
**МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ЭКОНОМИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции
при государственном регулировании занятости**

© 2022 г. В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Г.Л. Бекларян, А.С. Акопов, Е.А. Ровенская,
Н.В. Стрелковский

В.Л. Макаров,

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

А.Р. Бахтизин,

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

Г.Л. Бекларян,

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

А.С. Акопов,

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

Е.А. Ровенская,

*Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), Лаксенбург, Австрия;
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва; e-mail: rovenska@iiasa.ac.at*

Н.В. Стрелковский,

*Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), Лаксенбург, Австрия;
e-mail: strelkon@iiasa.ac.at*

Поступила в редакцию 16.11.2021

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

Аннотация. В статье представлен подход к моделированию социально-экономических последствий миграции на основе расширенной модели взаимодействия мигрантов с коренными жителями, в которой регулирующая функция государства состоит в централизованном создании новых рабочих мест, различающихся уровнем «технологической отдачи» (т.е. производительности труда, зависящей от отраслевой принадлежности формируемых рабочих мест). Предлагаемый в статье подход основан на ранее предложенной модели взаимодействия мигрантов с коренными жителями и ориентирован на исследование социально-экономических последствий миграции в системе с более сложной регулирующей функцией государства, создающего низко- и высокотехнологичные рабочие места, соответственно привлекательные для мигрантов и коренных жителей. При создании рабочих мест агент-государство руководствуется двумя возможными стратегиями: создание кластерно-ориентированных рабочих мест в зонах высокой концентрации мигрантов и коренных жителей и равномерно распределенных рабочих мест с целью увеличения частоты взаимодействий между агентами различных классов и снижения уровня сегрегации населения. При этом особое внимание уделяется процессам ассимиляции, временные характеристики которой зависят от уровня сегрегации исследуемых сообществ, государственных инвестиций в образование и интеграцию и др. В предложенной модели учитывается влияние различных управляющих параметров, в частности, влияние уровня толерантности на выбор агентом места локации в условиях ограниченного соседства, влияние уровня образования на размерность области поиска нового рабочего места и другие важные характеристики, отражающие особенности поведения членов исследуемых сообществ. При этом социально-экономические последствия миграции исследуются при различных сценарных условиях, в частности, различающихся по паттернам поведения агентов, принадлежащих рассматриваемым сообществам, темпам притока новых мигрантов, уровню государственных расходов на образование и др.

Ключевые слова: агентное моделирование миграции, государственное регулирование занятости, социально-экономические последствия миграции, AnyLogic.

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

Цитирование: Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. (2022). Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании занятости // *Экономика и математические методы*. Т. 58. № 1. С. 113–130. DOI: 10.31857/S042473880018960-5

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многие страны сталкиваются с последствиями, вызванными миграционными процессами. Такие проблемы, как языковой барьер, культурные и образовательные различия между коренными жителями и мигрантами, существенная дифференциация в паттернах поведения местного и внешнего сообществ имеют, как правило, негативные социально-экономические последствия, проявляющиеся в виде роста социальной напряженности и увеличения финансовой нагрузки на бюджетную систему (Bove, Elia, 2017). Миграция, однако, является важным фактором обеспечения устойчивого экономического роста, особенно в странах с низким уровнем рождаемости, испытывающих дефицит трудовых ресурсов. Подобное противоречие может быть разрешено, если государством будут созданы условия, обеспечивающие существенное снижение времени, необходимого для ассимиляции и интеграции мигрантов. Как показывают многочисленные исследования, существует связь между уровнем владения государственным языком, возможностями получения высшего образования и скоростью ассимиляции (Dudley, Lieberman, 1959; Bleakley, Chin, 2010; Bacolod, Rangel, 2017). Если сообщество агентов-мигрантов сильно сегрегировано и не имеет полноценных и частых контактов с коренными жителями, то нет и условий для повышения уровня владения государственным языком, сокращения имеющихся культурных различий между мигрантами и коренными жителями, получения более качественного образования и т.д. Многие исследования, основанные на моделях ограниченного соседства типа Шеллинга (Schelling, 1971; Брер, 2016), также подтверждают необходимость минимизации уровня популяционной сегрегации. И хотя члены изолированной популяции могут чувствовать себя более комфортно и безопасно, как, в частности, показано в известной модели «кочевников» и «землепашцев» (Белюсов, 2017), для социально-экономической системы в целом подобная сегрегация несет риски существенного увеличения времени, необходимого для ассимиляции и интеграции, что в долгосрочной перспективе может привести к депопуляции коренного населения в условиях преобладающей рождаемости в среде мигрантов. При этом у государства имеется широкий набор инструментов миграционной и социально-экономической политики: от жесткого ограничения миграционных потоков и борьбы с сегрегацией до государственной поддержки миграции.

Сложность формирования рациональной миграционной политики во многом обусловлена необходимостью поиска компромиссных решений, учитывающих интересы различных агентов: коренного населения, мигрантов и государства. Оба класса агентов—жителей страны (мигранты и коренные жители) вносят вклад в экономический рост (Макаров, Бахтизин, Бекларян и др., 2020). Во многих странах агенты-мигранты ориентируются преимущественно на низкотехнологичные рабочие места, относящиеся в основном к сфере нефинансовых услуг, розничной и оптовой торговли, малоинтенсивному сельскому хозяйству, добыче сырья и др. (Pew Research Center, 2020). Агенты—коренные жители предпочитают преимущественно высокотехнологичные рабочие места, в частности, включающие отрасли финансовых (банковских) услуг, сектор высоких технологий (high-tech, IT), отрасли перерабатывающей промышленности и др. Высокотехнологичные рабочие места характеризуются высоким уровнем фондоотдачи и существенным вкладом в динамику ВВП, однако они требуют привлечения высококвалифицированных трудовых ресурсов. При этом государство может формировать рабочие места в местах компактного проживания агентов определенного типа (менее затратный кластерно-ориентированный подход) либо равномерно, т.е. комбинируя рабочие места различных типов в местах проживания обоих классов агентов (более затратный равномерно-смешанный подход) (Kain, 1969).

Цель данной статьи состоит в исследовании социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании рынка занятости, т.е. при кластерно-ориентированном и равномерно-смешанном подходах к формированию рабочих мест, а также с учетом влияния множественных факторов на пространственную динамику агентов (в частности, уровня образования, толерантности по отношению к соседям и др.) с помощью расширенной агент-ориентированной модели взаимодействия мигрантов с коренными жителями. Предлагаемая модель реализована в системе имитационного моделирования *AnyLogic* (Vorshchev, 2013; Акопов, 2014).

ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ

Итак, рассматривается искусственная социально-экономическая система, состоящая из представителей коренного и внешнего населения (т.е. мигрантов), взаимодействующих друг с другом. В отличие от модели, разработанной ранее (Макаров, Бахтизин, Бекларян и др., 2020), в которой необходимые ресурсы (рабочие места) создавались самими агентами, здесь рассматривается система с государственным регулированием рынка трудовых ресурсов, т.е. с централизованным созданием рабочих мест. Другим важным отличием является эндогенность времени, необходимого для ассимиляции агентов-мигрантов и зависящего от уровня владения государственным языком, уровня образования и т.д. И наконец, в новой модели предлагается учитывать влияние уровня образования на размерность области поиска нового рабочего места, а также уровня толерантности по отношению к соседям при выборе целевого местоположения агента среди имеющихся альтернатив (Urselmans, Phelps, 2018).

Взаимодействия между рассматриваемыми популяциями моделируются в двумерном дискретном пространстве с размерностью $dim \times dim$, состоящем из отдельных ячеек, которые ограничивают как число доступных рабочих мест, так и размеры популяций агентов соответственно. В подобном дискретном пространстве агент может занимать только одну ячейку с рабочим местом или без него в каждый момент времени. Как и ранее, в модели обеспечивается наличие *высокотехнологических* и *низкотехнологических* рабочих мест, на которые нацелены коренные жители и мигранты соответственно. Оба типа рабочих мест обеспечивают занимающих их агентов ростом уровня личного комфорта¹. Представители коренного населения получают меньшую прибавку к уровню комфорта, если они заняты в низкотехнологических отраслях экономики. Также на уровень их личного комфорта влияет соседство с агентами-мигрантами, контакты с которыми немного снижают этот уровень (Gorodzeisky, Semyonov, 2019). На выбор целевого рабочего места влияет уровень толерантности агентов по отношению к соседям — чем выше этот уровень, тем в большей степени агент готов соседствовать с агентами, принадлежащими к другому типу (например, работать коренному жителю в окружении мигрантов). Подобный параметр широко используется в моделях ограниченного соседства типа Шеллинга и моделях толерантного порогового поведения Грановеттера (Granovetter, 1978).

Агент-государство создает трудовые ресурсы с использованием двух различных стратегий:

— *кластерно-ориентированные рабочие места*, что предполагает формирование как высокотехнологических, так и низкотехнологических рабочих мест в областях с высокой концентрацией коренных жителей и мигрантов соответственно. Данный подход является наименее затратным для государства, но может создать дефицит рабочих мест для агентов, снизить уровень их личного комфорта и сократить численность популяции вследствие снижения рождаемости. Для формирования кластеров рабочих мест используется известный алгоритм нечеткой кластеризации (Bezdek, 1974, 1981; Beklaryan, Akopov, 2016);

— *равномерно-смешанные рабочие места*, что предполагает формирование трудовых ресурсов обоих типов равномерным и случайным образом во всех свободных ячейках дискретного пространства с разными вероятностями, заданными для высокотехнологических и низкотехнологических рабочих мест соответственно (Dekking, 2005). Данный подход является наиболее затратным для государства, но может предотвратить возникновение дефицита рабочих мест, что особенно важно при высоких темпах миграции, а также благоприятно влияет на частоту контактов между мигрантами и коренными жителями, сокращая время, необходимое для ассимиляции.

