ЭКОНОМИКА И МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ, 2019, том 55, № 1, с. 3–15

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ

Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского союза

© 2019 г. В.Л. Макаров[i,*], А.Р. Бахтизин[i], Г.Л. Бекларян[i], А.С. Акопов[i], Е.А. Ровенская[ii,], Н.В. Стрелковский[ii]**

[i] *ЦЭМИ, Москва*

[ii] *Международный институт прикладного системного анализа (IIASA), Австрия; МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

[*] *E-mail: makarov@cemi.rssi.ru* [**] *E-mail: rovenska@iiasa.ac.at*

Поступила в редакцию 01.12.2018

Проект выполнен при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 18-51-14010 АНФ_а).

В статье представлена укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского союза (ЕС), реализованная в системе AnyLogic, созданная в виде расширенной гравитационной модели. В модели принятие индивидуальных решений со стороны агентов-мигрантов основывается на комплексной оценке социально-экономической, географической и прочей дифференциации соответствующих стран. При этом одни факторы притягивают мигрантов, а другие отталкивают. Отличительной особенностью модели является дифференциация миграционных потоков по категориям мигрантов с выделением различных влияющих факторов, отражающих индивидуальные предпочтения агентов-мигрантов по отношению к агентам-странам (членам ЕС). Выделяются множественные управляющие параметры, влияющие на распределение миграционных потоков между странами ЕС, в частности миграционные квоты, пособия по безработице, минимальная заработная плата и др. Сформулирована важнейшая бикритериальная оптимизационная задача стран ЕС по выбору рациональной миграционной и экономической политики, основанной, в частности, на максимизации интегрального ВВП и минимизации общего числа мигрантов, за счет управления параметрами, влияющими на структуру миграционных потоков и трудовые ресурсы, а также затраты на их обслуживание. Впервые предложена и изучена расширенная гравитационная модель, описывающая динамику миграционных потоков с выделением множественных факторов, дифференцированно влияющих на привлекательность стран ЕС для различных групп мигрантов, например внутренних мигрантов, экономических мигрантов, беженцев и др.

Ключевые слова: агентное моделирование миграционных потоков, многокритериальная оптимизация, AnyLogic, проблемы миграции в ЕС.

Классификация JEL: B23, F22, J61.

DOI: 10.31857/S042473880004044-7

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время актуализируется задача рационального управления миграционными потоками, в особенности для стран ЕС. Согласно данным статистической службы Европейского союза (Евростат), в общей сложности 4,3 млн человек иммигрировали из внешних стран в страны–члены ЕС в течение 2016 г., и 3,0 млн человек иммигрировали внутри стран ЕС. Однако эти общие показатели не отражают миграционных потоков в целом, поскольку они также включают потоки между различными государствами–членами ЕС. Среди этих 4,3 млн иммигрантов в 2016 г. примерно 2,0 млн человек было из стран, не входящих в ЕС, и 1,3 млн человек — с гражданством другого государства–члена ЕС.

Интерес также представляют темпы роста иммиграции, а также распределение мигрантов по странам–членам ЕС[1]. Так, например, средний темп роста годовой иммиграции в отдельные страны

[1] См.: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=migr_imm1ctz&lang=en.

ЕС в 2014–2016 гг. составил: 30,8% для Греции, 23,0 для Германии, 11,7 для Австрии. По данным за 2016 г., на долю Федеративной Республики Германия приходится примерно 23% всего числа иммигрантов в ЕС. При этом на группу наиболее экономически развитых стран (Федеративная Республика Германия, Франция, Италия, Испания, Великобритания, Австрия, Нидерланды, Швеция) приходится 70% от общего числа мигрантов. Данный факт наглядно демонстрирует существующий дисбаланс в распределении миграционных потоков между странами–членами ЕС, а также влияние хорошо известного гравитационного эффекта, описанного в работах (Stewart, 1955; Yap, 1977; Anderson, 1979; Deardorff, 1998, Lewer, Berg, 2008; Ramos, Suriñach, 2013).

Данный эффект основан на влиянии множественных факторов, и в частности разницы между уровнем жизни в стране, из которой эмигрирует население, и стране, в которую они иммигрируют. Чем больше эта разница, тем более привлекательнее страна является для иммигрантов. Для оценки данной разницы могут быть использованы различные характеристики (например, ВВП (Lewer, Berg, 2008)) или их линейные комбинации (численность населения, уровень безработицы, темпы промышленного роста и др.). Значимость каждого фактора оценивается с помощью эконометрических методов. Могут учитываться географические, исторические, языковые, культурные связи между странами, положительно влияющие на соответствующие миграционные потоки.

Несмотря на очевидные достоинства данного подхода, а именно учет влияния множественных факторов на динамику миграции, а также ориентацию на экономическое выравнивание соответствующих стран, имеются определенные упрощения, связанные с игнорированием проблемы вторичного перераспределения миграционных потоков, а также с их естественной рециркуляцией. Так, например, многие иммигранты, приезжая, в частности, в Грецию и Италию, далее переезжают в экономически более благополучные страны (например, Германию, Великобританию). При этом многие граждане стран–членов ЕС, участвуют во внутренней миграции, обусловленной появлением новых рабочих мест и обучением, с последующим возвращением к месту постоянного проживания.

Поэтому требуется разработка более реалистичной агент-ориентированной имитационной модели миграционных процессов стран Европейского союза, учитывающей механизм перераспределения миграционных потоков внутри стран–членов ЕС с учетом влияния экономической и миграционной политики на темпы миграции и ожидаемые экономические эффекты.

Агентное моделирование позволяет определить правила поведения экономических агентов на индивидуальном уровне (например, агентов-стран, агентов-мигрантов и т.д.), в том числе в зависимости от особенностей поведения каждого агента в популяции. Существует много работ по агентному моделированию. Среди них можно выделить наиболее важные — (Макаров, Бахтизин, 2013; Бахтизин, 2008; Akopov et al., 2017; Grimm, Railsback, 2005; Silveira et al., 2006; Epstein, 2007; Miller, 2008; Klabunde, Willekens, 2016).

В настоящее время также известен гибридный подход, при котором методы агентного моделирования и системной динамики используются совместно (Акопов, 2014). Преимуществом данного подхода является возможность использования методов потокового и динамического моделирования в агентных моделях. Это, в частности, позволяет моделировать потоки взаимодействующих агентов, принимающих решения в соответствии с собственными предпочтениями и правилами поведения.

