Вестник ЦЭМИ <small>ISSN 2658-3887 Свидетельство о регистрации СМИ от 05.05.2014 № 14-0000001</small>	2 2021	Вестник ЦЭМИ РАН. 2013-2021 ISSN 2658--3887 URL - http://cemi.jes.su Все права защищены Выпуск 2 Том 4. 2021

Сегрегация агентов в секторальной модели ограниченного соседства

Акопов Андраник Сумбатович

*Центральный экономико-математический институт РАН
Москва, РФ, Нахимовский проспект, 47*

Бекларян Лева Андреевич

*Центральный экономико-математический институт РАН
Москва, Нахимовский проспект 47*

Аннотация

В данной статье представлен подход к моделированию эффектов сегрегации с использованием секторальной модели ограниченного соседства. Предложенная имитационная модель обеспечивает возможность изучения эволюционной динамики популяции, состоящей из локальных и внешних агентов, которые взаимодействуют в двумерном дискретном пространстве. Показано, что в условиях равномерно-смешанного способа формирования рабочих мест во всех секторах экономики: добычи, переработки, розничных и высокотехнологичных услуг, привлекающих соответствующие группы агентов, отличающихся уровнем образования и квалификации, обеспечивается наименьший уровень сегрегации населения. При этом, в долгосрочной перспективе подобная стратегия приводит к возникновению феномена формирования «моноэтнического сообщества», состоящего преимущественно из местных (в том числе ранее ассимилированных) агентов.

Ключевые слова: модели ограниченного соседства, сегрегация населения, агент-ориентированное моделирование, кластеризация агентов

Дата публикации: 28.09.2021

Источник финансирования:

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-01-00002.

Ссылка для цитирования:

Акопов А. С. , Бекларян Л. А. Сегрегация агентов в секторальной модели ограниченного

Введение

В настоящее время активно развивается направление, относящееся к исследованию поведения искусственных сообществ, состоящих из агентов со сложными взаимосвязями [1–5]. Пионерскими работами в данной области являются модели, предложенные Т. Шеллингом [6] и М. Гранноветером [7], в которых социальная динамика исследуется с учетом феноменов сегрегации и толерантного порогового поведения агентов-индивидуумов. В подобных моделях агенты осуществляют выбор наиболее предпочтительных мест проживания с учетом окружающего пространства, а именно в зависимости от того преобладают ли среди ближайших соседей агенты, относящиеся к тому же типу (имеют схожие социальные характеристики), или наоборот превалируют агенты другого класса. Возможна и другая ситуация, когда в результате «социального давления», т.е. существенного увеличения числа соседей противоположного типа, соответствующий агент принимает решение о смене места жительства.

Агент-ориентированные модели сегрегации типа Шеллинга [6] нацелены на изучение эффектов сегрегации и геттоизации населения, обусловленные стремлением агентов к расселению среди себе подобных. В моделях Гранноветера [7] добавляется влияние индивидуального порога толерантности (одни агенты в большей степени согласны быть окруженными агентами другого типа, другие в меньшей).

Среди других известных имитационных моделей подобного типа следует выделить: «Сахарную модель» [8], «Модель взаимодействия мигрантов и коренных жителей» [9], «Модель кочевников и землепашцев» [10], «Модель поведения толпы в чрезвычайных ситуациях» [11].

Вместе с тем, подобные модели, как правило не учитывают отраслевую структуру социально-экономической системы, сложную индивидуальную систему принятия решений агентами, которые нацелены на поиск работы с учетом собственной квалификации, уровня владения местным языком, образования и т.д. Также, не учитывается влияние процессов ассимиляции и интеграции агентов, постепенной социализации мигрантов и адаптации местных жителей к новым членам популяции: трансформация мигрантов в коренных жителей и повышение уровня толерантности к внешним агентам со стороны локальной популяции.

В данной статье представлен подход к моделированию эффектов сегрегации с использованием секторальной модели ограниченного соседства, в которой учитываются отраслевая структура социально-экономической системы, многочастичные взаимодействия между местными и внешними агентами, процессы принятия решений по выбору наиболее предпочтительных рабочих мест и др. Предложенная модель реализована в системе *AnyLogic*.

