ и } h(0, 1) > \tilde{l}_i(t_k)$ — агент-переселенец готов к рождению детей, и значение случайной величины h превышает значение вероятности того, что агент не будет заводить детей в данный момент времени.

Новорожденные агенты помещаются в произвольную свободную ячейку пространства, добавляются в соответствующие популяции (агентов—коренных жителей или агентов-переселенцев) и пребывают в статичном положении до достижения трудоспособного возраста.

Агенты—коренные жители и агенты-мигранты также создают рядом с собой одно рабочее место (высоко- и низкотехнологичное соответственно) в каждый момент времени независимо от своего состояния и других произведенных действий. Данный механизм отражает создание различных социально-экономических ниш различными типами агентов (Kaaronen, Strelkovskii, 2020).

Общая численность агентов—коренных жителей (с учетом ранее ассимилированных мигрантов) $(P(t_k))$ и агентов-мигрантов $(\tilde{P}(t_k))$ в момент времени t_k :

$$P(t_k) = \sum_{i=1}^{|I|} d_i(t_k) + \sum_{i=1}^{|I|} \tilde{d}_i^*(t_k), \quad (5)$$

$$\tilde{P}(t_k) = \sum_{\tilde{i}=1}^{|\tilde{I}|} \tilde{d}_{\tilde{i}}(t_k), \quad (6)$$

где агенты—коренные жители учитываются по формуле

$$d_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_i(t_k) \neq 0, \\ 0, & \text{если } s_i(t_k) = 0; \end{cases}$$

ассимилировавшиеся в данный момент времени агенты-переселенцы —

$$\tilde{d}_{\tilde{i}}^*(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) = 6, \\ 0, & \text{если } \tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) \neq 6; \end{cases}$$

неассимилировавшиеся агенты-переселенцы

$$\tilde{d}_{\tilde{i}}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) \notin \{0, 6\}, \\ 0, & \text{если } \tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) \in \{0, 6\}. \end{cases}$$

Пусть $\mathbf{H}$ — множество ячеек (дискретного пространства), содержащих высокотехнологичные ресурсы, на которые ориентированы агенты—коренные жители; $\mathbf{L}$ — множество ячеек, содержащих низкотехнологичные ресурсы (рабочие места), на которые ориентированы агенты-мигранты; $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$, $\{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\}$ — координаты (строка и столбец) агента—коренного жителя i и агента-мигранта $\tilde{i}$ в момент времени t_k ; $\{\delta c_i, \delta \tilde{c}_{\tilde{i}}\}$ — изменение значений уровней личного благосостояния агентов i и $\tilde{i}$ при наличии/отсутствии у них релевантных рабочих мест.

Уровни личного благосостояния агента—коренного жителя $(c_i(t_k))$ и агента-мигранта $(\tilde{c}_{\tilde{i}}(t_k))$ в момент времени t_k :

$$c_i(t_k) = \begin{cases} c_i(t_{k-1}) + \delta c_i, & \text{если } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \in \mathbf{H} \text{ и } c_i(t_{k-1}) + \delta c_i \leq \bar{c}_i, \\ c_i(t_{k-1}) - \delta c_i, & \text{если } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \notin \mathbf{H} \text{ и } c_i(t_{k-1}) - \delta c_i \geq 0, \\ c_i(t_{k-1}), & \text{если выполняется XI,} \end{cases} \quad (7)$$

т.е. благосостояние агентов—коренных жителей, занимающих высокотехнологичное рабочее место в данный момент времени, увеличивается на величину δc_i , если при этом оно не превысит максимально возможный для агентов—коренных жителей уровень благосостояния $\bar{c}_i$ и благосостояние агентов—коренных жителей, не занимающих высокотехнологичное рабочее место в данный момент времени, уменьшается на величину δc_i , если при этом оно останется положительным. В случае если после изменения благосостояния его значение вышло бы за пределы допустимого диапазона $[0, \bar{c}_i]$, оно остается неизменным, что задается условием XI.