В основном сложность разработки агентных моделей миграции обусловлена высокой размерностью подобных задач. Так, например, для стран ЕС требуется включить 4,5 млн агентов-мигрантов и 28 агентов-стран со своими характеристиками. Поэтому целесообразен переход от агентов-мигрантов (людей) с индивидуальными правилами поведения к кластерам, включающим группы людей, объединенных общими интересами и предпочтениями с едиными для кластера правилами поведения. Тогда из популяции мигрантов можно выделить следующие группы:

– *группа A* — потенциально работающие неквалифицированные мигранты–граждане ЕС, интересующиеся возможностями трудоустройства на минимальную (среднюю) заработную плату;

– *группа B* — потенциально работающие высококвалифицированные мигранты–граждане ЕС, интересующиеся трудоустройством на максимальную (среднюю) заработную плату и обучением;

– *группа C* — потенциально работающие (в основном) квалифицированные (экономические) мигранты, не являющиеся гражданами стран–членов ЕС;

– *группа D* — потенциально неработающие (в основном) неквалифицированные мигранты (беженцы, безработные), не являющиеся гражданами стран–членов ЕС.

Страны–члены ЕС заинтересованы преимущественно в мигрантах группы *A* и *B*, но, к сожалению, доминирующими по численности, как правило, являются группы *C* и *D*. При этом экономический эффект от группы *C* является неочевидным, особенно в условиях высокой безработицы (например, для таких стран, как Греция, Италия, Испания и др.), а экономический эффект от группы *D*, возможно, будет отрицательным. Таким образом, для принимающих стран важно прогнозировать не только общую численность миграционных потоков, но также их структуру.

Помимо выделения групп мигрантов с различными предпочтениями целесообразно перейти к кластерам агентов-мигрантов, включающих 1 тыс. человек/кластер, распределенных по своим группам (*A*, *B*, *C*, *D*). Это позволит существенно снизить размерность модели (до 4,5–5 тыс. агентов) и обеспечить эффективную процедуру поиска рациональных решений в области миграционной политики. Подобный подход, т.е. переход от агентов-людей к людским кластерам, ранее был предложен в работе (Beklaryan, Akopov, 2016).

Цель данной статьи состоит в разработке укрупненной агент-ориентированной имитационной модели миграционных потоков стран Европейского союза с реализацией в системе AnyLogic, с использованием предложенной расширенной гравитационной модели, в соответствии с которой принятие индивидуальных решений со стороны агентов-мигрантов основывается на комплексной оценке социально-экономической, географической и прочей дифференциации соответствующих стран. В рамках предложенного подхода сформулирована важнейшая бикритериальная оптимизационная задача стран ЕС по выбору рациональной миграционной и экономической политики, основанной, в частности, на минимизации общего числа мигрантов и максимизации ВВП, за счет управления различными параметрами.

2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ

Предложенная укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран ЕС включает следующие типы агентов:

– *агенты-мигранты* (кластеры людей), дифференцируемые по типам *A*, *B*, *C*, *D* в зависимости от социального статуса и индивидуальных предпочтений на момент миграции;

– *агенты-страны, являющиеся членами ЕС*: 28 стран–членов ЕС, между которыми осуществляется внутреннее перераспределение миграционных потоков;

– *агенты-страны, не являющиеся членами ЕС,* из которых имеются основные миграционные потоки в страны ЕС.

Группа агентов-мигрантов характеризуется следующим набором состояний:

– *потенциальный мигрант* — человек, проживающий на территории определенного государства (не обязательно страны–члена ЕС) и находящийся в поиске страны, наиболее предпочтительной для иммиграции;

– *фактический мигрант* — человек, осуществивший иммиграцию в ранее выбранную страну;

– *репатриант* — человек, осуществивший добровольное возвращение на родину;

– *депортированный мигрант* — человек, осуществивший принудительное возвращение в страну, из которой он ранее иммигрировал.

Через некоторое время фактический мигрант может стать потенциальными мигрантом — так реализуется механизм вторичного перераспределения миграционных потоков. Фактический мигрант через некоторое время может стать репатриантом — так реализуется механизм рециркуляции миграционных потоков. Схема состояний агентов-мигрантов и переходов между ними представлена на рис. 1.

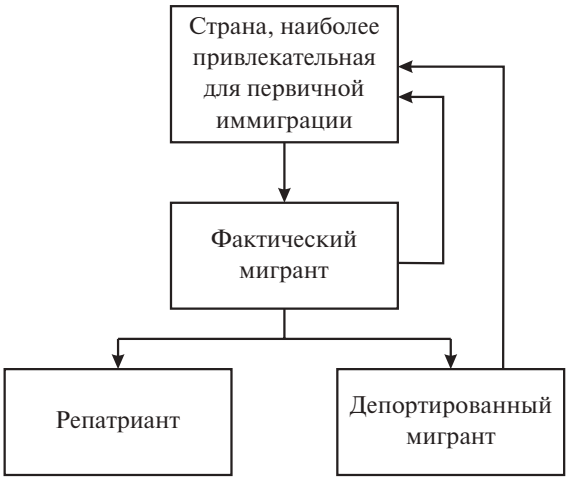

Рис. 1. Схема возможных состояний для агентов-мигрантов

Группа агентов-стран, являющихся членами ЕС, характеризуется набором состояний:

– *страна, наиболее привлекательная для первичной иммиграции,* — страна–член ЕС, наиболее привлекательная для иммигрантов групп *C* и *D* (т.е. для менее квалифицированных мигрантов, не являющихся гражданами стран–членов ЕС). В данную группу стран входят Греция, Италия, Испания, Австрия, Польша, Румыния, Эстония, Литва, Латвия, Венгрия, Болгария;

