

Многоагентные системы и суперкомпьютерные технологии в общественных науках*

В.Л. Макаров¹, А.Р. Бахтизин¹, Е.Д. Сушко¹

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Центральный экономико-математический институт Российской академии наук¹

В работе показано применение агент-ориентированного подхода при моделировании естественного движения населения. Представлена региональная демографическая модель, в которой на основе поведения отдельных членов искусственного общества имитируются процессы смертности, рождаемости и миграции. Так, создание новых агентов (рождение детей) в модели является результатом выбора агентов-женщин репродуктивного возраста, и выбор этот зависит от их внутренних установок. Миграция агентов обусловлена разницей в уровне среднедушевых доходов между различными территориями в пределах региона. Показаны результаты экспериментов, проведенных с использованием модели и с применением суперкомпьютерных технологий.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, демография, типы воспроизводства населения, прогнозирование численности и структуры населения региона, суперкомпьютерные технологии.

1. Многоагентные системы

Многоагентные (мультиагентные) системы (МАС) относятся к классу компьютерных моделей, создаваемых для имитации самых разнообразных процессов, происходящих в реальной действительности [1]. МАС являются вычислительным инструментом, который представляет собой совокупность (популяцию) агентов, искусственное общество, состоящее из взаимодействующих друг с другом и со средой самостоятельных агентов с определенным набором свойств. Работа МАС основана на имитации индивидуального поведения каждого из агентов-членов этого общества, а изменения общего состояния всей системы являются интегральным результатом действий отдельных агентов. Конечная цель процесса по созданию МАС – отследить влияние поведения агентов, действующих на микроуровне, на показатели макроуровня.

В качестве важнейших отличительных особенностей агент-ориентированного подхода в моделировании следует отметить следующие:

- Набор свойств (характеристик) агентов, так же, как и доступных им действий, может быть сколь угодно широким, и фактически, ограничивается лишь требованием адекватности представления в модели тех свойств реальных моделируемых объектов, которые важны для имитации выбранных процессов;
- Конкретные значения каждой из характеристик могут различаться у представителей популяции агентов, что позволяет отказаться от нивелирования индивидуальных различий при имитации поведения реальных прототипов создаваемых в модели агентов;
- Сама среда агентов в многоагентной системе также может быть устроена сложно, иметь не только множество характеристик, но и включать несколько популяций агентов разных типов, в том числе, образующих иерархические структуры.

Указанные свойства агент-ориентированного моделирования объясняют тот факт, что в последнее время для прогнозирования поведения сложных социально-экономических систем этот подход применяется все активнее. Ведь в рамках МАС становится возможным воссоздавать социально-экономическую структуру моделируемого реального общества с учетом разнообразия его членов и проводить с использованием модели компьютерные эксперименты (симуляции

* Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 14-18-01968).

реальных явлений) для оценки реакции общества на возможные (или планируемые) изменения характеристик внешней среды.

Полноценная реализация МАС стала возможной только с появлением современных вычислительных средств, а переход к программированию МАС на суперкомпьютерах позволяет разработчикам моделей довести численность популяции агентов в системе до численности членов моделируемого социума.

Демографические процессы в обществе, такие как рождаемость и миграция, во многом определяются индивидуальным выбором отдельных людей, поэтому служат классическим примером применения агент-ориентированного подхода в моделировании. Неслучайно поэтому в литературе можно найти описания многочисленных мультиагентных систем, ориентированных на отражение самых разнообразных аспектов основных демографических процессов [2-7].

2. Зарубежный опыт

Отметим наиболее характерные демографические МАС, разработанные за рубежом за последние годы.

В книге «Агент-ориентированная компьютерная демография: использование моделирования для улучшения понимания демографического поведения», выпущенной под редакцией Ф. Биллари и А. Прскавец [2], представлены агент-ориентированные модели, посвященные имитации множества процессов, связанных с естественным движением населения – начиная от образования семейных пар и влияния социальных норм на рождаемость, и до принятия людьми решений о перемене места жительства.