Условие XI. $(c_i(t_{k-1}) = \bar{c}_i \text{ и } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \in \mathbf{H})$ или $(c_i(t_{k-1}) = 0 \text{ и } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \notin \mathbf{H})$;

$$\tilde{c}_{\tilde{i}}(t_k) = \begin{cases} \tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) + \delta \tilde{c}_{\tilde{i}}, & \text{если } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \in \mathbf{L} \text{ и } \tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) + \delta \tilde{c}_{\tilde{i}} \leq \bar{\tilde{c}}_{\tilde{i}}, \\ \tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) - \delta \tilde{c}_{\tilde{i}}, & \text{если } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \notin \mathbf{L} \text{ и } \tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) - \delta \tilde{c}_{\tilde{i}} \geq 0, \\ \tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}), & \text{если выполняется XII,} \end{cases} \quad (8)$$

т.е. благосостояние агентов-переселенцев, занимающих низкотехнологичное рабочее место в данный момент времени, увеличивается на величину $\delta \tilde{c}_{\tilde{i}}$, если при этом оно не превысит максимально возможный для агентов—коренных жителей уровень благосостояния $\bar{\tilde{c}}_{\tilde{i}}$ и благосостояние агентов-переселенцев, не занимающих низкотехнологичное рабочее место в данный момент времени, уменьшается на величину $\delta \tilde{c}_{\tilde{i}}$, если при этом оно останется положительным. В случае если после изменения благосостояния его значение вышло бы за пределы допустимого диапазона $[0, \bar{\tilde{c}}_{\tilde{i}}]$, оно остается неизменным, что задается условием XII.

Условие XII. $(\tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = \bar{\tilde{c}}_{\tilde{i}} \text{ и } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \in \mathbf{L})$ или $(\tilde{c}_{\tilde{i}}(t_{k-1}) = 0 \text{ и } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \notin \mathbf{L})$,

число агентов, занимающих высокотехнологичные ресурсы $(G(t_k))$ и низкотехнологичные $(\tilde{G}(t_k))$ рабочие места в момент времени t_k :

$$G(t_k) = \sum_{i=1}^{|I|} g_i(t_k), \quad (9)$$

$$\tilde{G}(t_k) = \sum_{\tilde{i}=1}^{|\tilde{I}|} \tilde{g}_{\tilde{i}}(t_k), \quad (10)$$

где

$$g_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \in \mathbf{H}, \\ 0, & \text{если } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \notin \mathbf{H}, \end{cases} \quad \tilde{g}_{\tilde{i}}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \in \mathbf{L}, \\ 0, & \text{если } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \notin \mathbf{L}. \end{cases}$$

Для оценки динамики объема выпуска и вредных выбросов можно воспользоваться допущением о линейности производственной функции. С учетом вышеизложенного основные характеристики результативности рассматриваемой социально-экономической системы могут быть определены следующим образом.

Затраты на пенсионное обеспечение ($W(t_k)$) *и выплаты пособий по безработице* ($U(t_k)$) в момент времени t_k :

$$W(t_k) = \sum_{i=1}^{|I|} w r_i(t_k) + \sum_{\tilde{i}=1}^{|\tilde{I}|} \tilde{w} \tilde{r}_{\tilde{i}}(t_k), \quad (11)$$

$$U(t_k) = \sum_{i=1}^{|I|} \kappa u_i(t_k) + \sum_{\tilde{i}=1}^{|\tilde{I}|} \tilde{\kappa} \tilde{u}_{\tilde{i}}(t_k); \quad (12)$$

агенты—коренные жители, достигшие пенсионного возраста,

$$r_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } a_i(t_k) \geq \bar{a}_i^*, \\ 0, & \text{если } a_i(t_k) < \bar{a}_i^*; \end{cases}$$

агенты-переселенцы, достигшие пенсионного возраста,

$$\tilde{r}_{\tilde{i}}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{a}_{\tilde{i}}(t_k) \geq \bar{\tilde{a}}_{\tilde{i}}^*, \\ 0, & \text{если } \tilde{a}_{\tilde{i}}(t_k) < \bar{\tilde{a}}_{\tilde{i}}^*; \end{cases}$$

агенты—коренные жители, находящиеся в процессе поиска рабочего места,

$$u_i(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } s_i(t_k) = 2 \text{ и } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \in \mathbf{F}, \\ 0, & \text{если } s_i(t_k) \neq 2 \text{ или } \{x_i(t_k), y_i(t_k)\} \notin \mathbf{F}; \end{cases}$$

агенты-переселенцы, находящиеся в процессе поиска рабочего места,

$$\tilde{u}_{\tilde{i}}(t_k) = \begin{cases} 1, & \text{если } \tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) = 2 \text{ и } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \in \mathbf{F}, \\ 0, & \text{если } \tilde{s}_{\tilde{i}}(t_k) \neq 2 \text{ или } \{\tilde{x}_{\tilde{i}}(t_k), \tilde{y}_{\tilde{i}}(t_k)\} \notin \mathbf{F}, \end{cases}$$