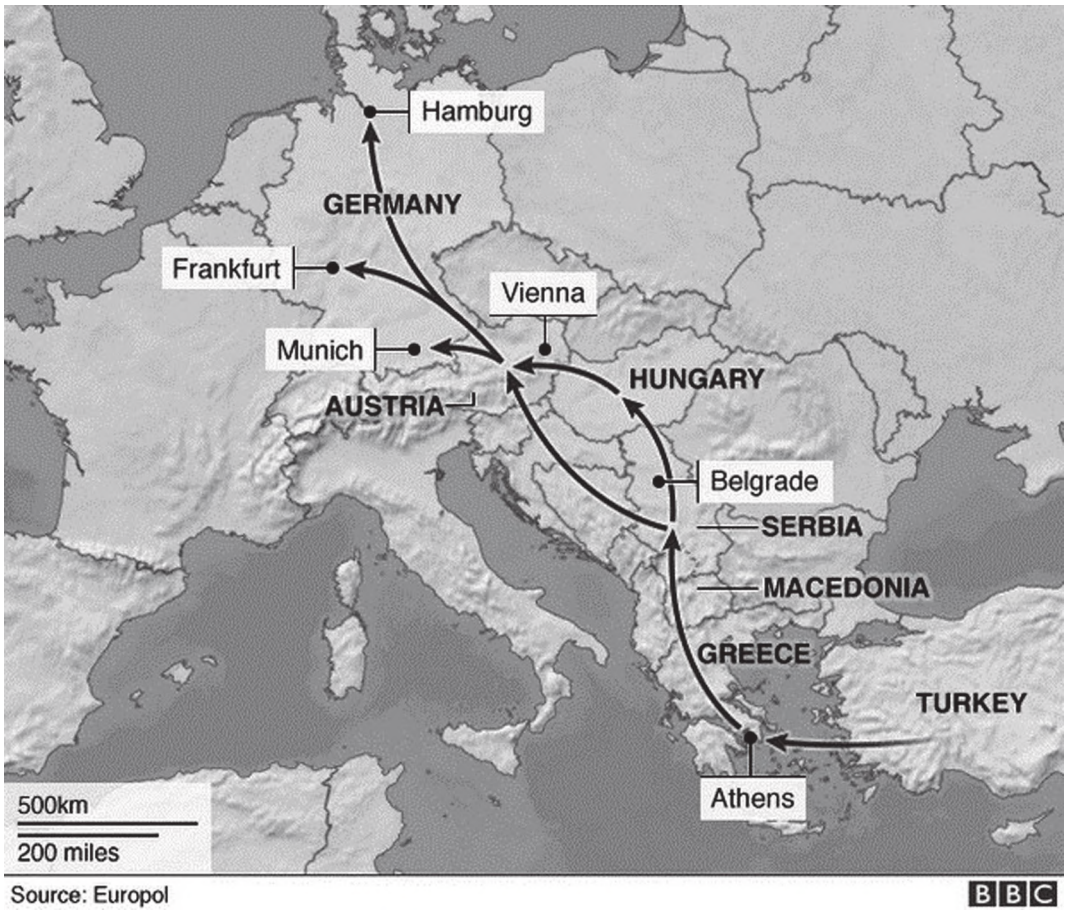

Рис. 2. Путь мигрантов из стран Ближнего Востока в страны–члены ЕС

Источник: BBC/Europol: https://www.gazeta.ru/social/2015/09/14/7755377.shtml?updated.

– *страна, наиболее привлекательная для внутренней и вторичной иммиграции,* — страна–член ЕС, наиболее привлекательная для иммигрантов всех групп с учетом их индивидуальных предпочтений. В данную группу стран входят Германия, Франция, Великобритания, Швеция, Дания, Норвегия, Швейцария, Нидерланды, Бельгия, Ирландия и др.

Отметим, что для стран первичной миграции в рамках расширенной гравитационной модели действует повышающий коэффициент, т.е. страны этой группы выбираются в основном с целью последующей иммиграции в другие страны вне зависимости от их текущего социально-экономического положения. Выбор конкретной страны среди стран данной группы осуществляется в основном под влиянием географических факторов, в частности с учетом действующих маршрутов основных миграционных потоков (рис. 2).

При определенных условиях (например, в случае серьезного ужесточения миграционного законодательства) агент-страна, наиболее привлекательная для первичной иммиграции, может перейти во второе состояние, т.е. стать наиболее привлекательной для внутренней и вторичной иммиграции. В этом случае для данной страны действуют правила стандартной гравитационной модели, т.е. относительная привлекательность страны для иммиграции оценивается на основе разницы линейной комбинации (логарифмированных) значений отдельных социально-экономических показателей, учитывающих индивидуальные предпочтения мигрантов (например, ВВП на душу населения, средняя заработная плата, уровень безработицы и др.). Схема соответствующих состояний агентов-стран, являющихся членами ЕС, и переходов между ними представлена на рис. 3.

Рис. 3. Схема возможных состояний для агентов-стран, являющихся членами ЕС

Третья группа агентов — страны, не являющиеся членами ЕС, из которых реализуются основные миграционные потоки в страны ЕС. В основном это страны Ближнего Востока, страны Африки, Афганистан и др. В этой группе стран доминируют мигранты групп С и *D* (экономические мигранты и беженцы). Имеется ряд стран, обеспечивающих стабильно высокий уровень миграционных потоков в страны ЕС, например Сирия, Ливия, Эритрея, Пакистан и др.

Третья группа агентов-стран, не являющихся членами ЕС, характеризуется набором состояний:

– *кризисное социально-экономическое состояние*, соответствующее ситуации экономического кризиса, военных действий, революции, голода и т.д., приводящее к экспоненциальному росту миграционного потока из страны (например, Сирия, Ливия, Ирак и др.);

– *неудовлетворительное социально-экономическое состояние*, соответствующее ситуации слабой (стагнирующей) экономики, характеризующееся линейным ростом миграционного потока из страны (например, Афганистан, Украина, Сербия (Косово), Пакистан и др.);

– *удовлетворительное социально-экономическое состояние*, соответствующее ситуации развивающейся экономики и демографии, характеризующееся стабильным миграционным потоком (например, Индия, Иран, Турция).

Схема соответствующих состояний агентов-стран, не являющихся членами ЕС, и переходов между ними представлена на рис. 4.

Рис. 4. Схема возможных состояний для агентов-стран, не являющихся членами ЕС

Состояния агентов-стран, не являющихся членами ЕС, влияют на темпы роста эмиграции из соответствующих стран. Самый высокие темпы эмиграции будут из стран, находящихся в кризисном состоянии.