В работе «Агент-ориентированное моделирование социальных взаимодействий и демографического поведения» [3] описаны три модели, рассматривающие различные составляющие демографической системы, в частности, процесс создания браков, изменение рождаемости и др. В работе, в том числе, исследуются различия в поведении людей, связанные с их принадлежностью к разным типам культуры, которые вызваны неравномерностью процессов демографического перехода в разных странах (то есть, перехода от традиционного типа воспроизводства населения с высокой смертностью и высокой рождаемостью к современному типу – с низкой смертностью и низкой же рождаемостью) [8].

В статье «Демография и социальное моделирование: история двух подходов к моделированию» [4] рассматривается МАС, агенты в которой имеют сложную структуру с большим числом состояний, а прогноз демографической динамики, именно благодаря детализации до отдельных членов общества, возможен на различных уровнях – от домашних хозяйств до всего населения Великобритании.

В книге «Динамика численности населения и проекционные методы» [5] исследуется широкий спектр демографических проблем Западной Европы, связанных со старением населения, увеличением числа разводов, снижением количества заключенных браков, увеличением числа мигрантов и т.д. Для исследования этих процессов, взаимовязанных с экономической ситуацией, а также с положением в странах - донорах миграции, также применяются агентные модели.

Следует заметить, что именно имитации и исследованию различных миграционных процессов, таких как миграция межстрановая, внутрирегиональная, трудовая, сезонная, миграция из села в город и т.д., посвящено наибольшее число известных демографических МАС. Причем в большинстве этих моделей в качестве побудительных мотивов миграции агентов рассматриваются экономические причины, а ограничения перемещений агентов являются параметры рынка труда на той территории, куда агенты стремятся мигрировать.

Показательна в этом отношении модель, представленная в работе «Агент-ориентированная модель динамики населения европейских стран» [6]. Модель имитирует миграционные потоки внутри европейских стран, вплоть до локальных территориально-административных единиц (уровень областной и локальной миграции), а также региональные рынки труда с особой детализацией их специфики (типы вакансий, предпочтения работодателей и т.п.). При этом в модели учитывается уровень удовлетворенности людей своим трудовым статусом и уровнем доходов, и в зависимости от данного показателя имитируется решение агентов о переезде. Выбор

целевого региона агенты осуществляют с учетом разницы между экономическими показателями регионов и процентом безработных в них, а также расстояния между регионами.

Отдельно следует упомянуть МАС, в которых имитируется вынужденная миграция людей, зависящая, в основном, от условий в стране (или регионе)-доноре, и возможно слабо связанная с рынком труда в стране-реципиенте. В первую очередь, это относится к моделям, в которых миграция агентов вызывается опасными событиями. Примером такой модели является работа «Имитация движения потоков беженцев с целью выявления их направленности» [7], в которой воспроизводится картина движения населения в районе Северного Мали, где в январе 2012 года начали происходить военные столкновения. В модели показана карта изучаемой местности с расположенными населенными пунктами и восемью лагерями беженцев, примыкающих к транспортным магистралям. В ходе работы модели агенты-беженцы движутся по направлению к лагерям с учётом реальных расстояний и возможной скорости их преодоления. Кроме того, в модели учитывается, через сколько дней после начала конфликта соседние страны открывали свои границы для беженцев. Модель разработана как инструмент моделирования движения беженцев, позволяющий оценивать, как будет меняться направленность миграционных потоков и количество людей в лагерях в зависимости от миграционной политики принимающих стран, расположения лагерей временного содержания и других факторов. Подобный инструмент может быть использован и для разработки планов эвакуации жителей из зоны конфликта.