где $\mathbf{F}$ — множество ячеек, свободных от ресурсов (не имеющих рабочих мест); $\{w, \tilde{w}\}$ — средний размер пенсии для агентов—коренных жителей и агентов-мигрантов, ранее занятых в высоко- и низкотехнологичных отраслях экономики соответственно; $\{\kappa, \tilde{\kappa}\}$ — средний размер пособий по безработице для агентов—коренных жителей и агентов-мигрантов соответственно.

Объем выпуска, создаваемого рабочими местами, занятыми агентами—коренными жителями и агентами-мигрантами в момент времени t_k :

$$V(t_k) = p \alpha G(t_k) + \tilde{p} \tilde{\alpha} \tilde{G}(t_k) - W(t_k) - U(t_k), \quad (13)$$

где $\{\alpha, \tilde{\alpha}\}$ — коэффициенты производственной отдачи (соотношение выпуска к используемым ресурсам) от высоко- и низкотехнологичных ресурсов соответственно, $\alpha \gg \tilde{\alpha}$; $\{p, \tilde{p}\}$ — средняя добавленная (т.е. за вычетом издержек) стоимость единицы продукции в высоко- и низкотехнологичных отраслях экономики соответственно, $p \gg \tilde{p}$.

Объемы вредных выбросов, производимых рабочими местами, занятыми агентами—коренными жителями и агентами-мигрантами, в момент времени t_k :

$$E(t_k) = \beta G(t_k) + \tilde{\beta} \tilde{G}(t_k), \quad (14)$$

где $\{\beta, \tilde{\beta}\}$ — коэффициенты экологической отдачи, отражающие уровень ежегодных вредных выбросов от высоко- и низкотехнологичных ресурсов соответственно, $\beta \ll \tilde{\beta}$.

Усредненные темпы роста выпуска (R_1) и вредных выбросов (R_2):

$$R_1 = \frac{1}{|T|} \sum_{t_k=t_0}^{|T|} V(t_k) / V(t_{k-1}), \quad (15)$$

$$R_2 = \frac{1}{|T|} \sum_{t_k=t_0}^{|T|} E(t_k) / E(t_{k-1}). \quad (16)$$

Предложенная модель популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей (1)–(16) была реализована в системе имитационного моделирования AnyLogic. Программная реализация правил перехода к новым состояниям для агентов—коренных жителей и агентов-мигрантов (3)–(4) была выполнена с использованием так называемых карт состояний (state charts), основанных на принципах хорошо известного метода конечных автоматов (рис. 3–4).

Как следует из рис. 3–4, наиболее важным отличием алгоритма поведения агента-мигранта от агента—коренного жителя является наличие состояния *Assimilation* ($\tilde{s}_i(t_k) = 6, \tilde{i} \in \tilde{I}$), при котором осуществляется трансформация агента-мигранта в агента—коренного жителя с сохранением всех его индивидуальных характеристик (например, пола, возраста и др.). При этом соответствующий агент удаляется из одной популяции и добавляется в другую. Остальные отличия в алгоритмах поведения агента—коренного жителя и агента-мигранта реализуются на уровне правил перехода к новым состояниям, например, агенты-мигранты, как правило, вступают в брак и заводят детей раньше по сравнению с коренными жителями.