Модель принятия решений агентами

Итак, рассматривается поведение двух взаимодействующих сообществ – внешних агентов (мигрантов) и местных агентов (коренных жителей), которые существуют в искусственной социально-экономической системе, состоящей из четырех секторов экономики:

- *сектор добычи сырья* (например, добыча нефти, руды и т.д.);
- *сектор розничных услуг* (торговля, услуги ЖКХ, малый бизнес и т.д.)
- *перерабатывающая промышленность* (нефтепереработка, металлообрабатывающая промышленность и т.д.);
- *сектор высокотехнологичных услуг* (Hi-tech, сфера науки и образования, медицина и др.).

⁹ Первые два сектора экономики, как правило, не требуют массового привлечения специалистов высокой квалификации, и поэтому они привлекают преимущественно внешних агентов. Переработка и высокотехнологичные услуги, напротив, ориентированы на трудовые ресурсы с высоким уровнем компетенций и свободным владением местным языком, и поэтому привлекают преимущественно местных жителей.

¹⁰ Рассматриваемая искусственная социально-экономическая система представляет собой двумерное дискретное пространство, в котором каждая из ячеек массива $n \times n$ либо содержит рабочее место, относящееся к одному из секторов экономики, либо является пустой. В первом случае, если агент занимает подобную ячейку, уровень его личного благосостояния прирастает во времени. Агент, который занимает ячейку, не имеющую рабочего места, считается безработным и не может наращивать уровень своего социального благосостояния (Рис. 1). Агент инициирует поиск нового рабочего места, если уровень его личного благосостояния ниже заданного порогового значения, который снижается в условиях менее благоприятного соседства с агентами, принадлежащими к противоположному типу (например, когда местный житель находится в окружении мигрантов). И наоборот, в условиях достаточного уровня личного благосостояния, агент переходит в стационарное (неподвижное) состояние и может начать поиск партнера для брака и рождения детей.

¹¹

Рис. 1. Выбор рабочего места в секторальной модели ограниченного соседства.

¹² Таким образом, осуществляя выбор наиболее предпочтительного рабочего места, относящегося к одному из рассматриваемых секторов экономики, каждый агент решает следующую задачу по определению оптимальной клетки размещения:

$$l(i; t_k) = \arg \min_{j_b \in J_b} f_{ij_b}(t_k), \quad (1)$$

$$f_{ij_b}(t_k) = d_{ij_b}(t_k) + \delta_{ij_b}(t_k)(1 - \lambda_i(t_k)), \quad (2)$$

$$i \in I \cup \tilde{I}, j_b \in J_b, b \in B, t_k \in T,$$

¹⁶ где

- T – набор временных моментов (по годам), $|T|$ – общее количество временных моментов; $t_0 \in T$, $t_{|T|} \in T$ – начальные и конечные моменты времени, $k = 0, \dots, |T|$ – индексы для моментов времени;
- $I = \{1, 2, \dots, |I|\}$ – набор индексов местных агентов, где $|I|$ – общее количество местных агентов;
- $\tilde{I} = \{1, 2, \dots, |\tilde{I}|\}$ – набор индексов внешних агентов, где $|\tilde{I}|$ – общее количество внешних агентов;
- $B = \{1, 2, \dots, |B|\}$ – набор секторов экономики, где $|B|$ – общее количество секторов экономики;
- $J_b = \{1, 2, \dots, |J_b|\}$ – набор ячеек дискретного пространства, в которых имеется рабочее место, относящееся к b -ому сектору экономики;
- $d_{ij_b}(t_k)$, $i \in I \cup \tilde{I}$, $j_b \in J_b$, $b \in B$ – евклидово расстояние от i -ого агента, находящегося в состоянии поиска работы, до j_b -ой клетки, содержащей рабочее место, относящееся к b -ому сектору экономики, релевантное для агента данного типа;
- $\delta_{ij_b}(t_k)$, $i \in I \cup \tilde{I}$, $j_b \in J_b$, $b \in B$ – уровень неблагоприятности окружающего пространства для i -ого агента, если он переместится в j_b -ую клетку, относящуюся к b -ому сектору экономики, оцениваемый как суммарное количество агентов, принадлежащих к другому типу и находящихся в окрестности Мура [12] относительно данного рабочего места;
- $\lambda_i(t_k) \in [0, 1]$, $i \in I \cup \tilde{I}$ – уровень толерантности i -ого агента (как правило, различный у местных и внешних агентов и монотонно возрастающий во времени за счет эффекта взаимной адаптации агентов друг к другу), по отношению к соседним агентам, принадлежащим к другому типу: $\lambda_i(t_k) = 1$ – агент полностью толерантен к соседям, $\lambda_i(t_k) = 0$ – агент полностью нетолерантен.