3. Постановка задачи

Концепция создаваемой в ЦЭМИ РАН агент-ориентированной демографической модели региона опирается на максимально приближенную к реальности имитацию поведения людей исходя из их внутренних установок, обуславливающих как репродуктивные стратегии агентов-людей в модели, так и выбор ими места жительства. При этом показатели естественного движения населения в модели, такие как рождаемость и миграция, получаются в результате агрегирования действий отдельных агентов популяции. Модель является расширением представленной ранее в [9]. Агенты в модели разделены на две группы (типа), различающиеся репродуктивными стратегиями – агенты первого типа придерживаются традиционной стратегии, для которой характерна высокая рождаемость, а агенты второго типа – современной, при которой рождаемость существенно ниже. Причем, нами используется суммарный коэффициент рождаемости, то есть, среднее число детей, рождаемых женщиной в течение репродуктивного периода, что позволяет перенести фокус моделирования на уровень отдельных агентов. Кроме суммарного коэффициента рождаемости, типы воспроизводства различаются и распределением рождений детей на протяжении репродуктивного периода женщин, как показано на рисунке 1. На рисунке видно, что с переходом к современному типу воспроизводства происходит смещение пика рождений детей с возраста матери в интервале от 20 до 24 лет к интервалу от 25 до 29 лет. В модели на основе этих данных вероятностным образом определяются для каждого агента желаемое максимальное число детей, а также рассчитываются вероятности рождения детей для агентов-женщин фертильного возраста. То есть, эти характеристики зависят от внутренних установок агентов, связанных с принадлежностью к тому или иному типу.

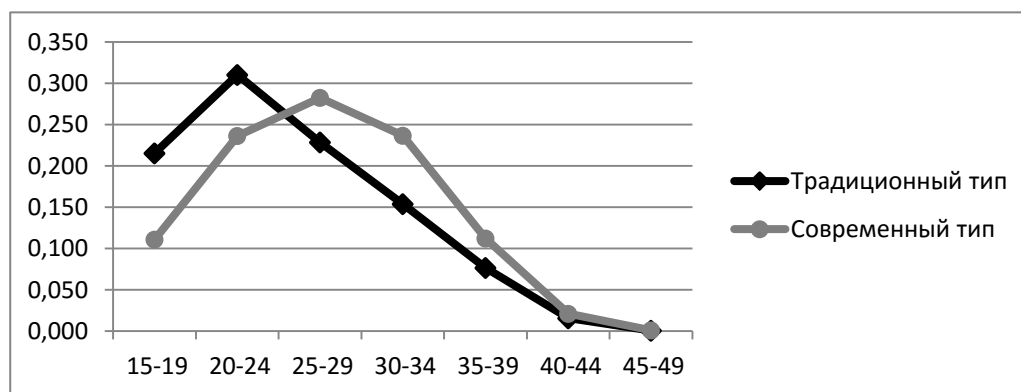


Рис. 1. Доли от общей численности новорожденных для матерей из разных возрастных групп

Территория региона условно разделена на более мелкие единицы – «кварталы», по которым равномерно распределяются агенты.

В начале работы модели устанавливается стартовое состояние среды и создается популяция агентов, личностные характеристики которых (возраст, пол, место жительства, доход, признак принадлежности к определенному типу, желаемое число детей) присваиваются таким образом, чтобы воспроизвести заданную половозрастную и социальную структуру населения моделируемого региона.

Далее на каждом шаге имитации (соответствующем одному году в реальной действительности) на основе использования метода передвижки возрастов и вероятностных механизмов имитируются процессы естественного движения населения региона – смертность, рождаемость и миграция. Вымирание агентов происходит в соответствии с коэффициентами смертности, дифференцированными по полу и возрасту, но одинаковыми для всей популяции. Создание же новых агентов (рождение детей) в модели является результатом действий агентов. Вначале агенты-люди взаимодействуют между собой в процессе образования супружеских пар, при котором происходит согласование партнерами числа желаемых общих детей. А затем для «семейных пар» агентов вероятностным образом решается вопрос о рождении каждого агента-ребенка.

Под миграцией агента в модели понимается его переселение из одного квартала в другой, которое происходит под влиянием экономических факторов. Так, стимулом к переезду становится существенная разница между кварталами в уровне среднедушевых доходов, которая должна превышать затраты на переезд агента и его семьи, а сдерживающим фактором – уровень безработицы в квартале, который выбрал агент в качестве цели переезда.