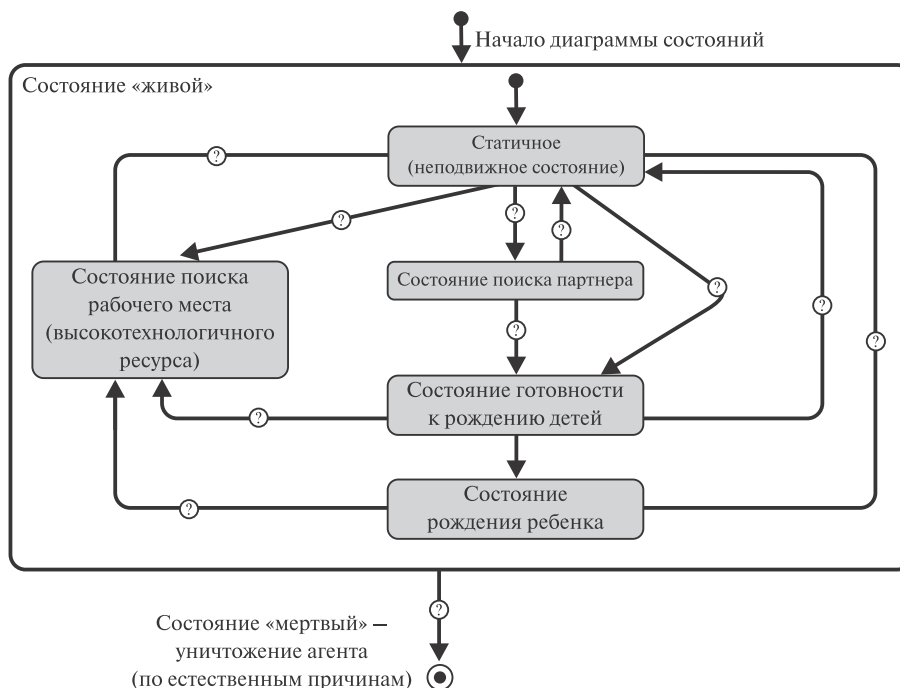


Рис. 3. Программная реализация алгоритма поведения агента—коренного жителя в AnyLogic