Далее рассмотрим формальное описание разработанной модели. Пусть индекс i указывает на страну–члена ЕС; e — страну, не являющуюся членом ЕС; j — страну прибытия. Введем следующие обозначения:

$\tilde{T} = \{t_1, ..., t_T\}$ — набор модельных моментов времени (по годам), T — горизонт стратегического планирования (30 лет);

$\tilde{I} = \{i_1, ..., i_I\}$ — набор индексов (внутренних) стран-агентов, являющихся членами ЕС, из которых осуществляется эмиграция в другие страны–члены ЕС (страна-источник), I — общее число стран–членов ЕС, в частности $I = 28$ на 2018 г.;

$\tilde{E} = \{e_1, ..., e_E\}$ — набор индексов (внешних) стран-агентов, не являющихся членами ЕС, из которых осуществляется массовая эмиграция в страны–члены ЕС, E — общее число стран, являющихся внешними источниками миграционных потоков;

$\tilde{J} = \{j_1, ..., j_I\}$ — набор индексов стран-агентов, являющихся членами ЕС, в которые осуществляется эмиграция из других i стран–членов ЕС, и e стран, не являющихся членами ЕС (страны прибытия), $i \in \tilde{I}$, $e \in \tilde{E}$;

$\{D_{ij}, D_{ej}\}$ — географические расстояния между страной-источником и страной прибытия (расстояние между столицами стран), $i \in \tilde{I}$, $e \in \tilde{E}$, $j \in \tilde{J}$;

$\{\tilde{D}_{ij}, \tilde{D}_{ej}\}$ — климатическая разница между страной-источником и страной прибытия (разница среднегодовых температур между столицами стран);

$\{P_i(t), P_e(t), P_j(t)\}$ — численность населения в момент времени t, $t \in \tilde{T}$;

$\{A_i, A_e, A_j\}$ — площади стран;

$\{\tilde{P}_{ij}(t), \tilde{P}_{ej}(t)\}$ — численность населения, ранее (за последние 10 лет) иммигрировавшего из страны-источника в страну прибытия;

$\{G\ P_i(t), GDP_e(t), GDP_j(t)\}$ — ВВП на душу населения;

$\{S_i(t), S_e(t), S_j(t)\}$ — средняя заработная плата;

$\{\underline{S}_i(t), \underline{S}_e(t), \underline{S}_j(t)\}$ — минимальная заработная плата (управляющий параметр);

$W_j(t)$ — средний размер пособия для лиц, получивших статус беженца (управляющий параметр);

$B_j(t)$ — средний размер пособия по безработице (управляющий параметр);

$\{U_i(t), U_e(t), U_j(t)\}$ — уровень безработицы;

$N_j(t)$ — число ведущих университетов (ТОП-100) в стране прибытия в момент времени t;

$\{\tilde{C}_i(t),\ \tilde{C}_j(t)\}$ — стоимость получения высшего образования в стране-источнике и стране прибытия *(управляющий параметр)*;

$\{LANG_{ij},\ LANG_{ej}\}$ — фиктивные переменные, отражающие наличие общего (или свободное значение) официального языка между страной-источником и страной прибытия;

$\{BORD_{ij},\ BORD_{ej}\}$ — фиктивные переменные, отражающие наличие общих границ между страной-источником и страной прибытия *(управляющий параметр)*;

CL_{ej} — доля людей в стране-источнике, владеющих (как минимум на базовом уровне) официальным языком страны прибытия;

R_{ej} — фиктивная переменная, отражающая наличие общих связей (колониальных, культурных, исторических) между страной-источником и страной прибытия;

$M_j(t)$ — количество мигрантов в страну прибытия в момент времени t;

$\bar{M}_C(t)$ — максимальное допустимое число мигрантов категории C (высококвалифицированных мигрантов) из стран, не являющихся членами ЕС, в страну прибытия (управляющий параметр);

$\bar{M}_D(t)$ — максимально допустимое количество мигрантов категории D (беженцев) из стран, не являющихся членами ЕС, в страну прибытия (управляющий параметр);

$\kappa_j(t)$ — коэффициент, отражающий статус страны прибытия, являющейся членом ЕС (страна для первичной иммиграции или страна конечной иммиграции);

$\gamma_e(t)$ — коэффициент, отражающий статус страны-источника, не являющейся членом ЕС (кризисное, неудовлетворительное, удовлетворительное).

Тогда для $i \in \tilde{I},\ j \in \tilde{J},\ t \in \tilde{T}$ предлагаемая расширенная гравитационная модель миграции (число мигрантов в стране прибытия j в момент времени t) имеет вид:

$$M_j(t) = \begin{cases} F_{j,AB}(t) + F_{j,CD}(t), & 5A;\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,C}(t) \le \bar{M}_C(t)\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t) \le \bar{M}_D(t); \\ F_{j,AB}(t) + \bar{M}_C(t) + \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ij,D}(t), & 5A;\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,C}(t) > \bar{M}_C(t)\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t) \le \bar{M}_D(t); \\ F_{j,AB}(t) + \bar{M}_D(t) + \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ij,'}(t), & 5A;\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t) > \bar{M}_D(t)\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t) \le \bar{M}_C(t); \\ F_{j,AB}(t), & 5A;\ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,C}(t) > \bar{M}_C(t)\ \ 8\ \sum\limits_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t) > \bar{M}_D(t); \end{cases} \tag{1}$$

где годовой приток внутренних мигрантов из стран–членов ЕС —

$$F_{j,AB}(t) = \sum_{i=1}^{I} \left(fl_{ij,A}(t) + fl_{ij,B}(t) \right), \tag{2}$$

годовой приток внутренних мигрантов категории A из страны–члена ЕС —

$$\begin{aligned} \ln fl_{ij,A}(t) = \beta_{1,A} \ln \frac{GDP_j(t)}{GDP_i(t)} + \beta_{2,A} \ln \frac{\underline{S}_j(t)}{\underline{S}_i(t)} - \beta_{3,A} \ln \frac{U_j(t)}{U_i(t)} + \beta_{4,A} \ln P_j(t) + \beta_{5,A} \ln P_i(t) - \\ -\beta_{6,A} \ln \frac{P_j(t)}{A_j(t)} + \beta_{7,A} \ln \frac{P_i(t)}{A_i(t)} - \beta_{8,A} \ln D_{ij} - \beta_{9,A} \ln \tilde{D}_{ij} + \beta_{10,A} \ln \tilde{P}_{ij}(t) + \beta_{11,A} LANG_{ij} + \beta_{12,A} BORD_{ij}, \end{aligned} \tag{3}$$

