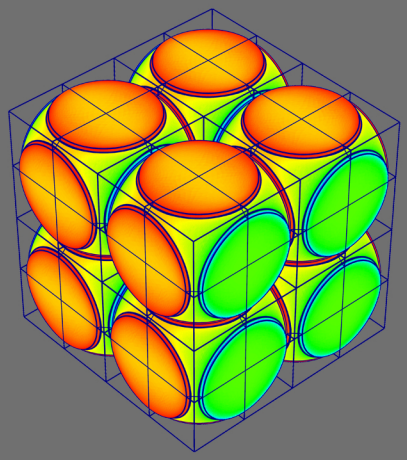
ISSN 2309-3684



Математическое моделирование и численные методы

Белотелов Н.В. Имитационная модель процессов миграции в странах с учетом уровня образования. Математическое моделирование и численные методы, 2019, № 4, с. 91–99.

Источник: https://mmcm.bmstu.ru/articles/210/

Параметры загрузки:
IP: 216.73.216.140
11.11.2026 10:00:14

УДК 007.51 DOI: 10.18698/2309-3684-2019-4-9199

Имитационная модель процессов миграции в странах с учетом уровня образования

© Н.В. Белотелов[1,2]

[1]Вычислительный центр им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, Москва, 119333, Россия
[2]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

Рассматривается имитационная модель миграции населения между странами, каждой из которых соответствует своя культура. Описывается схема образовательного процесса, которая предполагает наличия двух типов образования — технического, влияющего на экономическое благосостояние страны и культурного, которое влияет на подвижность населения и коэффициенты толерантности межкультурных взаимоотношений. В модели учитывается демографический процесс. Анализ проведенных имитационных экспериментов показывает, что недостаточное развитие культурного образования населения, в случае миграции может приводить к социальной нестабильности в стране.

Ключевые слова: *имитационная модель, миграционный процесс, ассимиляционный процесс, образовательный процесс*

Введение. Проблема моделирования глобальных изменений социально — экономической динамики за последние пол века, начиная с классических работ Дж. Форрестора, приобретает все большую актуальность. Предлагаются различные подходы к её формализации вот лишь малая часть работ, посвященных этой тематике [1–4].

Обычно считается, что основной целью математического моделирования является прогнозирование. Но помимо этого математическое моделирование является основным инструментом междисциплинарного исследования проблем. В этом случае оно позволяет по-новому взглянуть на изучаемые объекты. На их основе создаются системы понятий, в которых обсуждаются исследуемые явления. «Под системой понятий мы имеем в виду просто-напросто однозначное логическое отображение соотношений между опытными данными.» [5]

Математическое моделирование в любой науке — это процесс, в котором можно выделить следующие этапы:

1. Постановка проблемы (задачи), которая формулируется на языке предметной области;
2. Математическая формализация взаимосвязей между измеримыми понятиями;
3. Исследование полученной формализации математическими методами, что редко удается при формализации реальных проблем.
4. Создание программы для ЭВМ и проведение вычислительных

экспериментов.

5. Совместный анализ результатов математического исследования и вычислений с исходной проблемой. (Замечу, что вычислительный эксперимент часто не доказывает, а лишь иллюстрирует.)

Последний пятый этап математического моделирования был выделен и назван Н.Н. Моисеевым и Ю.Н. Павловским как «гуманитарный анализ математических моделей сложных плохо формализованных систем» [6]. В работе, на примере модели взаимосвязи миграционных и образовательных процессов, будет проиллюстрирована важность выделения этого этапа.

Модель миграционных процессов, обсуждаемая в работе, в дальнейшем может быть подблоком в распределенной версии эколого–демографо–экономической модели (ЭДЭМ), разработанной в отделе Имитационные системы ВЦ РАН. [6,7]

Проблема миграционных процессов населения между странами является одной из ключевых при анализе глобальных социально-экономических изменений. [8,9]

В модели считается, что каждой стране соответствует своя «культура». При миграции в другую страну люди могут либо сохранить свой культурный статус, либо ассимилироваться, то есть принять «культуру» страны пребывания.

В каждой из стран происходит свой образовательный процесс, который в модели представлен следующим образом. Предполагается, что есть образование технологическое, целью которого является передача естественнонаучных представлений. Люди, получившие такое образование, получают возможность использовать приобретенные знания в процессе производства, что в конечном итоге приводит к развитию экономики в данной стране. И есть образование культурное, такого рода образование, во-первых, приводит к понижению миграционной активности населения, а. во-вторых, повышает терпимость к людям другой культуры.