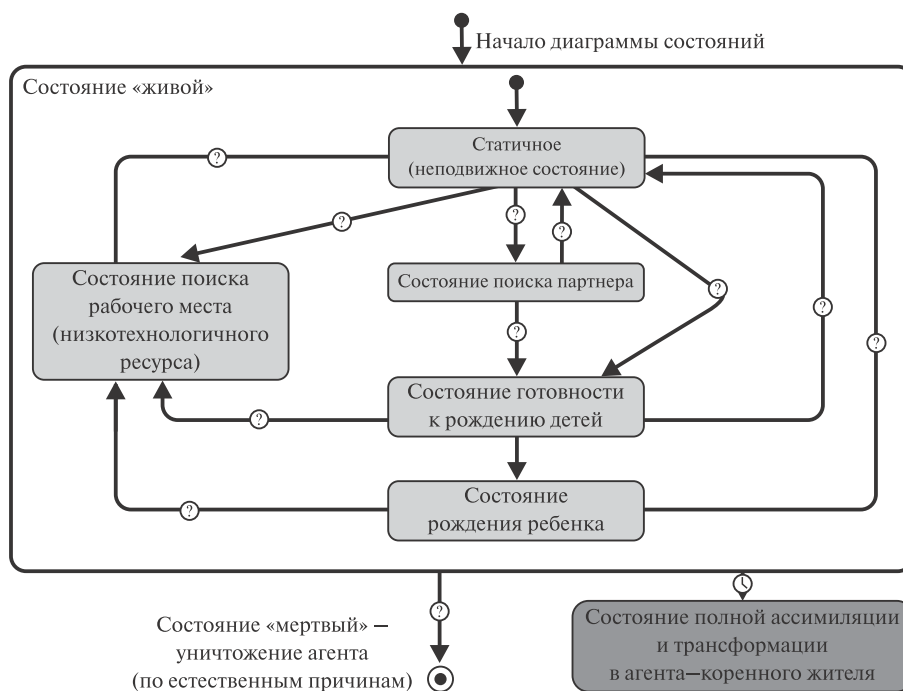


Рис. 4. Программная реализация алгоритма поведения агента-мигранта в AnyLogic

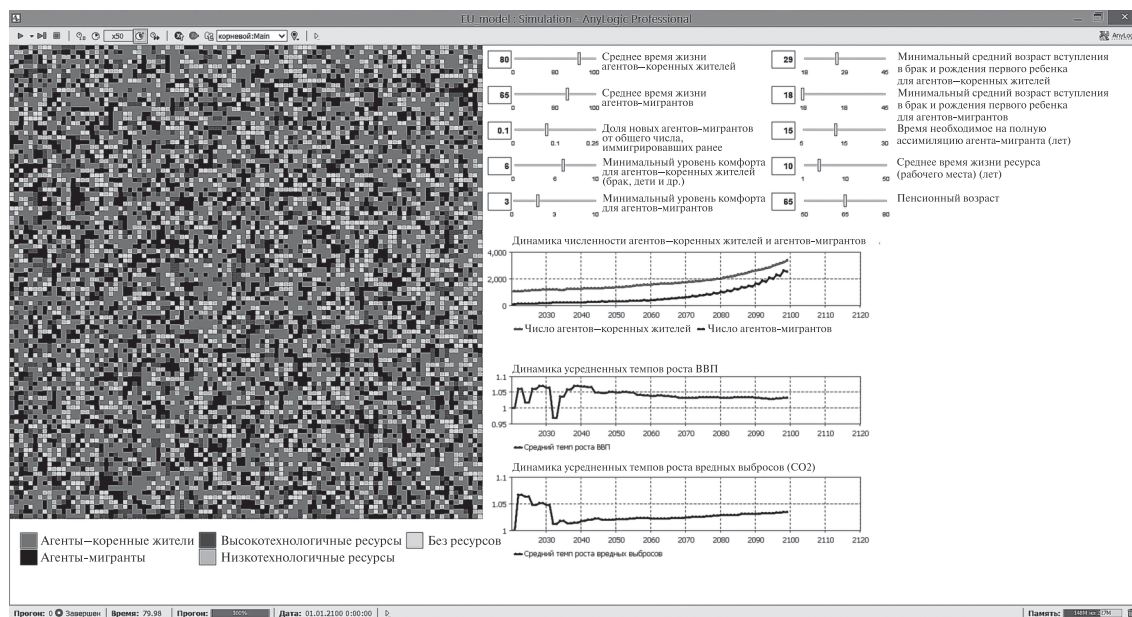


Рис. 5. Панель управления имитационной моделью в AnyLogic

Панель управления имитационной моделью представлена на рис. 5.

Как следует из рис. 5, разработанная имитационная модель позволяет исследовать популяционную динамику коренных жителей и мигрантов на горизонте стратегического планирования до 2100 г. с обеспечением возможности варьирования значениями множества управляющих параметров (таких как среднее время жизни агентов, доля новых агентов-мигрантов, минимальный уровень благосостояния и др.).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Далее с помощью разработанной модели (см. рис. 5) были исследованы некоторые сценарии развития популяций двух взаимодействующих искусственных сообществ: мигрантов и коренных жителей, в частности, следующие.

Сценарий 1. Относительно низкая доля (5% в год) новых агентов-мигрантов в общем числе иммигрировавших ранее, сохранение текущей модели поведения агентов—коренных жителей, ориентированных на позднее (с 29 лет) вступление в брак и рождение детей, с высоким минимально необходимым уровнем личного благосостояния (6 ед.).

Сценарий 2. Увеличение доли (до 10% в год) новых агентов-мигрантов в общем числе иммигрировавших ранее с сохранением сроков (15 лет), требуемых на ассимиляцию, а также изменение («улучшение») модели поведения агентов—коренных жителей с ориентацией на раннее (с 18 лет) вступление в брак и рождение детей, понижение минимально необходимого уровня личного благосостояния (с 6 до 3 ед.).

Сценарий 3. Существенное увеличение доли новых агентов-мигрантов (до 20% в год) в общем числе иммигрировавших ранее, «улучшение» модели поведения агентов—коренных жителей, а также сокращение времени на ассимиляцию мигрантов (с 15 до 5 лет).

Значения управляющих параметров модели для указанных выше сценариев, отражающие реалистичные варианты развития ситуации в развитых странах, представлены в таблице.

Таблица. Значения управляющих параметров модели

Параметр	Сценарий		
	1	2	3
Доля новых агентов-мигрантов в общем числе иммигрировавших ранее, % в год	5	10	20
Минимальный уровень благосостояния для агентов—коренных жителей (для брака, детей и др.), ед.	6	3	3
Минимальный уровень благосостояния для агентов-мигрантов, ед.	3	3	3
Минимальный средний возраст вступления в брак и рождения первого ребенка для агентов—коренных жителей, лет	29	18	18
Минимальный средний возраст вступления в брак и рождения первого ребенка для агентов-мигрантов, лет	18	18	18
Время, необходимое на полную ассимиляцию агента-мигранта, лет	15	15	5
Среднее время жизни ресурса (рабочего места), лет	10	10	10
Среднее время (продолжительность) жизни агентов—коренных жителей, лет	80	80	80
Среднее время жизни агентов-мигрантов, лет	65	65	65

Начальные численности популяций в модели: 1000 (агенты—коренные жители) и 100 (агенты-мигранты). Размерность дискретного пространства 100×100 ячеек. Исходное местоположение ресурсов задается случайным образом с наибольшей долей свободных ячеек (60%) и высокотехнологичных рабочих мест (30%). Возраст, пол и другие индивидуальные характеристики агентов задаются с использованием равномерных функций распределения, заданных на интервалах, охватывающих все слои населения. Результаты численных экспериментов показаны на рис. 6–8.