На возможности поиска нового рабочего места также влияет уровень образования агента (Lavrinovicha, Lavrinenko, Teivans-Treinovskis, 2015). С ростом данного уровня увеличивается размерность пространства поиска рабочего места. В свою очередь, уровень образования агента зависит от уровня владения местным языком и затратами государства на одного обучающегося.

Таким образом, стратегии формирования рабочих мест влияют на число и продолжительность контактов между агентами-мигрантами и коренными жителями, что с учетом государственных расходов на образование обеспечивает необходимые темпы ассимиляции и интеграции. Вклад высокотехнологических и низкотехнологических рабочих мест, занятых, как правило, коренными жителями и мигрантами соответственно, в темпы экономического роста (например, ВВП) и государственные

¹ В рассматриваемой модели личный комфорт является синтетическим показателем, который включает доходы, ощущение личной безопасности, самореализацию и т.д.

трансферты (ГТ) различаются. Производительность труда (как и фондоотдача), определяемая как отношение ВВП к единице трудовых ресурсов в высокотехнологичных отраслях экономики, значительно выше по сравнению с низкотехнологичными. При этом создание низкотехнологичных рабочих мест обуславливает дополнительные государственные трансферты из-за концентрации соответствующих отраслей в государственном секторе занятости (Sabot, 1982; Jean et al., 2010).

В рассматриваемой системе обеспечивается приток мигрантов с последующей трансформацией прибывающих агентов в коренных жителей по истечении срока, необходимого на ассимиляцию (в диапазоне от 5 до 30 лет). Приток новых мигрантов обусловлен «гравитационным эффектом» (Макаров и др., 2019), т.е. имеющейся разницей в уровне жизни страны эмиграции и иммиграции. Также принимается во внимание усиливающаяся обратная связь — чем больше имеется неассимилированных мигрантов, тем больше новых мигрантов прибывает в следующий момент времени.

Важной характеристикой индивидуальной системы принятия решений агента является встроенный механизм поиска ближайшего рабочего места (с учетом влияния уровня образования и толерантности по отношению к соседям) или партнера для брака и рождения детей в зависимости от характеристик агента (например, его возраста, семейного статуса, уровня личного комфорта и др.). Если агент не удовлетворен, т.е. уровень его личного комфорта ниже порогового, и при этом находится в трудоспособном возрасте, является безработным и др., то он ищет рабочее место. В случае достаточного уровня личного комфорта, детородного возраста и др. агент ищет партнера для брака и создания семьи.

При этом рождение детей возможно (с большей вероятностью) как в полных семьях детородного возраста, так и в неполных (с существенно меньшей вероятностью).

На рис. 1 показан общий алгоритм поведения агента на примере агента-мигранта, иллюстрирующий его возможные состояния и переходы между ними, реализуемые при выполнении определенных условий.

В модели для каждого агента определены следующие состояния: «стационарное состояние», «состояние поиска рабочего места», «состояние поиска партнера», «состояние готовности иметь детей»

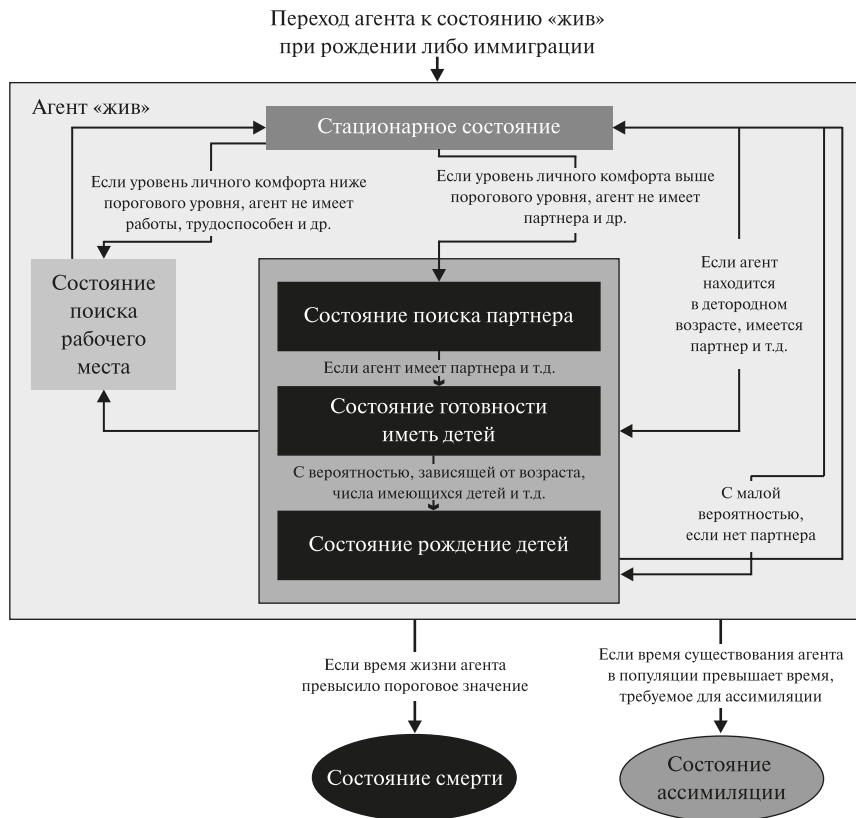


Рис. 1. Алгоритм поведения агента на примере агента-мигранта

и т.д. (см. рис. 1). В отличие от мигрантов агенты—коренные жители не имеют состояния «ассимиляция». Кроме того, у коренных жителей другие (более высокие) значения пороговых характеристик (например, минимальный средний возраст вступления в брак и рождения детей, минимальный уровень личного комфорта и т.д.), обусловленные паттерном их поведения, существенно отличающимся от мигрантов.

Агент может находиться в стационарном состоянии, если, например, он уже женат, имеет работу, после рождения детей, после достижения пенсионного возраста и т.д.

В зависимости от своего текущего состояния каждый агент либо неподвижен, либо перемещается к целевым ячейкам дискретного пространства, содержащим рабочие места или других агентов, один из которых может стать его партнером. При этом каждая оцениваемая агентом ячейка дискретного пространства также может находиться в одном из следующих состояний: *ячейка, свободная от ресурса*, если она не содержит рабочего места, *ячейка, содержащая низкотехнологичное рабочее место*, и *ячейка, содержащая высокотехнологичное рабочее место*. Таким образом, если ячейка дискретного пространства с рабочим местом занята агентом, положительный вклад в экономический рост будет зависеть от типа ресурса, так как высокотехнологичные рабочие места приносят большую отдачу. Напротив, если ячейка дискретного пространства не имеет трудовых ресурсов и занята каким-либо агентом, негативное влияние будет наблюдаться из-за роста государственных трансфертов (например, пособий по безработице) и потери добавленной стоимости, которая создается, если ресурс занят агентом. В то же время, если агент занимает ячейку без трудового ресурса, уровень его личного комфорта снижается, что может ограничивать его возможности найти партнера и заводить детей.

Далее будет дано краткое описание наиболее важных характеристик расширенной модели реакции мигрантов и коренных жителей на государственное регулирование занятости. Формальное описание базовой модели с децентрализованным созданием рабочих мест и экзогенным временем ассимиляции представлено в работе (Макаров и др., 2020).

Пусть T — множество моментов времени (по годам); $|T|$ — общее число моментов времени; $t_0 \in T$ и $t_{|T|} \in T$ — начальный и конечный моменты времени; $t_k \in T$ — все моменты времени; $I = \{1, \dots, |I|\}$ — набор индексов агентов—коренных жителей, где $|I|$ — общее число агентов—коренных жителей; $\tilde{I} = \{1, \dots, |\tilde{I}|\}$ — набор индексов агентов-мигрантов, где $|\tilde{I}|$ — общее число агентов-мигрантов.

Уровень владения местным (государственным) языком агентом-мигрантом \tilde{i} ($\tilde{i} \in \tilde{I}$), зависящий от числа контактов между агентами различных типов в момент времени $t_k \in T$:

$$\tilde{l}_{\tilde{i}}(t_k) = \sum_{k=t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^{|I|} \text{contacts}_{\tilde{i}i}(\xi_k), \quad \xi_k \in T, \tag{1}$$

$$\text{contacts}_{\tilde{i}i}(\xi_k) = \begin{cases} 0, & \text{если } \{x_i(\xi_k), y_i(\xi_k)\} \in M_{\tilde{i}}(\xi_k), \\ 1, & \text{если } \{x_i(\xi_k), y_i(\xi_k)\} \notin M_{\tilde{i}}(\xi_k), \end{cases} \tag{2}$$

$$\tilde{i} \in \tilde{I}, i \in I, t_k, \xi_k \in T,$$

где $\{x_i(\xi_k), y_i(\xi_k)\}$, $i \in I$, $\xi_k \in T$ — координаты агента—коренного жителя i в двумерном дискретном пространстве (рис. 2); $M_{\tilde{i}}(\xi_k)$, $\tilde{i} \in \tilde{I}$, $\xi_k \in T$ — множество координат, принадлежащих ячейкам, являющимся соседними для агента-мигранта \tilde{i} (8-клеточное Мурово соседство) в момент времени ξ_k .