В каждом году (такте модельного счета) часть жителей страны мигрирует в другие страны. На желание людей оставаться в своей стране или эмигрировать влияют показатели уровня жизни и уровня социальной нестабильности в стране и в других странах. Направления эмиграции выбираются исходя из привлекательности других стран для жителей данной страны и возможностей тех стран по приему мигрантов.

Следующим этапом является процесс ассимиляции мигрантов. В модели считается, что на это влияют следующие факторы: величина доли мигрантов в общей численности страны, интенсивности миграционных потоков, а также образовательная политика страны.

Описание модели. Основным элементом (объектом) модели является страна. Считается, есть L стран, K культур (в общем случае

$L \neq K$, но в дальнейшем мы считаем, что они равны), E уровней технического образования и F культурного. Страна — объект описывается, во-первых, численностью населения $x_{iefk}^{l,t}$ в момент времени t, в l-ой стране ($l \in L$), возраста i, уровнем образования e ($e \in E$) технического и f ($f \in E$) культурного, «культуры» k ($k \in K$).

Демографический процесс в стране l описывает матрица Лесли, которая имеет вид:

$$B^l = \begin{pmatrix} b_1^l & b_2^l & \dots & b_{i_n}^l \\ d_2^l & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & d_{i_n}^l & 0 \end{pmatrix}.$$

где $b_{i_k}^l$, $d_{i_k}^l$ — коэффициенты рождения и смертности в стране l в когорте i_k соответственно. Тогда закон динамики возрастной структуры описывается выражением

$$x_{iefk}^{l,t+1} = (B_i^m)^{l,t} x_{iefk}^{l,t}.$$

Здесь опущен знак суммирования по индексу m — вводится аналог правила суммирования по Эйнштейну. Эта аналогия используется далее в тексте.

В общем случае коэффициенты зависят от времени и внутренних характеристик страны.

Образовательный процесс производит распределение населения по образовательным уровням и похож, в каком-то смысле, на демографический процесс.

Будем считать, что заданы две квадратные матрицы

$$E_T^l = \begin{pmatrix} \alpha_{11}^l & 0 & \dots & 0 \\ \alpha_{21}^l & \alpha_{22}^l & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \alpha_{e_n e_{n-1}}^l & \alpha_{e_n e_n}^l \end{pmatrix},$$

где e_n — число уровней технической образованности и

$$E_C^l = \begin{pmatrix} \beta_{11}^l & 0 & \dots & 0 \\ \beta_{21}^l & \beta_{22}^l & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \beta_{f_n f_{n-1}}^l & \beta_{f_n f_n}^l \end{pmatrix},$$

где f_n — число уровней культурной образованности. Матрицы имеют главную и нижнюю диагональ, так как предполагается, что понижение уровня образования и переход более чем на один уровень невозможен. Коэффициенты матрицы характеризуют уровень технологического и культурного образования в стране l.Считается, что все страны имеют некоторый образовательный ресурс. Каждая страна тратит свой образовательный ресурс на техническое и на культурное образование, деля этот ресурс R^l между этими двумя направлениями в некоторой пропорции. Распределение образовательного ресурса на каждом такте на технологическое и общекультурное образование происходит в общем случае произвольно, но с соблюдением естественного ограничения

$$R^l = \sum \alpha_{ij}^l + \sum \beta_{ij}^l.$$

Законы образовательной динамики записывается следующим образом:

$$x_{iefk}^{l,t+1} = (E_e^m)^{l,t} x_{imfk}^{l,t},\ x_{iefk}^{l,t+1} = (E_f^m)^{l,t} x_{iemk}^{l,t}.$$

Введем, следуя [10,11], матрицу толерантности T^{lt} которая используется для расчета уровня социальной нестабильности в стране. Матрица имеет вид:

$$T^{lt} = \begin{pmatrix} \theta_{11} & \theta_{12} & \dots & \theta_{1k} \\ \theta_{21} & \theta_{22} & \dots & \theta_{2k} \\ .. & .. & .. & .. \\ \theta_{k1} & \theta_{k1} & \dots & \theta_{kk} \end{pmatrix}^{lt},$$

где коэффициенты $\theta_{ij} \in [0,1]$ матрицы является показателем толерантности в стране l.