Из графиков на рис. 7 следует, что наиболее благоприятным для обеспечения высоких темпов экономического роста является сценарий 3, предполагающий существенное увеличение доли новых агентов-мигрантов (до 20% в год) в общем числе иммигрировавших ранее, улучшение модели поведения агентов—коренных жителей (в направлении снижения возраста вступления в брак и рождения детей), а также сокращение времени на полную ассимиляцию мигрантов (с 15 до 5 лет). Однако в реальных условиях подобный сценарий трудно реализовать. Доля мигрантов, перенимающих языковые, культурные и религиозные особенности принимающей страны, обычно невелика, что существенно затрудняет процессы их адаптации. Также известно (Alba et al., 2002), что только начиная с третьего поколения обеспечивается полная языковая ассимиляция. Поэтому более реалистичным является сценарий 2, характеризующийся увеличением доли новых агентов-мигрантов в общем числе иммигрировавших ранее (до 10% в год) с сохранением сроков, требуемых на ассимиляцию (15 лет). Подобный сценарий ведет к существенному росту размерности обеих популяций с одновременным значительным увеличением доли мигрантов в общей численности

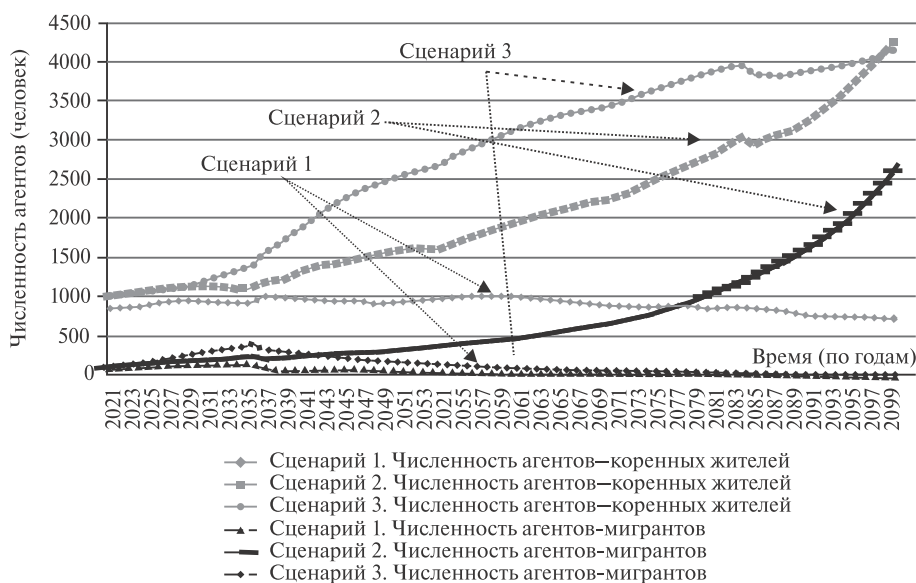


Рис. 6. Численность популяции агентов—коренных жителей и агентов-мигрантов

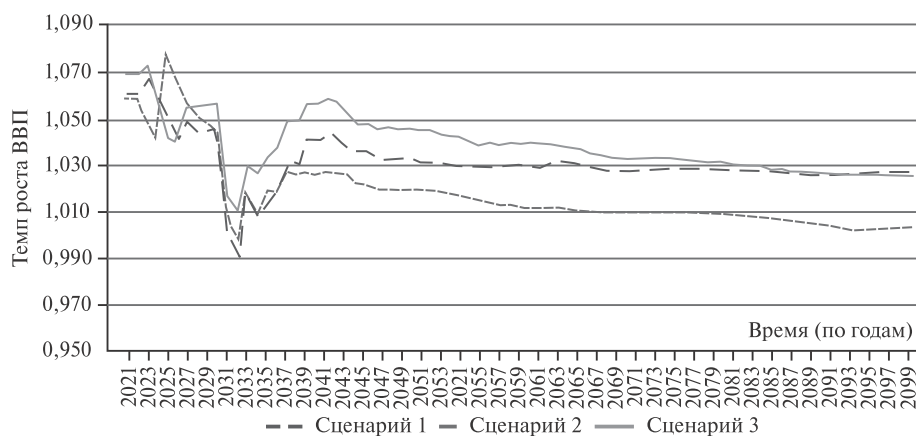


Рис. 7. Усредненный (по модельному времени) темп роста суммарного выпуска продукции