Уровень образования агента i ($i \in I \cup \tilde{I}$), зависящий от уровня владения языком и государственных расходов на образование в момент времени $t_k \in T$:

$$e_i(t_k) = \bar{e} \exp\left(-1/\left[\eta(t_k)GDP(t_k)(1+l_i(t_k))\right]\right), \tag{3}$$

где $l_i(t_k)$, $i \in I \cup \tilde{I}$, $t_k \in T$ — уровень владения языком агента i ; \bar{e} — верхний предел уровня

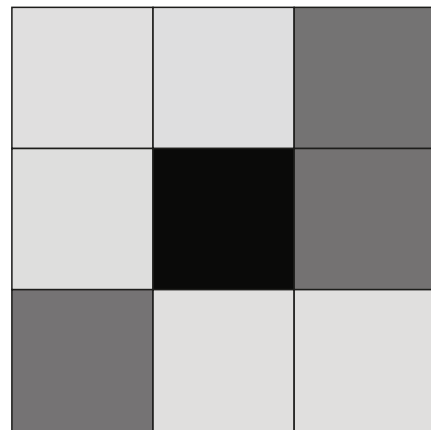


Рис. 2. Соседние клетки агента-мигранта, влияющие на его контакты

Примечание. Пример ограниченного соседства: 8 соседних ячеек обеспечивают агента-мигранта тремя контактами.

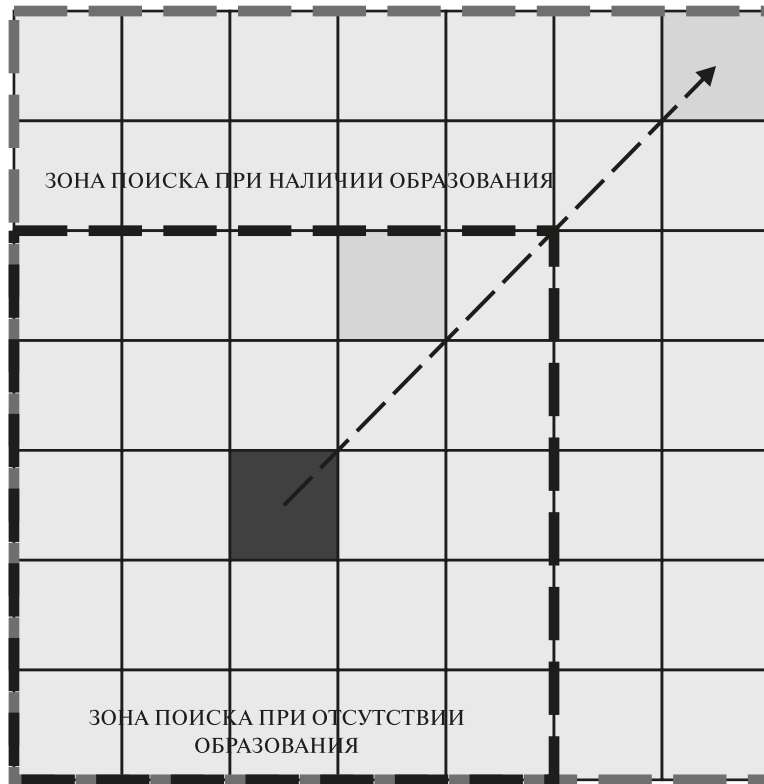


Рис. 3. Влияние уровня образования на размерность области поиска рабочего места

образования; $\eta(t_k) \in [0, 1]$ — доля государственных расходов на образование в валовом внутреннем продукте ($GDP(t_k)$) на одного обучающегося.

Время, требуемое на ассимиляцию агента-мигранта \tilde{i} ($\tilde{i} \in \tilde{I}$), зависящее от уровня владения языком и образования в момент времени $t_k \in T$:

$$\tilde{\zeta}_i(t_k) = \tilde{A} \left(\frac{1}{1 + \tilde{l}_i(t_k)} \right)^{v_1} \left(\frac{1}{1 + \tilde{e}_i(t_k)} \right)^{v_2}, \tag{4}$$

где \tilde{A} — общее число лет, необходимых иммигранту при отсутствии знания языка и образования (30 лет), $v_1, v_2 \in [0, 1]$ — коэффициенты значимости: $v_1 + v_2 = 1$.

Размерность области поиска рабочего места для агента i ($i \in I \cup \tilde{I}$), зависящая от уровня образования в момент времени $t_k \in T$:

$$dim \times dim = (2S_i(t_k) + 1) \times (2S_i(t_k) + 1) - 1, \tag{5}$$

$$S_i(t_k) = \underline{S} + \lambda B e_i(t_k), \tag{6}$$

где \underline{S} — минимальное количество ячеек области поиска рабочего места, заданное во всех направлениях дискретного пространства, при отсутствии образования (рис. 3); $\lambda \in [0, 1]$ — коэффициент влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места (управляющий параметр); B — константа ($B = 10$).

Координаты целевой ячейки для агента i ($i \in I \cup \tilde{I}$) в дискретном пространстве, состоящем из R строк и C столбцов и содержащем наиболее предпочтительное рабочее место в момент времени $t_k \in T$:

$$Cell_i^*(t_k; \hat{r}, \hat{c}) = \arg \min_{r \in R, c \in C} (d_i(t_k; r, c) + \rho_i(t_k; r, c)(1 - \gamma)), \tag{7}$$

$$d_i(t_k; r, c) = \sqrt{(x_i(t_k) - r)^2 + (y_i(t_k) - c)^2}, \tag{8}$$

$$\rho_i(t_k; r, c) = \sum_{\tilde{r}=r-\tilde{S}}^{r+\tilde{S}} \sum_{\tilde{c}=c-\tilde{S}}^{c+\tilde{S}} m_i(t_k; \tilde{r}, \tilde{c}), \tag{9}$$

$$m_i(t_k; \hat{r}, \hat{c}) = \begin{cases} 1, & \text{если выполняется условие } I, \\ 0, & \text{если выполняется условие } II. \end{cases} \quad (10)$$

Условие I.

$$\left(i \in I \ \exists \{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i \in \tilde{I}} \in \{Cell_i(t_k; \hat{r}, \hat{c})\}_{i \in I} \right) \text{ или } \\ \left(i \in \tilde{I} \ \exists \{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i \in I} \in \{Cell_i(t_k; \hat{r}, \hat{c})\}_{i \in \tilde{I}} \right).$$

Условие II.

$$\left(i \in I \ \forall \{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i \in \tilde{I}} \notin \{Cell_i(t_k; \hat{r}, \hat{c})\}_{i \in I} \ \forall i \in \tilde{I} \right) \text{ или } \\ \left(i \in \tilde{I} \ \forall \{x_i(t_k), y_i(t_k)\}_{i \in I} \notin \{Cell_i(t_k; \hat{r}, \hat{c})\}_{i \in \tilde{I}} \ \forall i \in I \right),$$

где $d_i(t_k; r, c)$, $i \in I \cup \tilde{I}$, $t_k \in T$ — Евклидово расстояние между агентом i с координатами $\{x_i(t_k), y_i(t_k)\}$ и ячейкой, содержащей рабочее место $Cell_i(t_k; r, c)$, релевантное для агента i (т.е. высокотехнологичное для коренного жителя и низкотехнологичное для мигранта) в момент времени t_k ; $\rho_i(t_k; r, c)$, $i \in I \cup \tilde{I}$, $t_k \in T$ — суммарное число агентов, принадлежащих к другому типу и входящих в пространство соседства агента i , ограниченного размерностью $(2\tilde{S} + 1) \times (2\tilde{S} + 1) - 1$ в момент времени t_k ; $Cell_i(t_k; \hat{r}, \hat{c})$, $i \in I \cup \tilde{I}$ — координаты ячеек, входящих в область соседства агента i в момент времени t_k ; $\gamma \in [0, 1]$ — уровень толерантности агентов по отношению к агентам противоположного типа: $\gamma = 0$ — агенты полностью нетолерантны; $\gamma = 1$ — агенты полностью толерантны (*управляющий параметр модели*) (рис. 4).

Таким образом, агент находит клетку, которая находится на минимальном расстоянии от него (см. уравнение (8)) и имеет наименьший штраф за наличие соседей другого типа в заданной окрестности (см. уравнение (9)). Важность второго требования при принятии решения определяется уровнем толерантности (см. уравнение (7)). Условие I означает, что в окрестности данного агента—коренного жителя находится агент-мигрант либо в окрестности данного агента-мигранта находится агент—коренной житель. Условие II означает, что в окрестности данного агента—коренного жителя нет агентов-мигрантов либо в окрестности данного агента-мигранта нет агентов—коренных жителей.

Индекс сегрегации Дункана для системы, описывающей популяционную динамику мигрантов и коренных жителей (Duncan O., Duncan B., 1955):

$$DSI(t_k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{|J|} \left| \frac{n_j(t_k)}{|I|} - \frac{\tilde{n}_j(t_k)}{|\tilde{I}|} \right|, \quad (11)$$

где $J = \{1, \dots, |J|\}$ — набор индексов областей, на которые поделено дискретное пространство существования агентов; где $|J|$ — общее число оцениваемых окрестностей в дискретном пространстве

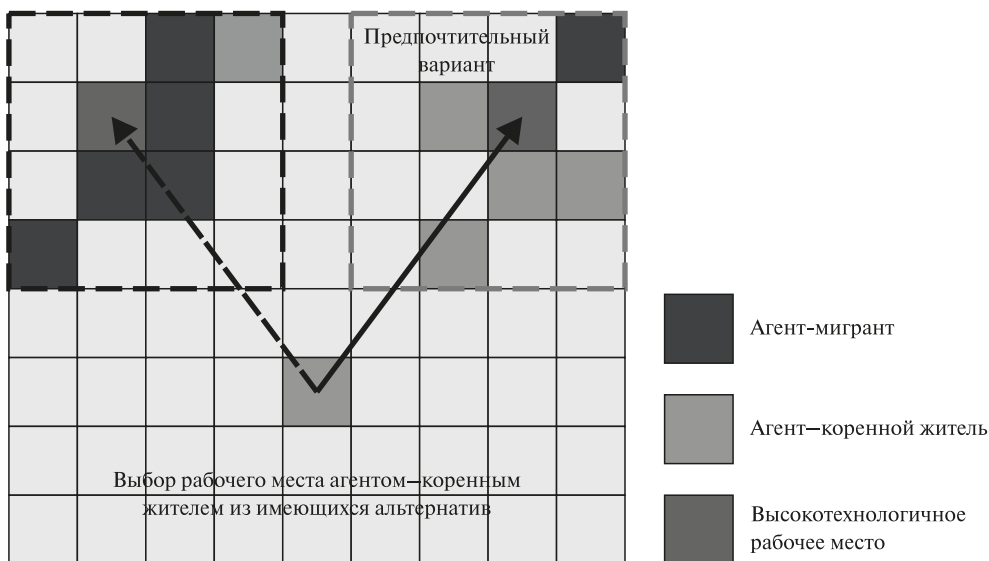


Рис. 4. Влияние уровня толерантности на выбор агентом рабочего места

размещения агентов; $n_j(t_k)$, $j \in J$, $t_k \in T$ — число агентов–коренных жителей, расположенных в окрестности j ; $\tilde{n}_j(t_k)$, $j \in J$, $t_k \in T$ — число агентов-мигрантов, расположенных в окрестности j .