4. Реализация модели и предварительные результаты

В соответствии с изложенной концепцией нами в среде AnyLogic¹ был разработан прототип агент-ориентированной региональной демографической модели, который представляет собой автономное приложение, обладающее интерфейсом пользователя. Интерфейс модели не только демонстрирует пользователю результаты компьютерного эксперимента, но и позволяет ему варьировать управляемые параметры модели для проведения сценарных расчетов. Приложение работает со своей информационной базой, считывая из нее исходные данные, необходимые для создания популяции агентов и среды их обитания, а также для имитации поведения агентов. Результаты работы модели также сохраняются в базе для их дальнейшей обработки и анализа.

С использованием модели были проведены эксперименты по прогнозированию изменения численности популяции агентов, населяющих условный регион, возрастной структуры этой популяции, а также соотношения численности агентов разных типов для основных возрастных групп и для популяции в целом. Были проведены двадцать экспериментов при следующих значениях параметров:

- общая численность популяции агентов – 100 000;
- доля агентов традиционного типа – 10%;
- показатели смертности для агентов двух типов совпадают;
- суммарный коэффициент рождаемости для агентов-женщин традиционного типа – 3, а для современного типа – 1,4;
- минимальное число желаемых детей для агентов традиционного типа – 2, а максимальное – 10; для агентов современного типа – 0 и 3 соответственно;
- период симуляции – 20 шагов (лет);
- коэффициенты смертности и рождаемости остаются неизменными на протяжении всего периода;

¹ AnyLogic – инструмент имитационного моделирования, который поддерживает все подходы к созданию имитационных моделей, в том числе, и агент-ориентированный. Более подробно: <http://www.anylogic.ru>

- экономические условия отдельных территорий региона («кварталов») совпадают, поэтому миграции агентов не происходит.

В экспериментах использовались статистические данные о рождаемости и смертности по странам ЕС за 2007 год, который был принят в качестве базового.

Результаты экспериментов показали, что модель адекватно имитирует такие наблюдаемые в реальной жизни процессы как снижение общей численности населения, а также его старение – снижение доли населения младших возрастов и увеличение доли пожилых, что видно на рисунке 2.