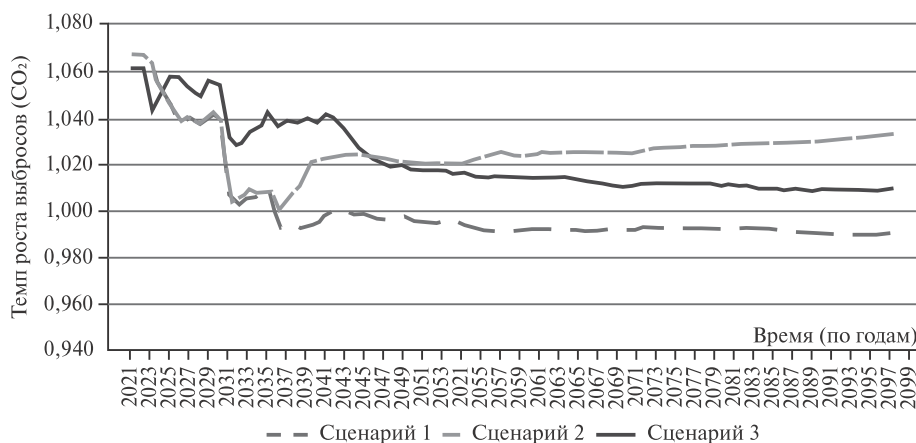


Рис. 8. Усредненный темп роста объемов вредных выбросов

населения (см. рис. 6). При этом увеличиваются темпы роста вредных выбросов (см. рис. 8). Для многих регионов и стран также весьма правдоподобным является сценарий 1, при котором наблюдается постепенное вырождение популяций агентов—коренных жителей и агентов-мигрантов (см. рис. 6) и ухудшение макроэкономических показателей (см. рис. 7).

Дальнейшим направлением исследований является учет сегрегационных процессов, обусловленных неравномерным распределением агентов-мигрантов и агентов—коренных жителей в пространстве их размещения (Urselmans, 2018; Urselmans, Phelps, 2018). Также большой интерес представляет исследование влияния социальных сетей на распределение агентов в пространстве и на их рабочие и социальные (семейные) связи (Simon, 2019).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акопов А.С.** (2015). Имитационное моделирование. Учебник и практикум. М.: ЮРАЙТ. [Akopov A.S. (2015). *Simulation modeling. Textbook and workshop*. Moscow: YURAJT (in Russian).]
- Белюсов Ф.А.** (2017). Модель сообществ с двумя способами воспроизводства продукта (модель «кочевников» и «землепашцев») // *Экономика и математические методы*. Т. 53. № 3. С. 93—109. [Belousov F.A. (2017). Model of civilization with two types of reproduction of product (model of nomads and plowmen). *Economics and Mathematical Methods*, 53 (3), 93—109 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бекларян Л.А., Белюсов Ф.А.** (2014). Установившиеся режимы в модели Хенинга и ее модификациях // *Машинное обучение и анализ данных*. Т. 10. № 1. С. 1385—1395. [Makarov V.L., Beklaryan L.A., Belousov F.A. (2014). Steady regimens in Henning model and its modifications. *Machine Learning and Data Analysis*, 10 (1), 1385—1395 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В.** (2019). 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., Akopov A.S., Beklaryan G.L., Rovenskaya E.A., Strelkovskiy N.V. (2019). Aggregated agent-based simulation model of migration flows of the European Union countries. *Economics and Mathematical Methods*, 55 (1), 3—15 (in Russian).]
- Akopov A.S., Beklaryan L.A.** (2015). An Agent model of crowd behavior in emergencies. *Automation and Remote Control*, 76 (10), 1817—1827.
- Alba R., Logan J., Lutz A., Stults B.** (2002). Only English by the third generation? Loss and preservation of the mother tongue among the grandchildren of contemporary immigrants. *Demography*, 39 (3), 467—484.
- Epstein J., Axtell R.** (1996). *Growing artificial societies: Social science from the bottom up*. Washington: Brookings Institution Press.
- Heckbert S.M.** (2013). An agent-based model of the ancient Maya social-ecological system. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 16 (4), 11. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/11.html>. DOI: 10.18564/jasss.2305
- Kaaronen R.O., Strelkovskii N.** (2020). Cultural evolution of sustainable behaviors: Pro-environmental tipping points in an agent-based model. *One Earth*, 2 (1), 85—97.
- Kaufmann L., Razakanirina R., Groen D., Chopard B.** (2018). Impact of immigrants on a multi-agent economical system. *PLoS ONE*, 13 (5), 1—16. DOI: 10.1371/journal.pone.0197509
- Klabunde A., Willekens F.** (2016). Decision-making in agent-based models of migration: State of the art and challenges. *European Journal of Population*, 32 (1), 73—97.
- Marini M., Chokani N., Abhari R.S.** (2019a). Agent-based model analysis of impact of immigration on Switzerland's social security. *Journal of International Migration and Integration*, 20 (3), 787—808.
- Marini M., Chokani N., Abhari R.S.** (2019b). Immigration and future housing needs in Switzerland: Agent-based modelling of agglomeration Lausanne. *Computers, Environment and Urban Systems*, 78 (101400), 1—15.
- Schelling T.C.** (1971). Dynamic models of segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1 (2), 143—186, 1971.
- Simon M.** (2019). Path dependency and adaptation: The effects of policy on migration systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 22 (2), 2. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/22/2/2.html>. DOI: 10.18564/jasss.39
- Stonawski M., Potančoková M., Skirbekk V.** (2016). Fertility patterns of native and migrant Muslims in Europe. *Population, Space and Place*, 22 (6), 552—567.
- Suleimenova D., Bell D., Groen D.** (2017). A generalized simulation development approach for predicting refugee destinations. *Scientific Reports*, 7 (13377), 1—13.
- Urselmans L.** (2018). A Schelling Model with Immigration Dynamics. In: P.R. Lewis, C.J. Headleand, S. Battle, P.D. Ritsos (eds.). *Artificial Life and Intelligent Agents*, 3—15. Springer International Publishing.
- Urselmans L., Phelps S.** (2018). A Schelling model with adaptive tolerance. *PLoS ONE*, 13 (3), e0193950.