Считается, что коэффициенты толерантности в стране l людей культуры i к культуре j линейно зависят от численности людей в стране и линейно зависят от их уровня культурной образованности. Считается, что с толерантностью связано понятие уровень социальной нестабильности I^{lt}, который будет характеристикой «межнациональной неустойчивости» в стране и будет формироваться в зависимости от доли мигрантов в населении страны и от значений матрицы толерантности T^{lt} данной страны. Этот уровень будет влиять на уровень жизни в стране и на желание находиться в данной стране, как у ее жителей, так и у жителей других стран.

Введем понятие уровня жизни L^{lt} в стране, который будет являться обобщением экономических показателей страны. Считается,

что чем больше в стране людей с высшим техническим образованием, тем экономика и уровень жизни лучше, поэтому в данной модели уровень жизни будет зависеть от доли людей с техническим образованием. Также уровень жизни будет зависеть от уровня социальной нестабильности I^{lt} в стране. Уровень жизни будет определяться по формуле:

$$L^{lt} = a_1^L \frac{\sum_e x_{iefk}^{l,t}}{\sum_{iefk} x_{iefk}^{l,t}} - a_2^L I^{lt}, \text{ где } a_1^L, a_2^L \in [0,1].$$

Первый член в выражении, определяющий уровень жизни учитывает уровень технически образованного населения в стране, и как мы упоминали выше, определяет уровень экономического развития страны, а второй член учитывает социальную нестабильность, которая. как считается в модели связана с низким уровнем межкультурной толерантности в стране.

Миграционный процесс. Будем считать, что L стран представлены в виде полного ориентированного графа $G = (L, A)$, где вершины графа L представляют собой множество стран, а A — множество ориентированных ребер. Причем две вершины i и j соединены двумя ориентированными ребрами (i, j) и (j, i).

Вес ребер характеризует «желание» населения переехать из одной страны в другую. Обозначим вес ребра (i, j) через a_{ij}. Уравнение на вес ребра из страны i в страну j записывается следующим образом:

$$a^{ijt} = \left| L^{jt} - L^{it} \right|^2 \beta^{ij} Ind(L^{jt} - L^{it})$$

где $Ind(y)$ — индикаторная функция, удовлетворяющая условию

$$Ind(y) = \begin{cases} 1, & y > 0 \\ 0, & y \le 0 \end{cases},$$

а β^{ij} — коэффициент поправки на возраст и образование.

Тогда число людей, которые прибудут в страну l из страны m, вычисляются по формуле

$$In_{iefk}^{l,m,t} = a^{tml} x_{iefk}^{l,t}$$

Соответственно обратный поток задается выражением

$$Out_{iefk}^{l,m,t} = a^{tml} x_{iefk}^{m,t}$$

Тогда уравнение демографического процесса с учетом миграции можно записать в виде:

$$x_{iefk}^{l,t+1} = (B_i^m)^{l,t} x_{iefk}^{l,t} + \sum_m (In_{iefk}^{l,m,t} - Out_{iefk}^{l,m,t}).$$

Обсуждение результатов моделирования. Были проведены несколько имитационных экспериментов с моделью, описанной выше. Рассматривались пять модельных одинаковых стран, с одинаковыми характеристиками за исключением культурных. У каждой страны была своя культура. Каждая страна имела одинаковый образовательный ресурс R. Отличие между странами заключалось в разных стратегиях образовательного процесса, а именно деление его на техническое образование и культурное. Страна 5 тратила 90% из своего образовательного бюджета на техническое образование, остальные страны по 50%. Выборочные числовые данные этого имитационного эксперимента приведены в табл.1 и на рис.1.

Таблица 1

Выборочные числовые данные по имитационному эксперименту

	Страна 1	Страна 2	Страна 3	Страна 4	Страна 5
Начальная численность населения	120	120	120	120	120
Численность на 100 такте	363,571	351,659	351,659	340,217	3,354
Индекс социальной нестабильности начальные	0,001	0,001	0,001	0,001	0,001
Индекс социальной нестабильности на 100 такте	2,990	3,080	3,181	3,160	3,469
Доли мигрантов на 100 такте	29,98%	30,86%	31,83%	31,62%	34,68%

При отсутствии миграционных потоков между странами на сотом такте максимальное благополучие было у пятой страны, которая почти весь образовательный ресурс, вкладывала в техническое образование, что полностью соответствует модельным предположениям. При этом остальные страны делили его поровну между техническим и культурным образованием. Но при учете в имитационных экспериментах возможных миграционных потоков населения между странами был получен неожиданный результат (табл. 1 и, рис.1). А именно, на сотом такте население этой страны резко сократилось. Численность на два порядка меньше численности в других странах. Начал значительно осциллировать уровень жизни в стране. При этом социально-экономическая динамика остальных стран имела плавный характер развития. За

100 тактов, как следует из таблицы 1, произошло значительное «перемешивание» населения (в начале в странах не было мигрантов), а именно треть населения в странах составляли мигранты. Также, что хотелось бы отметить, на три порядка вырос индекс социальной нестабильности.