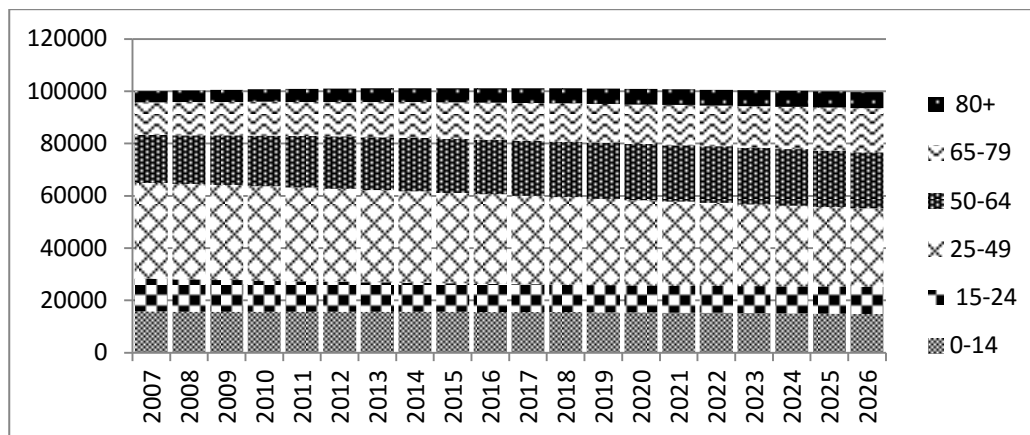


Рис. 2. Динамика возрастной структуры популяции агентов

Анализ структуры популяции агентов с точки зрения их принадлежности к различным типам показал следующее (как показано в таблице 1): доля агентов традиционного типа заметно различалась в разных возрастных группах – она была тем выше, чем возрастная группа моложе (16,9% в младшей возрастной группе от 0 до 14 лет и 7,4% в самой старшей). Более того, при общем небольшом росте этой доли в течение двадцати лет скорость ее роста также была тем выше, чем моложе были агенты. Так, если в среднем по популяции доля агентов традиционного типа выросла с 10% до 13,2%, то в группе самых младших агентов эта доля достигла 24,6%, а в следующей возрастной группе агентов (от 15 до 24 лет) – выросла с 13% до 18,9%.

Таблица 1. Рост численности агентов традиционного типа и их значимости по популяции в целом и по отдельным возрастным группам

Возрастные группы	2007 год		2026 год		Рост доли за период, %
	Численность агентов	Доля в возрастной группе, %	Численность агентов	Доля в возрастной группе, %	
Вся популяция	10000	10,0	13202	13,2	3,2
0-14 лет	2659	16,9	3632	24,6	7,7
15-24 года	1636	13,1	1973	18,9	5,8
25-49 лет	3292	9,0	4107	13,7	4,7
50-64 года	1357	7,4	1811	8,4	1,0
Старше 64 лет	1056	6,3	1679	7,3	1,0

Следует отметить, что численность населения любой страны значительно больше, чем численность агентов, которых способна вместить память персонального компьютера. Кроме того, для пересчета состояния масштабной системы с нетривиальной логикой поведения и взаимодействия агентов требуются значительные вычислительные ресурсы, сопоставимые с потребностями вычислительных методов математической физики с аналогичным количеством расчетных ячеек. Поэтому для проведения масштабных экспериментов был необходим перенос полученной модели на суперкомпьютер и использование специальных методов распараллеливания. Перенос был осуществлен специалистами МГУ В.А. Васениным, В.А. Борисовым и В.А. Рогановым по аналогии с выполненной ранее работой [10], что позволило значительно увеличить популяцию агентов. При этом первоначальная модель и результаты проведенных на ней экспе-

риментов сыграли роль контрольного примера, позволяющего существенно сократить время на отладку и верификацию суперкомпьютерной модели.

Результаты экспериментов на суперкомпьютере показали, что эффективность распараллеливания существенно зависит от архитектуры мультиагентной системы, численности популяции и интенсивности взаимодействия агентов, а также числа используемых ядер вычислительных кластеров. Однако даже в самом неблагоприятном случае суперкомпьютер позволяет значительно ускорить работу модели и расширить тем самым возможности постановки разнообразных компьютерных экспериментов с ней, когда модель запускается или многократно (для набора статистики) или с разными значениями параметров.

Литература

1. Тарасов В.Б. От многоагентных систем к интеллектуальным организациям: философия, психология, информатика. М.: Едиториал УРСС, 2002. 352 с.
2. Agent-Based Computational Demography: Using Simulation to Improve Our Understanding of Demographic Behavior / Ed. by F.C. Billari, A. Prskawetz. Heidelberg: Springer, 2003. 210 p.
3. Diaz B.A. Agent-Based Models of Social Interaction and Demographic Behaviour (Ph.D. Thesis). Wien: Technische Universität, 2010. 85 p.
4. Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V.D. and Noble J. When Demography Met Social Simulation: A Tale of Two Modelling Approaches, Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS), 2013. Vol. 16 (4), Article 9, URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html>. (дата обращения: 24.06.2016).
5. Population Dynamics and Projection Methods, Understanding Population Trends and Processes / Ed. by J. Stillwell, M. Clarke. Springer Science+Business Media B.V., 2011. Vol. 4. 222 p. DOI 10.1007/978-90-481-8930-4_1.
6. Pablo-Marti F., Santos J.S., Kaszowska J. An agent-based model of population dynamics for the European regions. Emergence: Complexity and Organization. 2015. URL: <https://journal.emergentpublications.com/article/an-agent-based-model-of-population-dynamics-for-the-european-regions/>. (дата обращения: 24.06.2016).
7. Groen D. Simulating Refugee Movements: Where would you go? Department of Computer Science, Brunel University London. 2016. URL: <http://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/12519/1/Fulltext.pdf> (дата обращения: 24.06.2016).
8. Вишнеvский А.Г. Воспроизводство населения и общество: История, современность, взгляд в будущее. М.: Финансы и статистика, 1982. 287 с.
9. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона // Экономика региона. 2015. № 3. С. 312-322.
10. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Васенин В.А., Роганов В.А., Трифонов И.А. Средства суперкомпьютерных систем для работы с агент-ориентированными моделями // Программная инженерия. 2011. № 3. С. 2-14.