¹⁷ В результате пространственного перемещения агентов в направлении наиболее предпочтительных рабочих мест возникают эффекты естественной сегрегации, в особенности, когда соответствующие ресурсы формируются посредством кластерно-ориентированного подхода [2], в зонах компактного проживания местных или внешних агентов. При этом, имеются возможности управления процессами сегрегации за счет применения кластерно-ориентированного и равномерно-смешанного способа создания рабочих мест в рассматриваемых секторах экономики, а также изменения количества и размерности соответствующих кластеров. Вместе с тем возможно увеличение доли внешних агентов с целью достижения популяционного разнообразия при одновременном создании множественных пространственно-распределенных рабочих мест в секторах экономики, не требующих высокой квалификации трудовых ресурсов, и др. Кроме того, больший уровень сегрегации может обеспечить положительный вклад в экономический рост за счет улучшения привлекательности и соответственно доступности создаваемых рабочих мест, находящихся в условиях благоприятного внутрикластерного соседства. С другой стороны, десегрегация позволяет ускорить процессы ассимиляции и интеграции внешних агентов.

¹⁸ Важнейшей результирующей характеристикой рассматриваемой системы является уровень сегрегации, *оцениваемый с использованием индекса Дункана* [13]:

$$DSI(t_k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{|\tilde{J}|} \left| \frac{n_j(t_k)}{|I|} - \frac{\tilde{n}_j(t_k)}{|\tilde{I}|} \right|, \quad (3)$$

²⁰ где

- $\tilde{J} = \{1, 2, \dots, |\tilde{J}|\}$ – набор индексов областей, на которые поделено дискретное пространство существования агентов, где $|\tilde{J}|$ – общее количество оцениваемых окрестностей в двумерном дискретном пространстве размещения агентов;
- $n_j(t_k)$, $j \in \tilde{J}$, $t_k \in T$ – количество местных агентов, расположенных в j -ой окрестности;
- $\tilde{n}_j(t_k)$, $j \in \tilde{J}$, $t_k \in T$ – количество внешних агентов, расположенных в j -ой окрестности.

2. Программная реализация модели

Программная реализация модели выполнена с использованием систем имитационного моделирования *AnyLogic* (малоразмерная версия модели).

Ниже представлена вычислительная процедура оценки индекса сегрегации Дункана, реализованная на языке программирования *Java* в системе имитационного моделирования.

Процедура вычисления индекса сегрегации Дункана в модели

```
double DSI=0;
int count_1 = 0;
int count_2 = 0;
int i_start = 0;
int j_start = 0;
int vicinity_size = 33; // Размерность окрестности в которой производится оценка
// благоприятности соседства

for(int v_j = 0; v_j < vicinity_size; v_j++)
{
    i_start = 0;
    for(int v_i = 0; v_i < vicinity_size; v_i++)
    {
        count_1 = 0;
        count_2 = 0;

        for(int j = j_start; j < j_start + 3; j++)
        {
            for(int i = i_start; i < i_start + 3; i++)
            {
                if(get_agent(i, j) instanceof Locals)
                    count_1++;
                if(get_agent(i, j) instanceof Foreigns)
                    count_2++;
            }
        }

        if(locals.size() > 0 && foreigns.size() > 0)
            DSI = DSI + 0.5 * Math.abs(((double)count_1/locals.size() -
            (double)count_2/foreigns.size()));

        i_start = i_start + 3;
    }
    j_start = j_start + 3;
}

if(locals.size() == 0 || foreigns.size() == 0)
    DSI=1;

return DSI;
```

Здесь, **Locals** и **Foreigns** – специально созданные *Java*-классы, обеспечивающие реализацию всех функций и характеристик местных и внешних агентов, соответственно. К подобным характеристикам, влияющим на принятие индивидуальных решений в частности, относятся: тип агента, пол, возраст, уровень социального благосостояния, координаты размещения его в двумерном пространстве, собственное состояние и др.