Все остальные показатели модели, в том числе численность коренного населения и мигрантов, темпы роста ВВП, размер государственных трансфертов и прочие характеристики вычисляются так же, как и базовой модели (Макаров и др., 2020).

Далее с использованием системы AnyLogic была выполнена программная реализация предложенной модели и выполнены численные эксперименты.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Далее, с использованием разработанной имитационной модели исследованы различные сценарии развития социально-экономической системы, состоящей из двух взаимодействующих популяций: агентов–коренных жителей и агентов-мигрантов с учетом эффекта сегрегации и влияния государственной регулирующей политики рынка занятости. Все имитационные эксперименты проводятся на временном горизонте в 80 шагов модельного времени (лет). Важной целью подобных экспериментов является изучение влияния эффектов сегрегации. Для каждого из изучаемых сценариев выбирается два возможных способа создания новых рабочих мест: 1 — *кластерно-ориентированный подход*; 2 — *равномерно-смешанный подход*. Каждый сценарий имеет нумерацию «№ .№ » (т.е. «Номер сценария», «Способ создания рабочих мест»)

Итак, рассматриваются следующие сценарии (табл. 1).

Сценарий 1.1–1.2. Базовый сценарий. Предполагается сохранение «текущих» паттернов поведения коренных жителей и мигрантов, в рамках которых агенты–коренные жители предпочитают жениться и заводить детей в более позднем возрасте (после 29 лет) в условиях высокого минимального уровня личного комфорта (6 ед.). При этом доля новых агентов-мигрантов — 8% в год, влияние уровня толерантности и образования на поиск рабочих мест — 0,5.

Сценарий 2.1–2.2. Неограниченная и неконтролируемая миграция. При этом сценарии значительно увеличивается доля новых агентов-мигрантов в популяции агентов, иммигрировавших ранее (до 25% в год). При этом государство сокращает расходы на ассимиляцию и интеграцию, в частности, доля государственных расходов на образование в ВВП на душу населения снижается до 10% (вместо 20% в базовом сценарии). Кроме того, паттерны поведения коренных жителей и мигрантов не меняются. При этом уровень толерантности — 0, влияние уровня образования — 1.

Сценарий 3.1–3.2. Минимальная миграция. Сценарий предполагает радикальное снижение доли новых агентов-мигрантов (до 1% в год) при сохранении всех остальных значений управляющих параметров. При этом уровень толерантности — 1, влияние уровня образования — 0.

Сценарий 4.1–4.2. Трансформация моделей поведения агентов. Сценарий направлен на изучение влияния структурной трансформации паттернов поведения агентов в условиях выравнивания предпочтений агентов–коренных жителей и агентов-мигрантов в отношении возраста вступления в брак и рождения детей, перехода к равным значениям минимальных уровней личного комфорта и других характеристик агентов (т.е. «коренные жители копируют паттерн поведения мигрантов»).

Таблица 1. Различные сценарии симуляции и соответствующие им значения параметров модели

Код	Сценарий Интерпретация	Значения различающихся параметров			
		Доля новых агентов-мигрантов (от числа уже находящихся в модели мигрантов), %	Доля государственных расходов на образование (от ВВП на душу населения), %	Уровень толерантности агентов по отношению к соседям	Влияние уровня образования на размерность области поиска рабочего места
1.1–1.2	Базовый сценарий	8	20	0,5	0,5
2.1–2.2	Неограниченная и неконтролируемая миграция	25	10	0	1
3.1–3.2	Минимальная миграция	1	20	1	0
4.1–4.2	Трансформация моделей поведения агентов	15	50	0,5	0,5

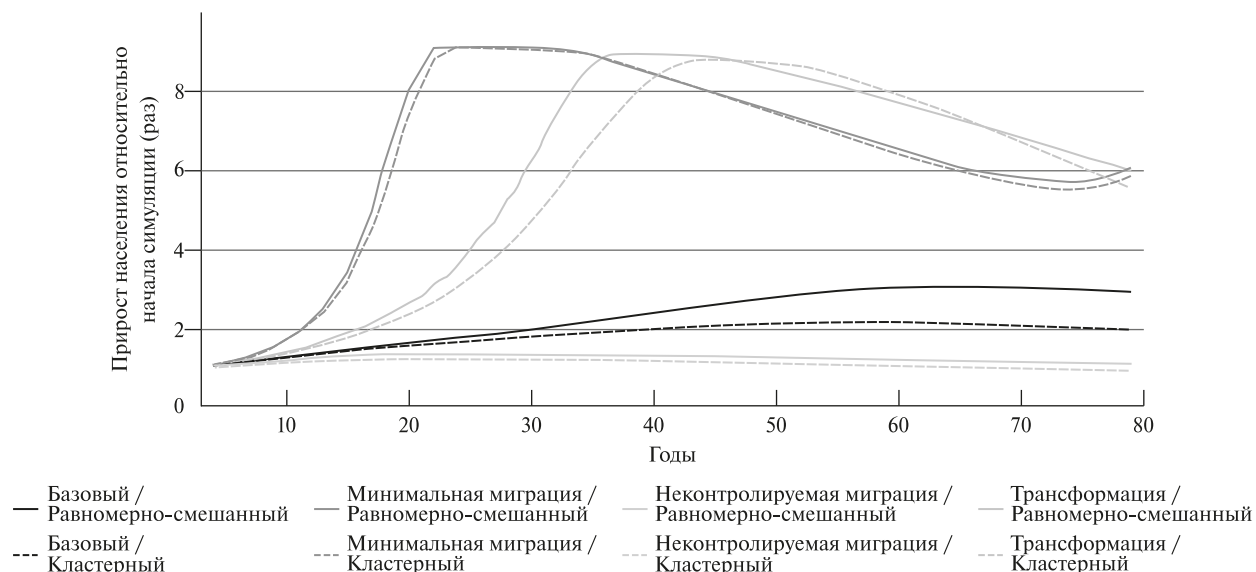


Рис. 5. Численность населения с учетом ассимилированных агентов-мигрантов

Кроме того, доля новых агентов-мигрантов в популяции агентов, иммигрировавших ранее, увеличивается до 15%, чтобы обеспечить сильный приток новых мигрантов. В то же время государство увеличивает расходы на ассимиляцию и интеграцию, в частности, доля государственных расходов на образование в ВВП на душу населения (одного обучающегося) увеличивается до 50%. При этом влияние уровня толерантности и образования на поиск рабочих мест — 0,5.

Для учета случайных процессов, происходящих в модели, для каждого сценария было выполнено 30 прогонов с одинаковыми значениями начальных параметров, но с различными значениями генератора случайных чисел (Lee et al., 2015). Полученные результаты представлены на рис. 5–10. На всех рисунках показанные траектории отображают усредненные значения прогонов модели в рамках каждого сценария.

На рис. 5 отображено изменение суммарной численности агентов в модели относительно начального числа агентов. Параметры модели подобраны таким образом, что во всех сценариях наблюдается рост численности населения как за счет миграции, так и за счет естественного прироста. Для сценариев с более интенсивной миграцией рост населения, очевидно, происходит быстрее. Отметим две интересные особенности:

i) для всех сценариев изначальный рост населения происходит быстрее при равномерно-смешанном способе создания рабочих мест;

ii) в сценариях с высокими уровнями миграции (2 и 4) при достижении определенного числа агентов численность населения начинает снижаться. Первый феномен может быть объяснен более низким уровнем комфорта среди агентов при кластерно-ориентированном способе создания рабочих мест, что приводит к снижению вероятности создания семьи и рождения детей. Вторая особенность наблюдается, вероятно, из-за высокой конкуренции за рабочие места, которая ведет к тому, что не все агенты могут найти соответствующее их типу рабочее место и, следовательно, уровень их комфорта падает, что ведет к снижению рождаемости. При этом численность населения снижается за счет естественной убыли.