годовой приток внутренних мигрантов категории B из страны–члена ЕС —

$$\begin{aligned} \ln fl_{ij,B}(t) = \beta_{1,B} \ln \frac{GDP_j(t)}{GDP_i(t)} + \beta_{2,B} \ln \frac{S_j(t)}{S_i(t)} - \beta_{3,B} \ln \frac{U_j(t)}{U_i(t)} - \beta_{4,B} \ln P_j(t) + \beta_{5,B} \ln P_i(t) - \\ -\beta_{6,B} \ln \frac{P_j(t)}{A_j(t)} + \beta_{7,A} \ln \frac{P_i(t)}{A_i(t)} - \beta_{8,B} \ln D_{ij} - \beta_{9,B} \ln \tilde{D}_{ij} + \beta_{10,B} \ln \tilde{P}_{ij}(t) + \beta_{11,B} LANG_{ij} + \\ +\beta_{12,B} BORD_{ij} + \beta_{13,B} \ln N_j - \beta_{14,B} \ln \frac{\tilde{C}_j(t)}{\tilde{C}_i(t)}, \end{aligned} \tag{4}$$

годовой приток внешних мигрантов из стран, не являющихся членами ЕС,—

$$F_{j,CD}(t)=\sum_{e=1}^{E}\left(fl_{ej,C}(t)+fl_{ej,D}(t)\right), \tag{5}$$

годовой приток внешних мигрантов категории C из страны e, не являющейся членом ЕС,—

$$\begin{aligned}\ln fl_{ej,C}(t)=\gamma_e(t)\kappa_j(t)\Big(&\beta_{1,C}\ln\frac{GDP_j(t)}{GDP_e(t)}+\beta_{2,C}\ln\frac{\underline{S}_j(t)}{\underline{S}_e(t)}-\beta_{3,C}\ln\frac{U_j(t)}{U_e(t)}-\beta_{4,C}\ln P_j(t)+\\&+\beta_{5,C}\ln P_i(t)-\beta_{6,C}\ln\frac{P_j(t)}{A_j(t)}+\beta_{7,C}\ln\frac{P_e(t)}{A_e(t)}-\beta_{8,C}\ln D_{ej}-\beta_{9,C}\ln\tilde{D}_{ej}+\beta_{10,C}\ln\tilde{P}_{ej}(t)+\\&\beta_{11,C}LANG_{ej}+\beta_{12,C}\ln CL_{ej}+\beta_{13,C}\ln R_{ej}\Big),\end{aligned} \tag{6}$$

годовой приток внешних мигрантов категории D из страны, не являющейся членом ЕС,—

$$\begin{aligned}\ln fl_{ej,D}(t)=\gamma_e(t)\kappa_j(t)\Big\{&\beta_{1,D}\ln\frac{GDP_j(t)}{GDP_e(t)}+\beta_{2,D}\ln W_j-\beta_{3,D}\ln\frac{P_j(t)}{A_j(t)}+\\&+\beta_{4,D}\ln\frac{P_e(t)}{A_e(t)}+\beta_{5,D}\ln P_i(t)+\beta_{6,D}\ln B_j(t)-\beta_{7,D}\ln D_{ej}+\beta_{8,D}\ln\tilde{P}_{ej}(t)+\beta_{9,D}\ln CL_{ej}.\end{aligned} \tag{7}$$

Здесь $\{\beta_{1,A},\ldots,\beta_{12,A}\}$, $\{\beta_{1,B},\ldots,\beta_{14,B}\}$, $\{\beta_{1,C},\ldots,\beta_{13,C}\}$, $\{\beta_{1,D},\ldots,\beta_{9,D}\}$ — коэффициенты регрессии, вычисляемые методом наименьших квадратов (МНК) с использованием имеющихся исторических данных.

Поясним логику расширенной гравитационной модели на примере уравнения (3). Основными факторами притяжения мигрантов–граждан ЕС, не обладающих высокой квалификацией, являются прежде всего ключевые социально-экономические показатели принимающей страны. Чем выше значение ВВП и минимальная заработная плата, чем меньше уровень безработицы по сравнению с соответствующими значениями в стране-источнике, тем более привлекательной будет данная страна для потенциального мигранта. Также имеет значение численность и плотность населения. Чем больше численность населения, тем больше рынок труда и, соответственно, больше возможностей трудоустройства для мигранта. Однако чем выше плотность населения (отношение численности населения к площади страны), тем дороже стоимость покупки и аренды недвижимости, что снижает привлекательность данной страны для иммиграции. Также имеют значения географические расстояния между странами и климатическая разница между ними. Чем меньше расстояние между странами и более схожий климат, тем страна предпочтительнее для миграции. Дополнительными положительными факторами служит наличие общих границ, а также свободное знание официального языка принимающей страны. Другой пример — мигранты категории D из стран, не являющихся членами ЕС. Для данной группы мигрантов основное значение имеет размер пособия по безработице и уровень выплат за статус беженца, а возможности трудоустройства их практически не интересуют (7).

Отметим, что достоверность модели (1)—(7) оценивалась с использованием реальных данных (Евростат), дифференцированных по соответствующим странам за исторический период 2007–2016 гг.

Важной отличительной особенностью предлагаемой расширенной гравитационной модели (1)—(7) является дифференциация миграционных потоков по категориям мигрантов с выделением различных влияющих факторов, отражающих индивидуальные предпочтения агентов-мигрантов по отношению к агентам-странам.

Для страны–члена ЕС j, $j\in\tilde{J}$, $t\in\tilde{T}$, введем следующие обозначения: $L_j(t)$ — численность высококвалифицированных трудовых ресурсов (работники, имеющие высшее и профессиональное образование); $\tilde{L}_j(t)$ — численность низкоквалифицированных трудовых ресурсов (работники, не имеющие высшего образования); $K_j(t)$ — основные фонды высокотехнологичных отраслей эконо-

мики j; $\tilde{K}_j(t)$ — основные фонды прочих отраслей экономики; $\{\alpha_j, \beta_j\}$, $\{\tilde{\alpha}_j, \tilde{\beta}_j\}$ — эластичности выпуска по отношению к основным фондам и трудовым ресурсами в высокотехнологичных и прочих отраслях экономики, $\alpha_j + \beta_j = 1$, $\tilde{\alpha}_j + \tilde{\beta}_j = 1$; a_j — фактор научно-технологического прогресса в высокотехнологичных отраслях экономики; $\{G_j(t), \tilde{G}_j(t)\}$ — промежуточное потребление в высокотехнологичных и прочих отраслях экономики (в стоимостном выражении); $Const_j(t)$ — прочие постоянные издержки экономики.