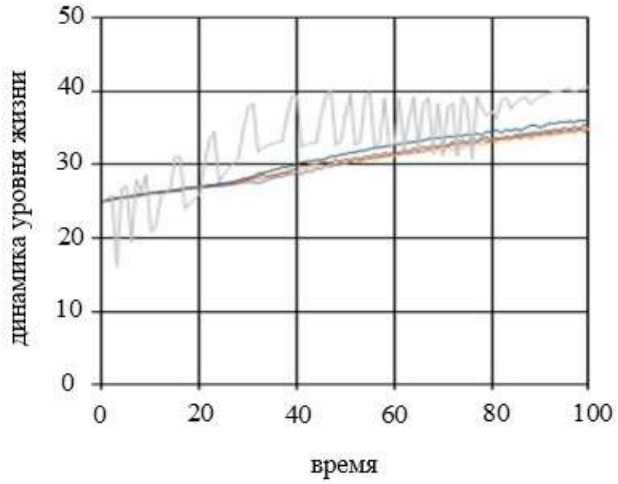


Рис. 1. Динамика уровня жизни в странах в имитационном эксперименте:
— страна 1; — страна 2; — страна 3; — страна 4; — страна 5

Заключение. Гуманитарный анализ результатов имитационных экспериментов позволил сделать следующий вывод. Страна, которая вкладывала весь образовательный ресурс в техническое образование первоначально, как и следует из предположений модели, увеличивала уровень жизни, что приводило к увеличение миграционных потоков в эту страну. Это приводило к многокультурности населения. Отсутствие вложений в культурное образование приводило к увеличению социальной напряженности в стране, что приводило в конечном итоге к результатам, описанным выше.

Безусловно, этот предварительный результат требует подробного анализа, как с точки зрения исследования влияния различных параметров и функциональных выражений самой модели, так и привязки численных экспериментов к реальным данным. Последнее, что хотелось бы отметить наиболее сложно выполнимо, поскольку как показывают беседы с некоторыми гуманитариями, разделение культуры и образования на две составляющие, что сделано в модели, на практике является актуальной нерешенной гуманитарной проблемой.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-010-00423).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Капица С.П., Курдюмов С.П., Малинецкий Г.*Г Синергетика и прогнозы будущего*. Москва, Наука, 1997, 285 с.
[2] Вайдлих В. *Социодинамика: системный подход к математическому моделированию в социальных науках*. Москва, Едиториал УРСС, 2005, 480 с.
[3] Димитриенко Ю.И., Димитриенко О.Ю. Кластерно-континуальное моделирование экономических процессов. *Доклады АН*, 2010, т. 435, № 4, с. 466–469.
[4] Димитриенко Ю.И., Димитриенко О.Ю. Модель многомерной деформируемой сплошной среды для прогнозирования динамики больших массивов индивидуальных данных. *Математическое моделирование и численные методы*, 2016, № 1, с. 105–122.
[5] Борн Н. *Единство знаний*. Москва, Наука, 1964, 451 с.
[6] Белотелов Н.В., Бродский Ю.И., Павловский Ю.Н. *Сложность. Математическое моделирование. Гуманитарный анализ*. Москва, Либроком, 2019, 320 с.
[7] Павловский Ю.Н., Белотелов Н.В., Бродский Ю.И. *Компьютерное моделирование: учебное пособие для вузов*. Москва, Физматкнига, 2014, 348 с.
[8] Белотелов Н.В., Логинов Ф.В. Модель миграции между странами с учетом образовательного процесса. *Моделирование, декомпозиция и оптимизация сложных динамических процессов*, 2018, т. 33, № 1 (33), с. 183–190.
[9] Brücker H., Elke J.J. Migration and Wage Setting: Reassessing the Labor Market Effects of Migration. *Scandinavian Journal of Economics*, 2011, № 113 (2), pp. 286–317.
[10] Бродский Ю.И. *Толерантность и нетерпимость с точки зрения системной динамики и исследования операций.* Москва, ВЦ РАН, 2008, 53 с.
[11] Бродский Ю.И. *Толерантность, нетерпимость идентичность: простейшие математические модели взаимодействия культур*. Саарбрюкен, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 68 с.