На рис. 6 отображена динамика доли (неассимилированных) мигрантов среди всего населения. В базовом сценарии доля мигрантов меняется на протяжении симуляции слабо. В сценарии минимальной миграции доля мигрантов плавно убывает практически до нулевых значений. В сценарии неограниченной и неконтролируемой миграции доля мигрантов достигает 70%, а затем быстро снижается за счет ассимиляции и естественной убыли населения (продолжительность жизни мигрантов предполагается меньшей, чем коренных жителей). При этом через некоторое время доля мигрантов снова начинает стремительно расти. В сценарии трансформации моделей поведения агентов также наблюдается рост доли мигрантов, однако он более плавный и доля мигрантов не превосходит 40%, а затем начинает снижаться вследствие ассимиляции. Тип создания рабочих мест не оказывает принципиального воздействия на долю мигрантов; лишь в сценарии трансформации

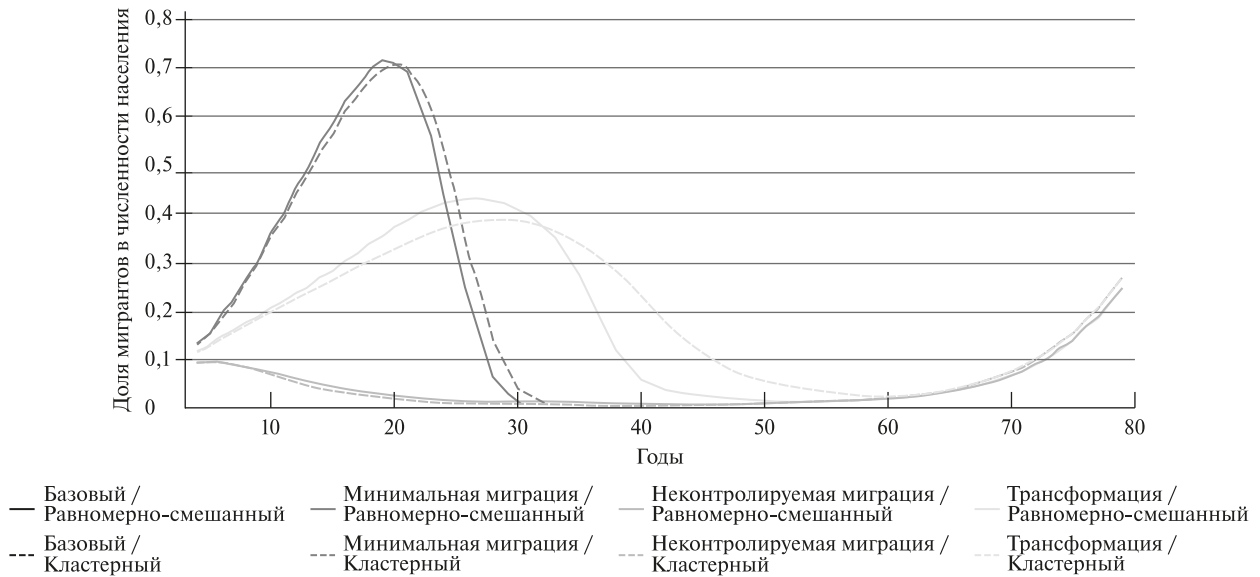


Рис. 6. Доля мигрантов в численности населения

кластерно-ориентированный тип создания рабочих мест ведет к более плавной динамике изменения доли мигрантов.

На рис. 7 представлена динамика среднего времени, необходимого для ассимиляции мигрантов. В базовом сценарии эта величина остается примерно постоянной на протяжении всей симуляции (15 лет). В сценарии минимальной миграции время, необходимое для ассимиляции мигрантов, сначала растет, а затем снижается. Данный феномен может быть обусловлен низкой плотностью населения в данном сценарии (рис. 7) и, как следствие, снижением числа контактов между мигрантами и коренными жителями. Формируются изолированные «гетто», состоящие из одиночных агентов-мигрантов. Как только они ассимилируются, снижение числа новых мигрантов положительно влияет на среднее время ассимиляции. В сценариях с более высокой интенсивностью миграции после начального периода стабилизации наблюдается снижение среднего времени, требуемого на ассимиляцию, — в сценарии трансформации на первом этапе это происходит в основном за счет высоких государственных расходов на образование (интеграцию), а в сценарии

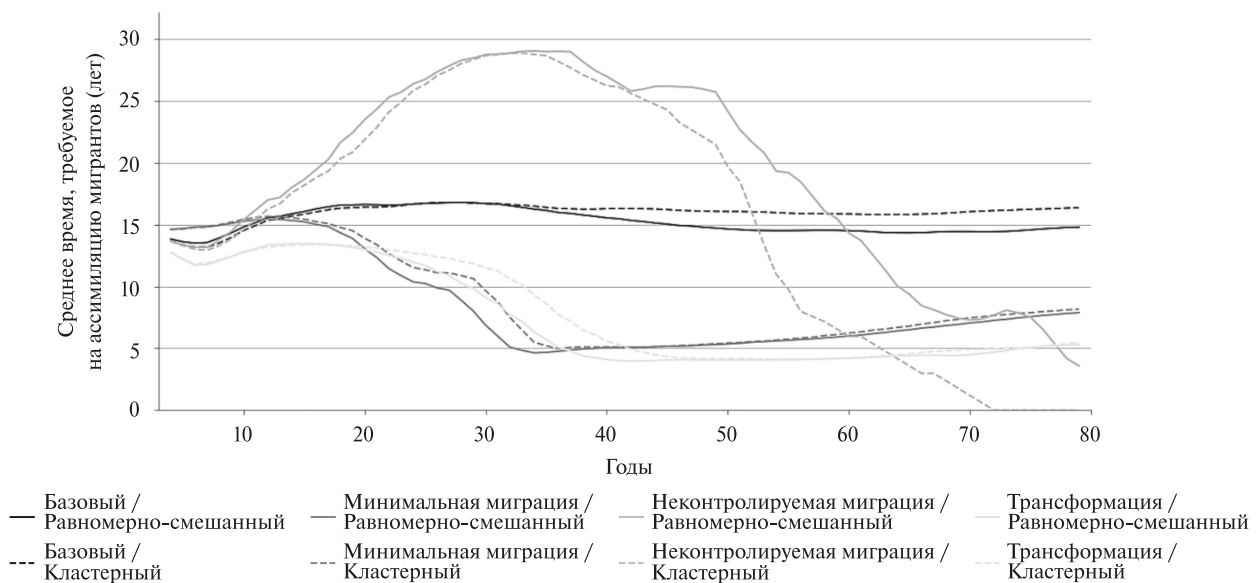


Рис. 7. Среднее время, требуемое на ассимиляцию мигрантов

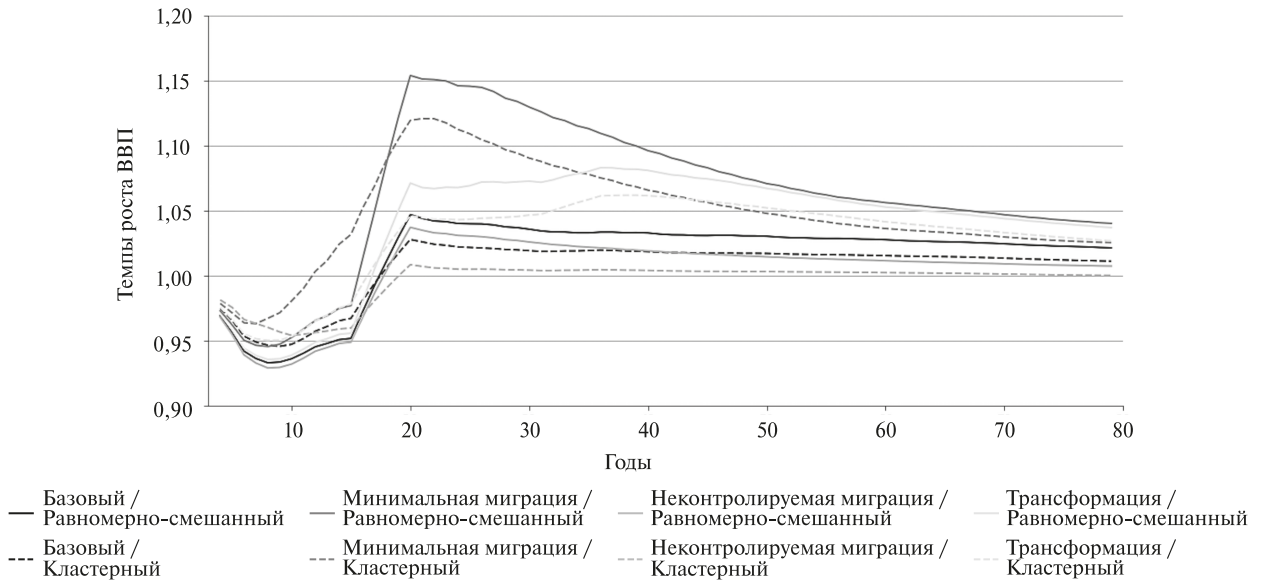


Рис. 8. Темпы роста ВВП

неконтролируемой миграции — за счет высокой плотности населения и того факта, что контакты с уже ассимилированными мигрантами (эквивалентные контактам с коренными жителями) помогают неассимилированным быстрее овладеть местным языком. За исключением сценария минимальной миграции тип создания рабочих мест несущественно влияет на наблюдаемые траектории.

На рис. 8 отображена динамика темпов роста ВВП. После некоторого изначального спада рост ВВП наблюдается во всех сценариях, при этом наиболее интенсивный — в сценариях с наибольшей интенсивностью миграции. Отметим, что в данный период кластерно-ориентированный способ создания рабочих мест ведет к более быстрому росту. Однако затем, когда наблюдается замедление темпов роста (вызванное снижением численности населения, см. рис. 5), равномерно-смешанный способ оказывается более выгодным.