Тогда динамика ВВП для страны–члена ЕС с учетом влияния миграционных потоков может быть записана в виде

$$\begin{gathered} GDP_j(t) = \left(a_j K_j^{\alpha_j}(t) L_j^{\beta_j}(t) - G_j^t(t)\right) + \left(\tilde{K}_j^{\tilde{\alpha}_j}(t) \tilde{L}_j^{\tilde{\beta}_j}(t) - \tilde{G}_j^t(t)\right) - \left(B_j(t) + W_j(t)\right) \times \\ \times \sum_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t) - \left(L_j(t) S_j(t) + \tilde{L}_j(t) \underline{S}_j(t)\right) - Const_j(t), \\ j \in \tilde{J},\ t \in \tilde{T}, \end{gathered} \tag{8}$$

где численность высококвалифицированных трудовых ресурсов —

$$L_j(t) = L_j(t-1) + \sum_{i=1}^{I} fl_{ij,B}(t) + \sum_{e=1}^{E} fl_{ej,C}(t); \tag{9}$$

численность низкоквалифицированных трудовых ресурсов —

$$\tilde{L}_j(t) = \tilde{L}_j(t-1) + \sum_{i=1}^{I} fl_{ij,A}(t) + \sum_{e=1}^{E} fl_{ej,D}(t). \tag{10}$$

Теперь можно сформулировать важнейшую **бикритериальную задачу рационального управления миграционными потоками** для страны–члена ЕС.

Задача А. Требуется максимизировать интегральный ВВП и минимизировать общее число иммигрантов по набору управляющих параметров $\left\{S_j(t), \underline{S}_j(t), B_j(t), W_j(t), \bar{M}_C(t), \bar{M}_D(t)\right\}$ за период времени T:

$$\begin{gathered} \sum_{t=1}^{T} GDP_j(t) \to \max_{S_j(t),\, \underline{S}_j(t),\, B_j(t),\, W_j(t),\, \bar{M}_C(t),\, \bar{M}_D(t)}; \\ \sum_{t=1}^{T} M_j(t) \to \min_{S_j(t),\, \underline{S}_j(t),\, B_j(t),\, W_j(t),\, \bar{M}_C(t),\, \bar{M}_D(t)} \end{gathered} \tag{11}$$

при ограничениях:

$$\begin{gathered} \underline{S}_j(t) \le S_j(t) \le \bar{S}_j(t), \quad \underline{S}_{\min j}(t) \le \underline{S}_j(t) \le S_j(t), \\ \underline{B}_j(t) \le B_j(t) \le \bar{B}_j(t), \quad \underline{W}_j(t) \le W_j(t) \le \bar{W}_j(t), \\ 0 \le \bar{M}_C(t) \le \bar{M}_{\max C}(t), \quad 0 \le \bar{M}_D(t) \le \bar{M}_{\max D}(t), \\ j \in \tilde{J}, \quad t \in \tilde{T}. \end{gathered}$$

Здесь $\{\underline{S}_j(t), \bar{S}_j(t), \underline{S}_{\min j}(t)\}$, $\{\underline{B}_j(t), \bar{B}_j(t)\}$, $\{\underline{W}_j(t), \bar{W}_j(t)\}$, $\{\bar{M}_{\max C}(t), \bar{M}_{\max D}(t)\}$ — граничные значения соответствующих управляющих параметров.

Отметим, что сложность решения задачи (11) обусловлена большим числом управляющих параметров, характеризуемых непрерывным пространством поиска большой размерности. Целевые функционалы задачи (11) вычисляются в результате имитационного моделирования и не могут быть описаны аналитически. Необходимо учитывать высокую размерность задачи, определяемую числом соответствующих стран. Поэтому для численного решения подобной задачи предлагается использовать генетический оптимизационный алгоритм вещественного кодирования (класса RCGA), агрегированный с имитационной моделью AnyLogic. Подобный подход ранее был описан в работе (Бекларян, 2018).

Особенностью данного генетического алгоритма является реализация методов поисковой адаптации на индивидуальном уровне агентов-процессов, взаимодействующих посредством периодического обмена наилучшими потенциальными решениями через глобальный архив недоминируемых решений. В результате обеспечивается эффективная процедура поиска оптимальных по Парето решений для многокритериальных оптимизационных задач большой размерности.

3. КОМПЬЮТЕРНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ МОДЕЛИ

Компьютерная реализация разработанной укрупненной модели миграционных потоков была выполнена в системе AnyLogic. Для моделирования процессов перераспределения миграционных потоков между странами ЕС применялись методы системной динамики, ранее описанные в работе (Акопов, 2015) (рис. 5).