3. Результаты численных экспериментов

Далее, с использованием системы *AnyLogic* были проведены численные эксперименты, направленные на оценку уровня сегрегации населения при различных сценарных условиях на горизонте прогнозирования 2022 – 2100 гг.:

- **Сценарий 1.** Высокая интенсивность прибытия внешних агентов в популяцию (доля новых мигрантов от общего числа нессимилированных агентов 0,1) в условиях кластерно-ориентированного способа создания рабочих мест в областях компактного проживания местных и внешних агентов.
- **Сценарий 2.** Высокая интенсивность прибытия внешних агентов в популяцию в условиях равномерно-смешанного способа формирования рабочих мест во всех секторах экономики.
- **Сценарий 3.** Средняя интенсивность прибытия внешних агентов в популяцию (доля новых агентов-мигрантов от общего числа нессимилированных 0,08) в условиях равномерно-смешанного способа формирования рабочих мест и существенного (трёхкратного) увеличения государственных расходов на образование и интеграцию.
- **Сценарий 4.** Средняя интенсивность прибытия внешних агентов на фоне существенного (двукратного) расширения размерности кластеров создаваемых рабочих мест во всех секторах экономики.
- **Сценарий 5.** Преимущественно толерантное поведение агентов в условиях значительных инвестиций со стороны государства в образование и интеграцию агентов с целью достижения ускоренной ассимиляции при средней интенсивности прибытия внешних агентов.
- **Сценарий 6.** Преимущественно нетолерантное поведение агентов в условиях низкого уровня государственных расходов на образование и интеграцию при средней интенсивности прибытия внешних агентов.

Результаты численных экспериментов представлены на рис. 2.

Рис. 2. Динамика индекса сегрегации Дункана.

Из рис. 2 видно, что наибольший интерес представляют **Сценарии 1 и 2**.

Первый сценарий, соответствующий относительно высокой интенсивности прибытия внешних агентов в популяцию в условиях кластерно-ориентированного способа создания рабочих мест, позволяет обеспечить наилучшую динамику монотонно убывающего индекса сегрегации Дункана.

³² *Второй сценарий* с равномерно-смешанным способом создания рабочих мест приводит к принципиальному снижению уровня сегрегации в краткосрочной и среднесрочной перспективе, в основном за счет ускорения процессов ассимиляции и интеграции, обусловленного увеличением количества контактов между агентами различных типов. В долгосрочной перспективе количество неассимилированных внешних агентов резко сокращается, возникает дефицит трудовых ресурсов в секторах добычи и розничной торговли. При этом, индекс сегрегации Дункана значительно увеличивается, вследствие эффекта формирования «моноэтнического сообщества», состоящего преимущественно из местных агентов, что можно считать отрицательным явлением для социально-экономической системы.

³³ Пример, иллюстрирующий сегрегацию агентов для первого и второго сценариев в конечный момент модельного времени ($k = |T|$), представлен на рис. 3–4.

³⁴

Рис. 3. Пространственная визуализация и сегрегация агентов при первом сценарии.

Рис. 4. Пространственная визуализация и сегрегация агентов при втором сценарии.

³⁵ На рис. 3 видно, что при первом сценарии формируются ярко выраженные кластеры рабочих мест. При этом, местные и внешние агенты концентрируются внутри соответствующих кластеров, занимая рабочие места в наиболее предпочтительных для них секторах экономики. В результате наблюдается эффект сегрегации агентов: компактное пространственное размещение индивидуумов, принадлежащих общему типу.

³⁶ Рис. 4 показывает, что при втором сценарии рабочие места, относящиеся к различным секторам экономики сформированы равномерно (в случайном порядке). В результате, агенты-индивидуумы также распределяются равномерно. Подобное распределение, предполагающее множественные контакты между местными и внешними агентами, обуславливает процессы десегрегации и ассимиляции агентов.

³⁷ Заключение

³⁸ В данной статье представлен подход к моделированию эффектов сегрегации с использованием секторальной модели ограниченного соседства, в которой реализуется взаимодействие двух сообществ: местных и внешних агентов. Предложена модель принятия решений агентами, в которой выбор наиболее предпочтительного рабочего места осуществляется с учетом индивидуального уровня толерантности по отношению к соседним агентам, принадлежащим к другому типу. Разработана (на языке программирования Java) вычислительная процедура, обеспечивающая возможность расчета динамики индекса сегрегации Дункана в *AnyLogic*. Проведены численные исследования с использованием искусственных данных и определены сценарии, позволяющие существенно уменьшить уровень сегрегации популяции. Эти сценарии реализованы, в частности, в условиях, как равномерно-смешанного, так и кластерно-ориентированного способа создания рабочих мест. При этом, равномерно-смешанный

способ приводит к достижению большего эффекта по снижению популяционной сегрегации в краткосрочной и среднесрочной перспективе.