На рис. 9 отображена динамика государственных расходов. Их объем напрямую связан с интенсивностью миграции — данный феномен связан с необходимостью выплаты большого числа

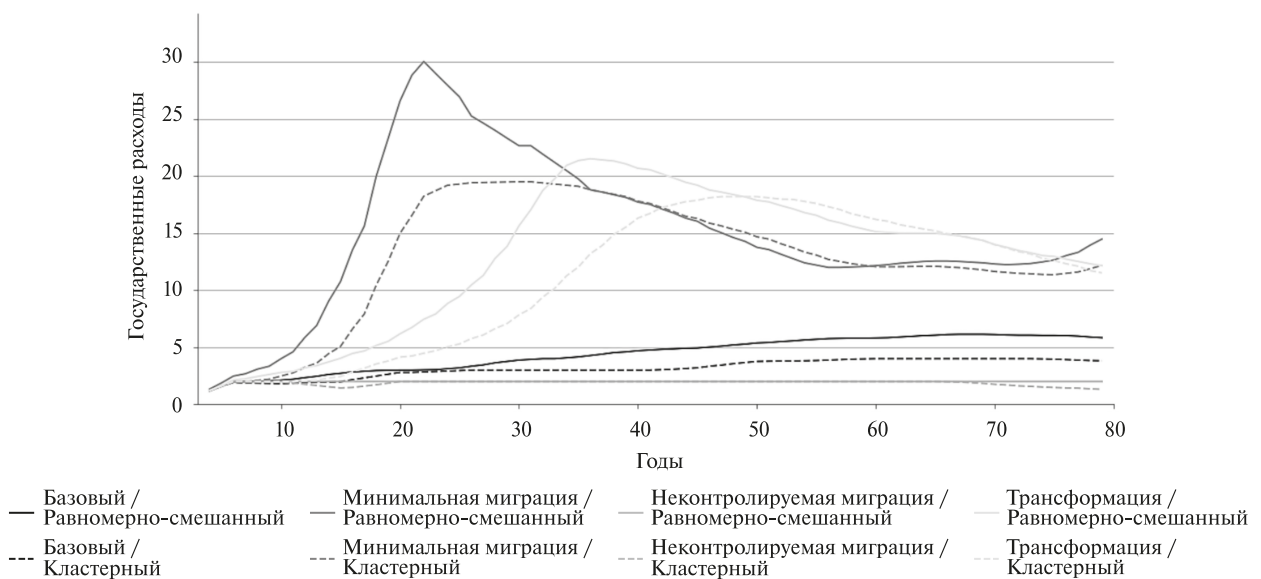


Рис. 9. Государственные расходы

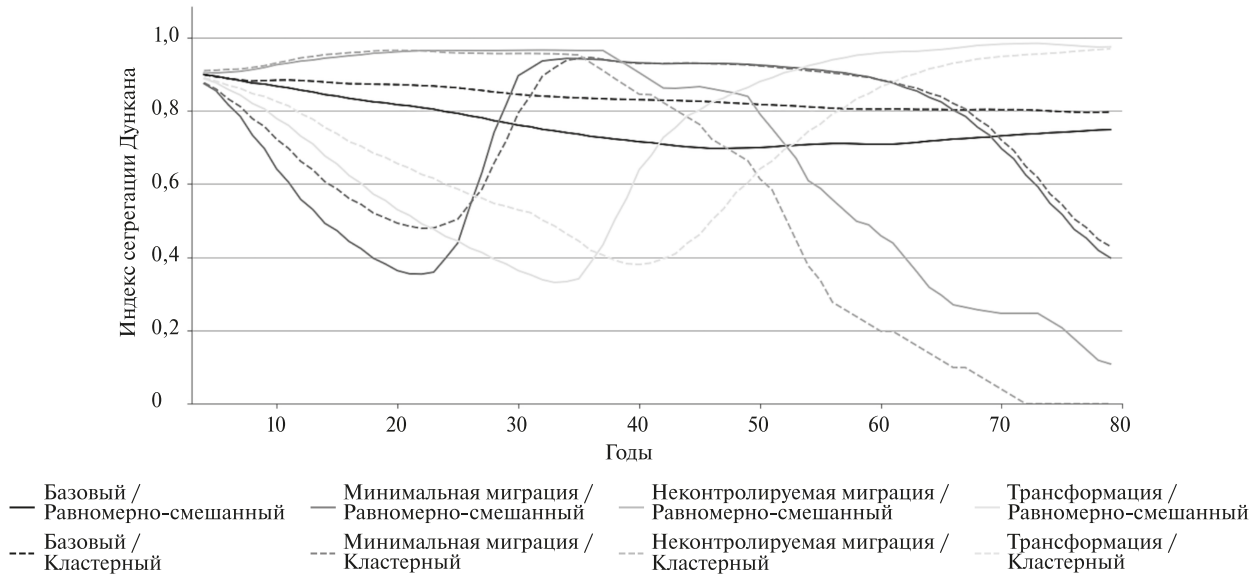


Рис. 10. Индекс сегрегации Дункана

пособий мигрантам (для сценария неограниченной и неконтролируемой миграции) и расходами на образовательно-интеграционные программы (для сценария трансформации поведения агентов). При этом для сценариев с высокой интенсивностью миграции при равномерно-смешанном способе создания рабочих мест наблюдаются более высокие расходы. Эта особенность сглаживается ближе к концу рассматриваемого периода.

На рис. 10 представлена динамика индекса сегрегации Дункана. В различных сценариях, за исключением базового, наблюдаются значительные флуктуации данной величины. В сценарии минимальной миграции, неограниченной и неконтролируемой миграции и сценарии трансформации поведения агентов в различные периоды наблюдается значительная сегрегация (формирование изолированных кластеров из различных типов агентов). При постоянном уровне толерантности агентов в каждом сценарии данная особенность связана с изменениями доли мигрантов в общем населении и перемещениями агентов в поисках соответствующих их типу рабочих мест.

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПАРАМЕТРОВ

Для более подробной оценки влияния ключевых параметров модели на представляющие практический интерес выходные переменные были проведены эксперименты вариации параметров (Lorscheid, Heine, Meyer, 2012). Оценивалось влияние государственных расходов в образование, уровней толерантности и образования агентов на темпы роста ВВП в течение всего периода симуляции и индекс сегрегации Дункана в последний момент модельного времени (табл. 2). Для краткости рассматривался только равномерно-смешанный метод создания рабочих мест.

Для каждого сценария было проведено сравнение темпов роста ВВП в каждый момент модельного времени и оценена общая доля моментов времени, в которые наблюдаемый индикатор больше для значения управляющего параметра, расположенного на оси y , чем для расположенного на оси x (рис. 11–13).

Таблица 2. Описание экспериментов по анализу чувствительности параметров модели

Сценарий	Входной параметр	Выходная переменная
Доля новых агентов-мигрантов	Доля государственных расходов на образование	Темпы роста ВВП
	Уровень толерантности по отношению к соседям	Индекс сегрегации Дункана
Влияние уровня образования на размерность области поиска рабочего места		

Для сценария минимальной миграции (1%) можно выделить два оптимальных уровня затрат на образование — около 15 и 30% ВВП на душу населения. Аналогичная ситуация наблюдается и для сценария максимальной миграции (25%), при этом нижний оптимум находится на уровне 10%. Для базового сценария (8%) наблюдается практически монотонная зависимость роста темпов ВВП от затрат на образование — вплоть до уровня в 35%. В сценарии трансформации моделей поведения агентов (15%) четкой зависимости не наблюдается.

Для уровня толерантности агентов к соседям не наблюдается однозначной зависимости — при разных сценариях миграции наибольшие темпы роста ВВП наблюдаются при различных уровнях толерантности — от 0,1 до 0,3; при этом зачастую оптимальных уровней толерантности может быть несколько. Данный результат перекликается с классической моделью Шеллинга (Schelling, 1971), в которой также наблюдаются нелинейные эффекты относительно уровня толерантности агентов.

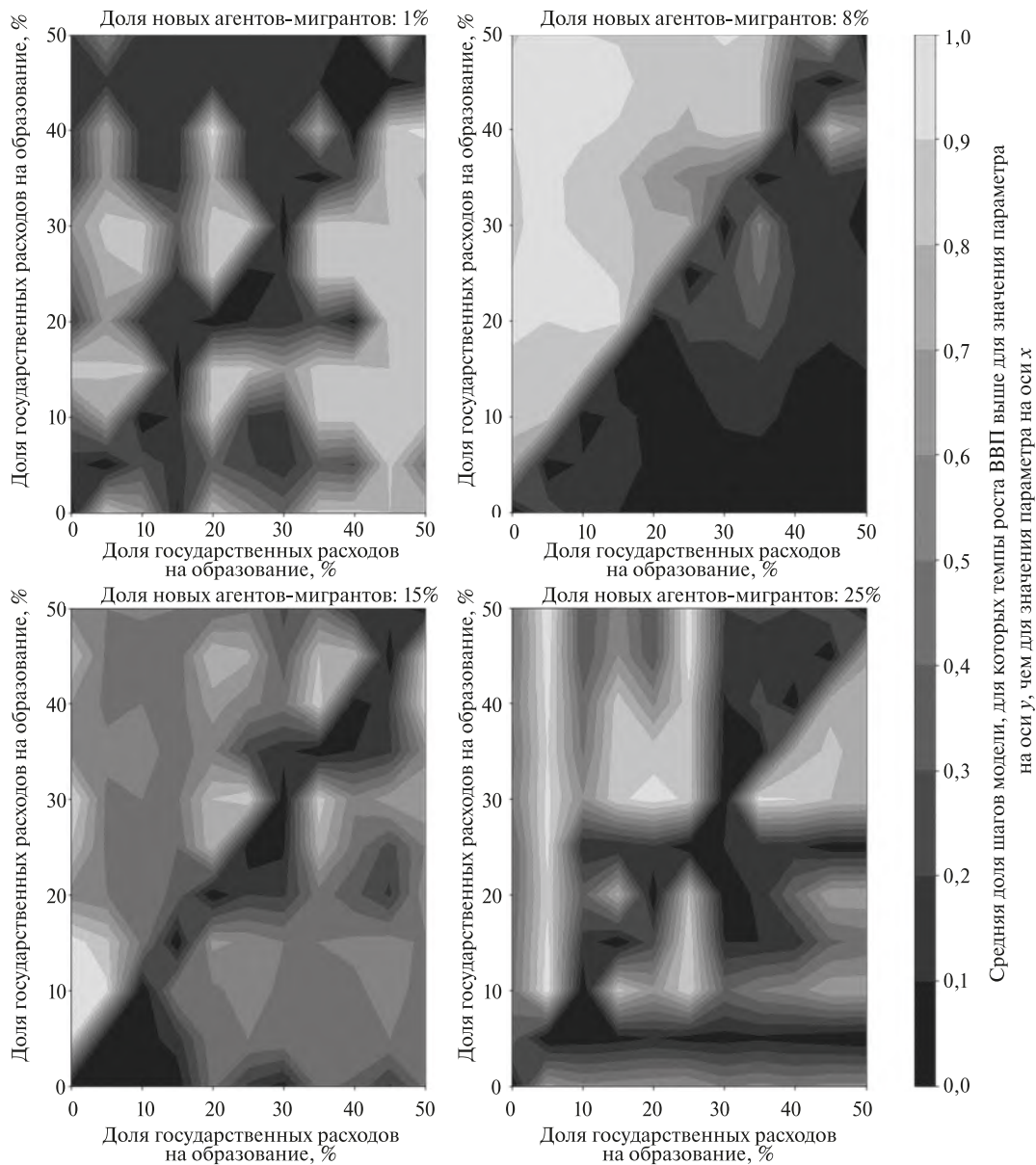


Рис. 11. Зависимость темпов роста ВВП от доли государственных расходов на образование при различных сценариях миграции