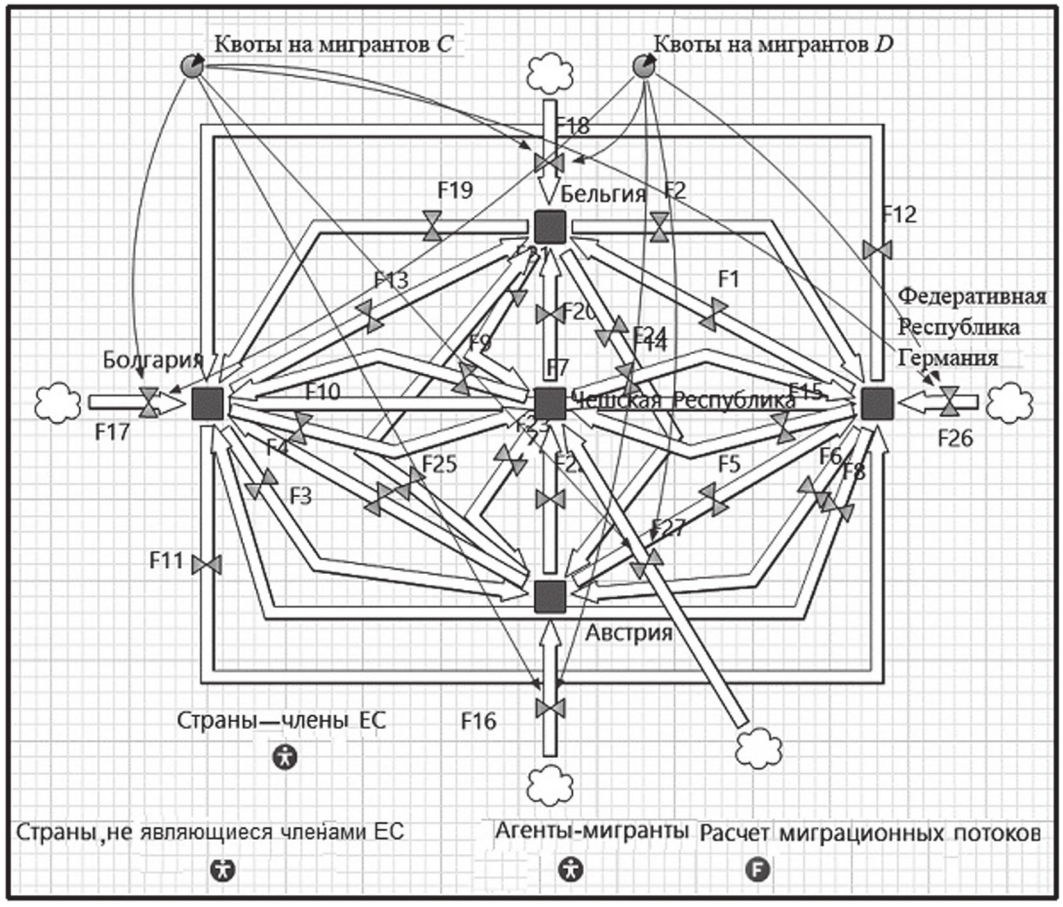

Рис. 5. Фрагмент реализация модели миграционных потоков в AnyLogic

Для моделирования индивидуальных состояний агентов-мигрантов, агентов-стран, являющихся членами ЕС, и агентов-стран, не являющихся членами ЕС, используются методы агентного моделирования (рис. 6). Подобный подход позволяет учесть влияние состояний агентов на динамику миграционных потоков, в частности, если агент-страна, не являющаяся членом ЕС, находится в кризисном состоянии, то интенсивность миграции из данной страны в страны ЕС резко возрастает.

Итак, в данной статье впервые была представлена расширенная гравитационная модель, описывающая динамику миграционных потоков с выделением множественных факторов, дифференцированно влияющих на привлекательность стран ЕС для различных групп мигрантов. Разработанная модель использует методы агентного моделирования для реализации индивидуальной

системы предпочтений агентов-мигрантов по отношению к различным странам ЕС, а также методы системной динамики для моделирования процессов перераспределения миграционных потоков между странами ЕС.

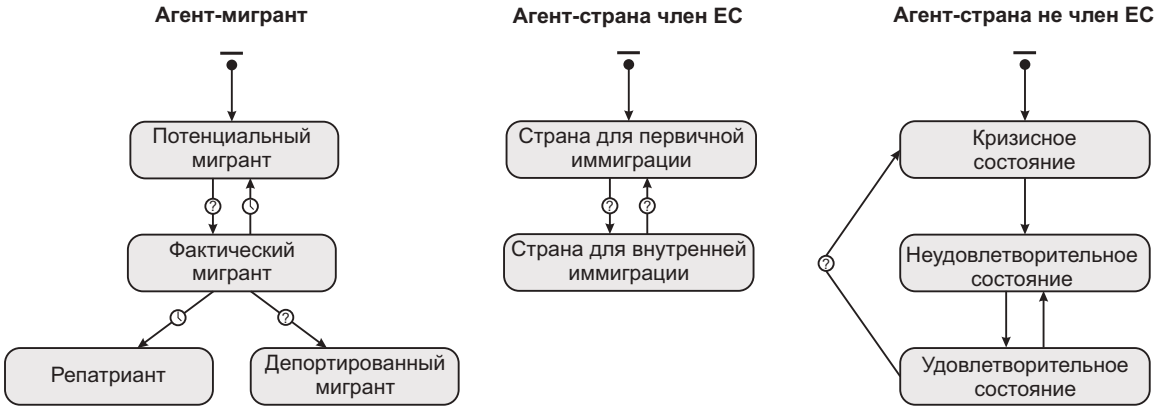

Рис. 6. Фрагмент реализации модели состояний агентов-мигрантов и агентов-стран в AnyLogic

Дальнейшие исследования предполагают следующие направления:

– проведение численных экспериментов и сценарных расчетов с использованием реальных данных с детализацией по странам ЕС и категориям мигрантов;

– дальнейшая детализация структуры миграционных потоков с уточнением соответствующих индивидуальных предпочтений на уровне кластеров мигрантов;

– проведение множественных оптимизационных экспериментов для одной из стран ЕС (в частности, Австрии) с целью определения рациональной миграционной политики;

– визуализация миграционных потоков на карте ЕС.

В результате будет разработана крупномасштабная система поддержки принятия решений в области миграционной политики с использованием методов имитационного моделирования и многоцелевой (эвристической) оптимизации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Акопов А.С. (2015). Имитационное моделирование. Учебник и практикум. М.: ЮРАЙТ.

Бекларян Г.Л. (2018). Укрупненная имитационная модель внешнеэкономической деятельности РФ // *Экономическая наука современной России*. № 4. С. 50–65.

Бахтизин А.Р. (2008). Агент-ориентированные модели экономики. М.: Экономика.

Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. (2013). Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика.

Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K. (2017). Agent-Based Modelling for Ecological Economics: A Case Study of the Republic of Armenia // *Ecological Modelling*. Vol. 346. P. 99–118.

Anderson J.E. (1979). A Theoretical Foundation for the Gravity Equation // *American Economic Review*. Vol. 69. P. 106–116.

Beklaryan A., Akopov A.S. Simulation of Agent-rescuer Behaviour 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"*. P. 1275–1276.