Статья поступила в редакцию 13.09.2019

Белотелов Н.В. Имитационная модель процессов миграции в странах с учетом уровня образования. *Математическое моделирование и численные методы*, 2019, № 4, с. 91–99.

Белотелов Николай Вадимович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник Вычислительного центра им. А.А. Дородницына ФИЦ ИУ РАН, доцент кафедры «Вычислительная математика и математическая физика» МГТУ им. Н.Э. Баумана.
e-mail: belotel@mail.ru

Simulation model of migration processes in countries taking into account the level of education

© N.V. Belotelov[1,2]

[1]Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Moscow, 119333, Russia
[2]Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

The simulation model of population migration between countries, each of which has its own culture, is considered. The article describes the scheme of the educational process, which assumes the presence of two types of education – technical, which affects the economic well-being of the country and cultural, which affects the mobility of the population and the coefficients of tolerance of intercultural relations. The model takes into account the demographic process. The analysis of the conducted simulation experiments shows that the insufficient development of cultural education of the population, in the case of migration, can lead to social instability in the country.

Keywords: *simulation model, migration process, assimilation process, educational process*

REFERENCES

[1] Kapica S.P., Kurdyumov S.P., Malineckij G.G *Sinergetika i prognozy budushchego* [Synergetics and forecasts of the future]. Moscow, Nauka Publ., 1997, 285 p.

[2] Vajdlih V. *Sociodinamika: sistemnyj podhod k matematicheskomu modelirovaniyu v social'nyh naukah* [Sociodynamics: a systematic approach to mathematical modeling in the social Sciences]. Moscow, Editorial URSS Publ., 2005, 480 c.

[3] Dimitrienko Y.I., Dimitrienko O.Yu. *Doklady AN — Proceedings of the Academy of Sciences*, 2010, vol. 435, no. 4, pp. 466–469.

[4] Dimitrienko Y.I., Dimitrienko O.Yu. *Matematicheskoe modelirovanie i chislennye metody — Mathematical Modeling and Computational Methods*, 2016, no. 1, pp. 105–122.

[5] Born N. *Edinstvo znanij* [Unity of knowledge]. Moscow, Nauka Publ., 1964, 451 p.

[6] Belotelov N.V., Brodsky Yu.I., Pavlovskij Yu.N. *Slozhnost'. Mate-maticheskoe modelirovanie. Gumanitarnyj analiz*. [Complexity. Mathematical modeling. Humanitarian analysis]. Moscow, Librokom Publ., 2019, 320 p.

[7] Pavlovskij Yu.N., Belotelov N.V., Brodsky Yu.I. *Komp'yuternoe mode-lirovanie: uchebnoe posobie dlya vuzov.* [Computer modeling: a textbook for universities.] Moscow, Fizmatkniga Publ., 2014, 348 p.

[8] Belotelov N.V., Loginov F.V. *Modelirovanie, dekompoziciya i optimizaciya slozhnyh dinamicheskih processov — Modeling, decomposition and optimization of complex dynamic processes*, 2018, vol. 33, no. 1 (33), pp. 183–190.

[9] Brücker H., Elke J.J. Migration and Wage Setting: Reassessing the Labor Market Effects of Migration. *Scandinavian Journal of Economics*, 2011, № 113 (2), pp. 286–317.

[10] BrodskyYu.I. *Tolerantnost' i neterpimost' s tochki zreniya si-stemnoj dinamiki i issledovaniya operacij* [Tolerance and intolerance from the point of view of system dynamics and operations research]. Moscow, VC RAS Publ., 2008, 53 p.

[11] Brodsky Yu. I. *Tolerantnost', neterpimost' identichnost': pro-stejshie matematicheskie modeli vzaimodejstviya kul'tur* [Tolerance, intolerance identity: the latest mathematical models of interaction of cultures]. Saarbrücken, LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011, 68 p.

Belotelov N.V., Cand. Sc. (Phys.-Math.), Senior Research Fellow Institution of Russian Academy of Sciences Dorodnicyn Computing Centre of RAS, Assoc. Professor, Department of Computational Mathematics and Mathematical Physics, Bauman Moscow State Technical University. e-mail: belotel@mail.ru