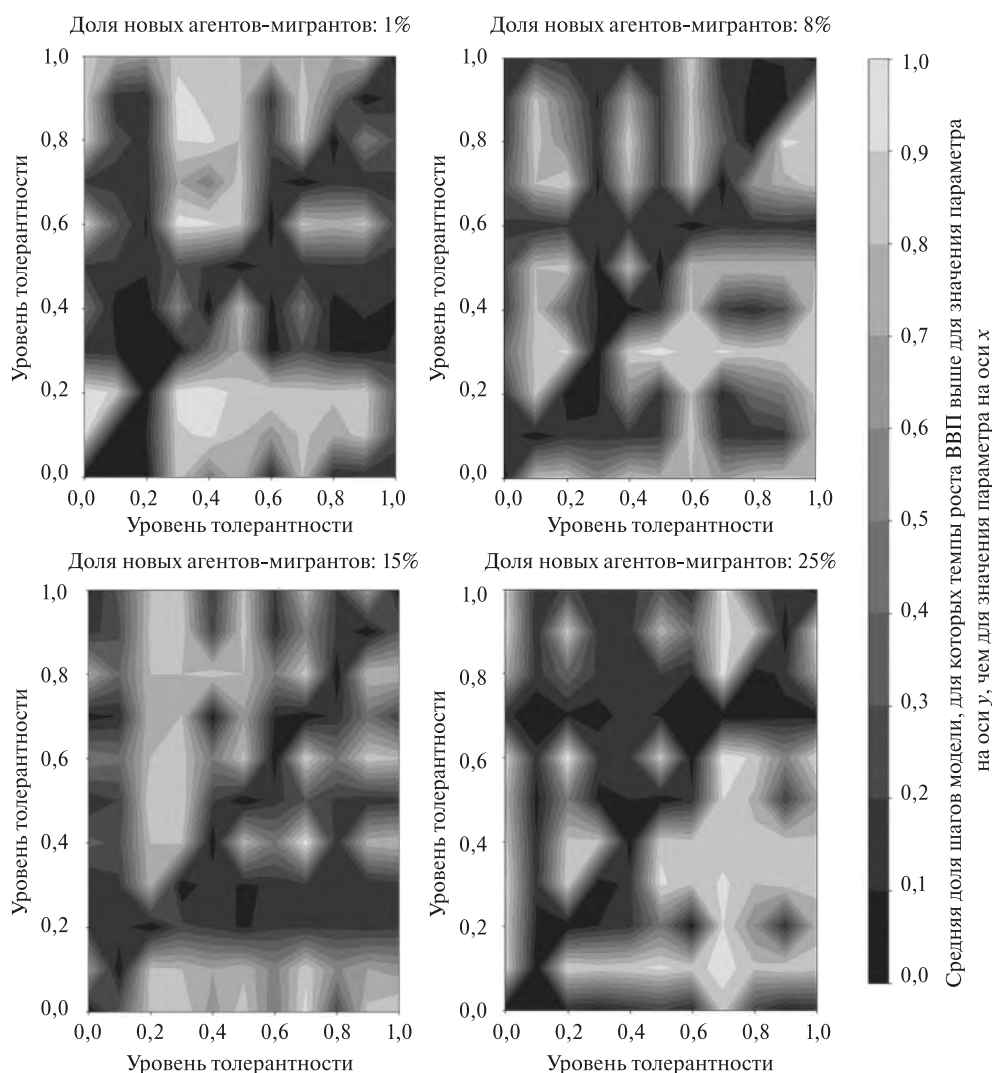


Рис. 12. Зависимость темпов роста ВВП от уровня толерантности агентов к соседям при различных сценариях миграции

Для влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места также не наблюдается однозначной зависимости — при различных миграционных сценариях наибольшие темпы роста ВВП наблюдаются при значениях данного параметра — от 0 до 0,4; при этом зачастую «оптимальных» уровней толерантности оказывается несколько, как и в случае уровня толерантности. Этот феномен может быть связан с усилением конкуренции за доступные рабочие места при большем радиусе «зрения» агентов — не все агенты способны найти подходящее рабочее место на каждом шаге симуляции.

На рис. 14 представлены значения индекса сегрегации Дункана на последнем шаге симуляции для различных значений параметров и различных сценариев миграции.

Отметим более сильное влияние миграционных сценариев на сегрегацию, чем рассматриваемых параметров. Наиболее сильная сегрегация наблюдается при уровне миграции в 15%, наиболее слабая сегрегация — при минимальной миграции. В пределах каждого сценария каждый параметр в отдельности влияет на сегрегацию весьма слабо.

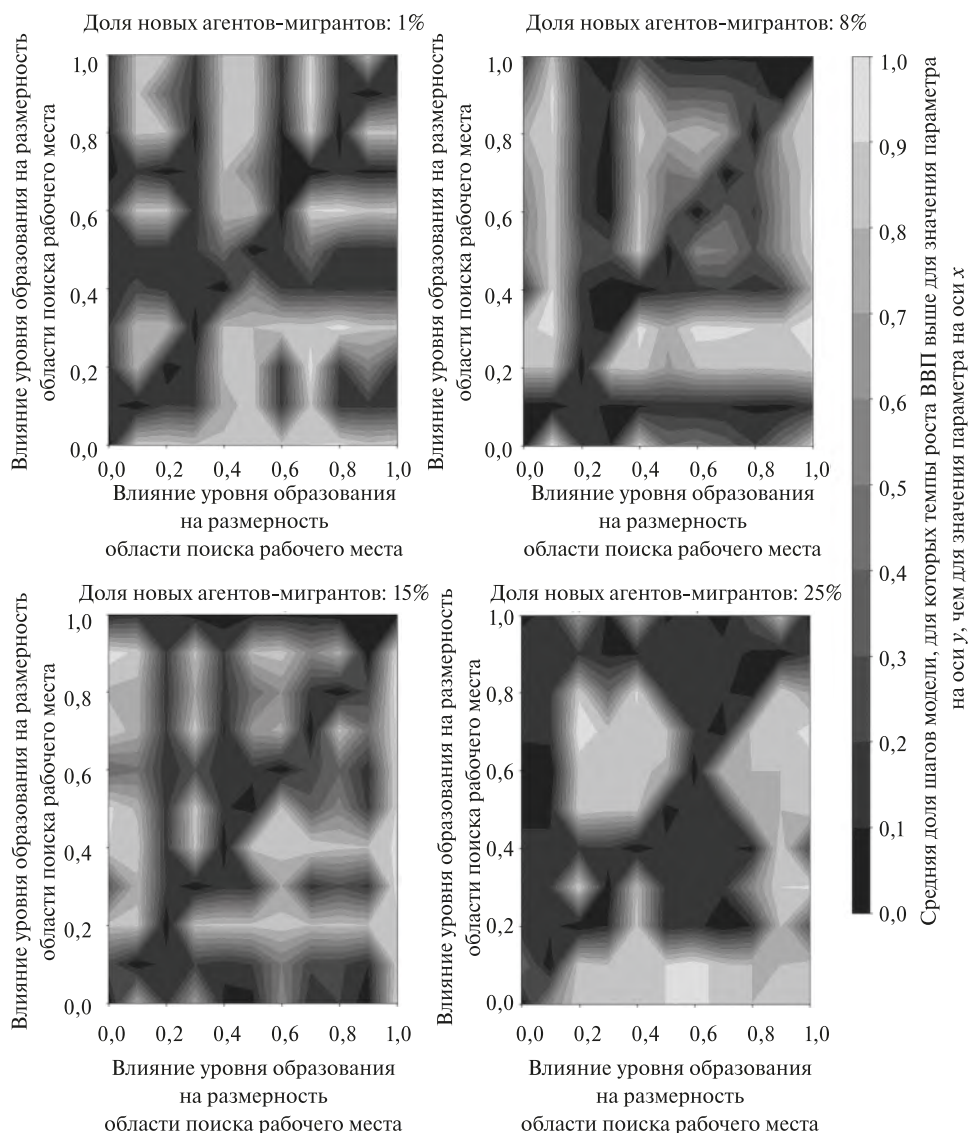


Рис. 13. Зависимость темпов роста ВВП от влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места при различных сценариях миграции