Deardorff A. (1998). Determinants of Bilateral Trade: Does Gravity Work in a Classical World? In: Frankel J.A. (ed.)*"Regionalization of the World Economy"*. Chicago: University of Chicago. P. 7–22.

Epstein J. (2007). Generative Social Science. Studies in Agent-Based Computational Modeling. Hardcover.

Grimm V., Railsback S.F. (2005). Individual-Based Modeling and Ecology. Princeton: Princeton University Press.

Klabunde A., Willekens F. (2016). Decision-Making in Agent-Based Models of Migration: State of the Art and Challenges // *European Journal of Population*. Vol. 32. No. 1. P. 73–97.

Lewer J.J., Berg H.V.D. (2008). A Gravity Model of Immigration // *Economics Letters*. Vol. 99 (1). P. 164–167.

Miller J.H. (2007). Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life. Princeton: Princeton Studies in Complexity.

Ramos R., Suriñach J. (2013). A Gravity Model of Migration between ENC and EU. [Электронный ресурс] Working Paper 2013/17. P. 26. Режим доступа: http://www.ub.edu/irea/working_papers/2013/201317.pdf, свободный. Загл. с экрана. Яз. англ. (дата обращения: сентябрь 2018 г.).

Silveira J.J., Espíndola A.L., Penna T.J.P. (2006). Agent-Based Model to Rural-Urban Migration Analysis // *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*. Vol. 364. P. 445–456.

Stewart Q.J. (1950). The Development of Social Physics // *American Journal of Physics*. Vol. 18. P. 239–253.

Yap Y.L. (1977). The Attraction of Cities: A Review of the Migration Literature // *Journal of Development Economics*. Vol. 4 (3). P. 239–264.

REFERENCES (with English translation or transliteration)

Akopov A.S. (2015). Simulation modeling. Textbook and workshop. [Imitacionnoe Modelirovanie. Uchebnik i praktikum.] Moscow: YURAJT (in Russian).

Akopov A.S., Beklaryan L.A., Saghatelyan A.K. (2017). Agent-Based Modelling for Ecological Economics: A Case Study of the Republic of Armenia. *Ecological Modelling*, 346, 99–118.

Anderson J.E. (1979). A Theoretical Foundation for the Gravity Equation. *American Economic Review*, 69, 106–116.

Bakhtizin A.R. (2008). (2008). Agent-Based Models of the Economy. [Agent-orientirovannye modeli ehkonomiki.] Moscow: Ekonomika (in Russian).

Beklaryan G.L. (2018). Aggregated Simulation Model of Foreign Economic Activity of the Russian Federation. *Economic Science of Contemporary Russia*, 4, 50–65 (in Russian).

Beklaryan A., Akopov A.S. Simulation of Agent-rescuer Behaviour 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.

Deardorff A. (1998). Determinants of Bilateral Trade: Does Gravity Work in a Classical World? In: Frankel J.A. (ed.)*"Regionalization of the World Economy".* Chicago: University of Chicago, 7–22.

Epstein J. (2007). Generative Social Science. Studies in Agent-Based Computational Modeling. Hardcover.

Grimm V., Railsback S.F. (2005). Individual-based Modeling and Ecology. Princeton: Princeton University Press.

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.

Lewer J.J., Berg H.V.D. (2008). A Gravity Model of Immigration. *Economics Letters*, 99 (1), 164–167.

Makarov V.L., Bakhtizin A.R. (2013). Social Modeling Is a New Computer Breakthrough (Agent-Based Models). [Social'noe modelirovanie — novyj komp'yuternyj proryv (agent-orientirovannye modeli).] Moscow: Ekonomika (in Russian).

Miller J.H. (2007). Complex Adaptive Systems: An Introduction to Computational Models of Social Life. Princeton: Princeton Studies in Complexity.

Ramos R., Suriñach J. (2013). A Gravity Model of Migration between ENC and EU. Working Paper 2013/17, 26. Available at: http://www.ub.edu/irea/working_papers/2013/201317.pdf (accessed: September 2018).

Silveira J.J., Espíndola A.L., Penna T.J.P. (2006). Agent-Based Model to Rural-Urban Migration Analysis. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 364, 445–456.

Stewart Q.J. (1950). The Development of Social Physics. *American Journal of Physics,* 18, 239–253.

Yap Y.L. (1977). The Attraction of Cities: A Review of the Migration Literature. *Journal of Development Economics,* 4 (3), 239–264.

Aggregated Agent-Based Simulation Model of Migration Flows of the European Union Countries

V.L. Makarov[i,*], A.R. Bakhtizin[i], G.L. Beklaryan[i], A.S. Akopov[i], E.A. Rovenskaya[ii,], N.V. Strelkovskii[ii]**

[i] *Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*
[ii] *International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria; Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*
[*] *E-mail: makarov@cemi.rssi.ru* [**] *E-mail: rovenska@iiasa.ac.at*

Received 01.12.2018

This study was financial partially supported by the Russian Foundation for Basic Research (project 18-51-14010 АНФ_а).

This article presents the aggregated agent-based simulation model of migration flows of the European Union (EU) countries, implemented in the AnyLogic system, created in the form of an extended "gravity model", according to which individual decisions by agent-migrants are based on the integrated assessment of socio-economic, geographical and other differentiation of the respective countries. At the same time, some factors 'attract' migrants, while others 'repel'. A distinctive feature of the model is the differentiation of migration flows by the categories of migrants with the release of various influencing factors that reflect the individual preferences of agent-migrants regarding to the agents-countries (EU members). At the same time, there are multiple control parameters that affect the distribution of migration flows between the EU countries, in particular, migration quotas, unemployment benefits, minimum wages, etc. The most important bicriterial optimization task of EU countries for choosing rational migration and economic policies based on maximizing integral GDP and minimizing the total number of migrants has been formulated. The issue is aimed to control parameters that affect the structure of migration flows and labor resources, as well as their maintenance costs. For the first time, an expanded gravitational model has been proposed and studied, describing dynamic migration flows with the release of multiple factors that differentiate the attractiveness of EU countries for various groups of migrants, for example, internal migrants, economic migrants, refugees, etc.

Keywords: agent-based modeling of migration flows, multi-criteria optimization, AnyLogic, problems of migration to the EU.

JEL Classification: B23, F22, J61.

DOI: 10.31857/S042473880004044-7