³⁹ Дальнейшие исследования будут направлены на увеличение размерности секторальной модели ограниченного соседства и ее программной реализации с использованием суперкомпьютерных технологий.

Библиография:

1. Акопов, А. С. Агентное моделирование : учебно-методическое пособие / А. С. Акопов, Н. К. Хачатрян ; Федеральное гос. бюджетное учреждение науки Центральный экономико-мат. ин-т, Гос. академический ун-т гуманитарных наук. – Москва : ЦЭМИ РАН, 2016. – 76 с.
2. Акопов, А. С. Кластеризация агентов в модели ограниченного соседства / А. С. Акопов, А. Л. Бекларян // Искусственные общества. – 2020. – Т. 15. – Выпуск 3. – URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800011151-5-1/>. Дата публикации: 05 сентября 2020 года.
3. Акопов, А. С. Кластеризация агентов в модели сегрегации населения / А. С. Акопов, А. Л. Бекларян, Л. А. Бекларян [и др.] // Искусственные общества. – 2020. – Т. 15. – Выпуск 4 [Электронный ресурс]. URL: <https://artsoc.jes.su/s207751800012764-9-1/>. – Дата публикации: 06 декабря 2020 года.
4. Jager, W. Simulating Acculturation Dynamics Between Migrants and Locals in Relation to Network Formation / W. Jager, R. Paolillo // Social Science Computer Review. – 2019. – Vol. 38, No. 4. – pp. 365-386.
5. Civico, M. The dynamics of language minorities: Evidence from an agent-based model of language contact. // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. – 2019. – Vol. 22, No. (4), 3. URL : <https://www.jasss.org/22/4/3.html>. – Published: 31-Oct-2019
6. Schelling, T. C. Dynamic models of segregation / T. C. Schelling // The Journal of Mathematical Sociology. – 1971. – 1 (2). – pp. 143–186.
7. Granovetter, M. Threshold Models of Collective Behavior / M. Granovetter // AJS. – 1978. – Vol. 83, No. 6. – P. 1420-1443.
8. Epstein, J. M. Growing artificial societies: social science from the bottom up / J. M. Epstein, R. Axtell. – Washington, D.C.: Brookings Institution Press; Cambridge: The MIT Press, 1996. – 208 с.
9. Макаров, В. Л. Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Экономика и математические методы. – 2020. – Т. 56, № 2. – С. 5-19.
10. Белоусов, Ф. А. Модель сообществ с двумя способами воспроизводства продукта (модель "кочевников" и "землепашцев") / Ф. А. Белоусов // Экономика и математические методы. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 93-109.
11. Акопов, А. С. Имитационное моделирование : учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 389 с.
12. Weisstein, Eric W. Moore Neighborhood / MathWorld—A Wolfram Web Resource, <http://mathworld.wolfram.com/MooreNeighborhood.html>. (дата обращения: 06.09.2021)
13. Duncan, O. A methodological analysis of segregation indexes / O. Duncan, B. Duncan // American sociological review. – 1955. – Vol. 20. – P. 210-217.

Segregation of Agents in Sectoral Bounded-neighbourhood Model

Andranick Akopov

CEMI RAS

Moscow, Russian Federation, Nakhimovsky prospect 47

Leva Beklarian

CEMI RAS

Moscow, Nakhimovsky Prospect 47

Abstract

This article presents an approach to modelling segregation effects using a sectoral bounded-neighbourhood model. The proposed simulation model provides an opportunity to study the evolutionary dynamics of a population consisting of local and external agents that interact in a two-dimensional discrete space. It is shown that in the conditions of an uniform-mixing method of creating jobs in all sectors of economy: extraction, processing, retail and high-tech services, attracting the appropriate groups of agents, differing in the level of education and qualifications, the lowest level of population segregation is ensured. At the same time, in the long term, such a strategy leads to appearing of the phenomenon of the formation of a "mono-ethnic community", consisting mainly of local (including previously assimilated) agents.

Keywords: bounded-neighbourhood models, population segregation, agent-based modelling, agent clustering

Date of publication: 28.09.2021

Citation link:

Akopov A., Beklarian L. Segregation of Agents in Sectoral Bounded-neighbourhood Model // Herald of CEMI. – 2021. – V. 4. – Issue 2 [Electronic resource].

URL: <https://cemi.jes.su/s265838870016760-9-1/> (circulation date: 28.09.2021). DOI: 10.33276/S265838870016760-9