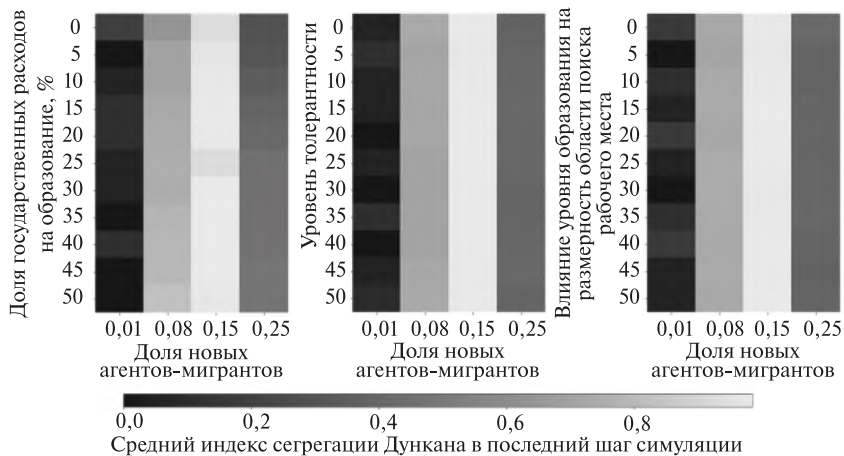


Рис. 14. Зависимость индекса сегрегации Дункана на последнем шаге симуляции от доли государственных расходов на образование, уровня толерантности агентов к соседям и влияния уровня образования на размерность области поиска рабочего места при различных сценариях миграции

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В этой статье была предложен подход к исследованию социально-экономических последствий миграции с учетом государственного регулирования рынка занятости. Разработана расширенная агент-ориентированная имитационная модель взаимодействия коренных жителей и мигрантов, с помощью которой исследованы сегрегационные эффекты и динамика ключевых показателей социально-экономической системы. Модель представляет собой искусственную социально-экономическую систему, состоящую из коренного населения и мигрантов, взаимодействующих друг с другом. При этом индивидуальная система принятия решений каждого агента основана на механизме поиска ближайшего рабочего места с учетом уровня толерантности к соседним агентам, принадлежащим к другому типу, и уровня собственного образования как фактора, влияющего на размерность области поиска рабочего места либо поиска партнера для брака и рождения детей, если уровень личного комфорта превышает некоторый пороговый уровень (см. рис. 1).

Важной особенностью предлагаемого подхода является моделирование взаимодействий между агентами в дискретном пространстве, в рамках которого государство создает два типа трудовых ресурсов: высоко- и низкотехнологичные рабочие места, которые являются аттракторами для коренных жителей и мигрантов соответственно. Другой важной особенностью модели является влияние контактов между агентами-мигрантами и коренными жителями, количество которых влияет на уровень владения местным языком, время ассимиляции агентов-мигрантов. Наконец, третьим преимуществом модели является возможность моделирования влияния эффектов сегрегации, вызванных созданием и распределением рабочих мест на основе кластеров.

Разработанная модель позволила изучить восемь сценариев развития социально-экономической системы, различающихся темпами притока новых мигрантов, различным уровнем государственных расходов на образование и интеграцию, паттернами поведения агентов и др. (см. рис. 5–10). В результате наиболее предпочтительным представляется последний сценарий (сценарий 4.2) трансформации моделей поведения агентов, который обеспечивает наилучшую динамику модели, например численности коренного населения, доли новых мигрантов, темпов роста ВВП и др.

Дальнейшие исследования будут направлены на создание крупномасштабной агент-ориентированной модели социально-экономических последствий миграции с использованием суперкомпьютерных технологий, в частности, реализуемых на платформе имитационного моделирования *Flame GPU2.0* (Richmond, Walker, Coakley et al., 2010), и проведение вариационных экспериментов с использованием методов класса Монте-Карло для более подробного изучения влияния различных параметров модели на ключевые выходные переменные.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

- Акопов А.С.** (2014). Имитационное моделирование: учебник и практикум. М.: ЮРАЙТ. 389 с. [**Akopov A.S.** (2014). *Simulation modeling. Textbook and workshop*. Moscow: YURAJT (in Russian).]
- Белоусов 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).]
- Бреер В.В.** (2016). Модели толерантного порогового поведения (от Т. Шеллинга — к М. Грановеттеру) // *Проблемы управления*. № 1. С. 11–20. [**Breer V.V.** (2016). Models of tolerant threshold behaviour (from T. Schelling to M. Granovetter). *Control Sciences*, 1, 11–20 (in Russian).]
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В.** (2020). Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей // *Экономика и математические методы*. 2020. Т. 56. № 2. С. 5–19. [**Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Akopov A.S., Beklaryan G.L., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V.** (2020). Agent-based modelling of population dynamics of two interacting social communities: migrants and natives. *Economics and Mathematical Methods*, 56 (2), 5–19 (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., Strelkovskii 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).]

- Bacolod M., Rangel M.A.** (2017). Economic assimilation and skill acquisition: Evidence from the occupational sorting of childhood immigrants. *Demography*, 54, 571–602.
- Beklaryan A.L., Akopov A.S.** (2016). Simulation of agent-rescuer behavior in emergency based on modified fuzzy clustering. In: *AAMAS'16: Proceedings of the 2016 International conference on autonomous agents & multiagent systems*. Richland: International foundation for autonomous agents and multiagent systems, 1275–1276.
- Bezdek C.J.** (1974). Cluster validity with fuzzy sets. *Journal of Cybernetics*, 3 (3), 58–73.
- Bezdek C.J.** (1981). *Pattern recognition with fuzzy objective function algorithms*. Norwell (Mass.): Kluwer Academic Publishers.
- Bleakley H., Chin A.** (2010). Age at Arrival, English Proficiency, and Social Assimilation Among US Immigrants. *American Economic Journal: Applied Economics*, 2(1), 165–192.
- Borshchev A.** (2013). *The big book of simulation modeling: Multimethod modeling with AnyLogic 6*. Lisle (IL): AnyLogic North America.
- Bove V., Elia L.** (2017). Migration, diversity, and economic growth. *World Development*, 89, 227–239.
- Dekking M.** (2005). *A modern introduction to probability and statistics: Understanding why and how*. London: Springer.
- Dudley D.O., Lieberman S.** (1959). Ethnic segregation and assimilation. *American Journal of Sociology*, 64 (4), 366–374.
- Duncan O.D., Duncan B.** (1955). Methodological analysis of segregation indexes. *American Sociological Review*, 20 (2), 210–217.
- Gorodzeisky A., Semyonov M.** (2019). Unwelcome immigrants: Sources of opposition to different immigrant groups among Europeans. *Frontiers in Sociology*, 4, 24, 1–10.
- Granovetter M.** (1978). Threshold models of collective behavior. *The American Journal of Sociology*, 83 (6), 1420–1443.
- Jean S., Causa O., Jimenez M., Wanner I.** (2010). Migration and labour market outcomes in OECD countries. *OECD Journal: Economic Studies*, 2010, 1–34.
- Kain J.F.** (1969). Coping with ghetto unemployment. *Journal of the American Institute of Planners*, 35 (2), 80–83.
- Lavrinovicha I., Lavrinenko O., Teivans-Treinovskis J.** (2015). Influence of education on unemployment rate and incomes of residents. *Procedia — Social and Behavioral Sciences*, 174, 3824–3831.
- Lorscheid I., Heine B.O., Meyer M.** (2012). Opening the ‘black box’ of simulations: Increased transparency and effective communication through the systematic design of experiments. *Comput. Math. Organ. Theory*, 18, 22–62.
- Pew Research Center (2020). *A majority of Americans say immigrants mostly fill jobs U.S. citizens do not want*. Washington, Pew Research Center, June 10.
- Richmond P., Walker D., Coakley S., Romano D.** (2010). High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU. *Briefings in Bioinformatics*, 11 (3), 334–347.
- Sabot R.H.** (1982). *Migration and the labor market in developing countries*. New York: Taylor and Francis.
- Schelling T.C.** (1971). Dynamic models of segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*, 1 (2), 143–186.
- Urselmans L., Phelps S.** (2018). A Schelling model with adaptive tolerance. *PLoS ONE*, 13 (3), e0193950.

Agent-based modelling of social and economic impacts of migration under the government regulated employment

© 2022 V.L. Makarov, A.R. Bakhtizin, A.S. Akopov, G.L. Beklaryan, E.A. Rovenskaya, N.V. Strelkovskii

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, Laxenburg, Austria; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; e-mail: rovenska@iiasa.ac.at

N.V. Strelkovskii,

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

Received 16.11.2021

This study was partially funded by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-1-14010 АНФ_a).

Abstract. This article presents an approach to modelling the socio-economic impacts of migration using an agent-based model (ABM) of interactions between migrants and natives. The model also accounts for a regulatory function of government which is the centralized creation of new workplaces that differ in the level of ‘technological return’ (i.e. the labour productivity that depends on the sectoral belonging of the formed workplaces). The proposed approach is based on the previously developed model of interactions between migrants and native individuals. It is focused on studying the socio-economic impacts of migration in the system with a more complex regulatory function of the government, which creates low-technological and high-technological workplaces that are attractive for migrants and natives, respectively. The agent-government has two possible strategies of workplace creation: cluster-based workplace creation in areas with high concentration of migrants and natives and creation of uniform workplaces aimed at increasing multi-particle interactions between agents of different types, and reducing the level of population segregation. This study also investigates the processes of assimilation, which are subject to the level of segregation of the studied communities, public investment in education and integration, etc. The proposed model also considers the influence of various control parameters, in particular, the influence of the agents’ tolerance level on their location choice in a boundary neighbourhood, the influence of the agents’ education level on the job search area dimension, and other important characteristics reflecting the behavioural features of members of the studied communities. Socio-economic impacts of migration are studied under various scenario conditions, which include different patterns of agents’ behaviour belonging to the considered communities, the rate of new migrants’ inflow, the amount of government education expenditures, etc.

Keywords: agent-based migration modelling, government regulation of employment, socio-economic impacts of migration, AnyLogic.

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

Quoting: **Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Akopov A.S., Beklaryan G.L., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V.** (2022). Agent-based modelling of social and economic impacts of migration under the government regulated employment. *Economics and Mathematical Methods*, 58, 1, 113–130. DOI: 10.31857/S042473880018960-5