Agent-based modelling of population dynamics of two interacting social communities: Migrants and natives

© 2020 г. V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, G.L. Beklaryan, A.S. Akopov, E.A. Rovenskaya, N.V. Strelkovskiy

V.L. Makarov,

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

A.R. Bakhtizin,

*Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: albert.bakhtizin@gmail.com*

G.L. Beklaryan,

*Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia;
e-mail: glbeklaryan@gmail.com*

A.S. Akopov,

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

E.A. Rovenskaya,

International Institute for Applied Systems Analysis, Austria; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; e-mail: rovenska@iiasa.ac.at

N.V. Strelkovskiy,

International Institute for Applied Systems Analysis, Austria; e-mail: strelkon@iiasa.ac.at

Received 19.03.2020

This study was funded by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-51-14010 АНФ_a).

Abstract. This article presents a new agent-based approach to modeling migration and demographic processes based on computer simulation of the population dynamics of two interacting communities: migrants and native people implementing different decision-making strategies. The approach proposed in the article is based on the well-known model of interaction between ‘nomads’ and ‘plowmen’ and focused on studying the behavior of societies with more complex behavior patterns than in the original model: native people and migrants, as well as their impact on social and economic and environmental systems. Moreover, members of both communities (societies), i.e. agent-migrants (that can be considered as ‘nomads’) and agent–native people (that can be considered as ‘plowmen’) reproduce the resources (job places) necessary to increase personal welfare and realize the opportunities for marriage and childbirth. Agent-migrants create resources with the lowest level of return, such as ‘low-technological job places’ and agent–native people reproduce ‘high-technological job places’ that provide a greater contribution to the level of personal welfare and economic growth at large. The total number of such job placements is restricted by the spatial and demographic characteristics of the system. The suggested model takes into account the influence of many parameters, in particular, the life expectancy, the share of new migrants in previously immigrants, minimum levels of personal welfare and other important characteristics that reflect the behavior of members of the studied communities. At the same time, the effect of such parameters on migration and demographic processes, and the macroeconomic and environmental characteristics associated with them are studied.

Keywords: agent-based modelling of migration, agent-based modelling of demographic processes, migration policy, behavioral economics, AnyLogic.

JEL Classification: C02, C63, F22, J11, J61.

DOI: 10.31857/S042473880009217-7