Multi-agent systems and supercomputing technologies in the social sciences

V.L. Makarov¹, A.R. Bakhtizin¹, E.D. Sushko¹

Central Economics and Mathematics Institute of the Russian Academy of Sciences¹

The paper describes the use of agent-based approach for population movement modeling. The regional demographic model simulates the mortality, fertility and migration processes based on the behavior of individual members of the artificial society. Thus, the creation of new agents (birth of children) in the model is the result of the individual choice of female agents of reproductive age, and this choice depends on their values and culture. The migration of agents is defined based on the difference in the level of income between the different territories within the region. The results of experiments carried out using the model and the supercomputer technology are provided.

Keywords: agent-based modelling, demography, types of population reproduction, forecasting of population size and structure of the region, supercomputing technology.

References

1. Tarasov V.B. Ot mnogoagentnyh sistem k intellektual'nym organizacijam: filosofija, psihologija, informatika [From Multi-Agent Systems to Intellectual Organizations: Philosophy, Psychology, Computer Science]. M.: Editorial URSS, 2002. 352 p.
2. Agent-Based Computational Demography: Using Simulation to Improve Our Understanding of Demographic Behavior / Ed. by F.C. Billari, A. Prskawetz. Heidelberg: Springer, 2003. 210 p.
3. Diaz B.A. Agent-Based Models of Social Interaction and Demographic Behaviour (Ph.D. Thesis). Wien: Technische Universität, 2010. 85 p.
4. Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V.D. and Noble J. When Demography Met Social Simulation: A Tale of Two Modelling Approaches, Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS), 2013. Vol. 16 (4), Article 9, URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html>. (accessed: 24.06.2016).
5. Population Dynamics and Projection Methods, Understanding Population Trends and Processes / Ed. by J. Stillwell, M. Clarke. Springer Science+Business Media B.V., 2011. Vol. 4. 222 p. DOI 10.1007/978-90-481-8930-4_1.
6. Pablo-Marti F., Santos J.S., Kaszowska J. An agent-based model of population dynamics for the European regions. Emergence: Complexity and Organization. 2015. URL: <https://journal.emergentpublications.com/article/an-agent-based-model-of-population-dynamics-for-the-european-regions/>. (accessed: 24.06.2016).
7. Groen D. Simulating Refugee Movements: Where would you go? Department of Computer Science, Brunel University London. 2016. URL: <http://bura.brunel.ac.uk/bitstream/2438/12519/1/Fulltext.pdf> (accessed: 24.06.2016).
8. Vishnevskij A.G. Vosproizvodstvo naselenija i obshhestvo: Istorija, sovremennost', vzgljad v budushhee [The Reproduction of the Population and Society: History, Modernity and Vision for the Future]. M.: Finansy i statistika, 1982. 287 p.
9. Makarov V.L., Bahtizin A.R., Sushko E.D. Imitacija osobennostej reproduktivnogo povedenija naselenija v agent-orientirovannoj modeli regiona [Simulating Reproductive Behavior of Region's Population with Agent-Based Model] // Ekonomika regiona. 2015. No. 3. P. 312-322.
10. Makarov V.L., Bahtizin A.R., Vasenin V.A., Roganov V.A., Trifonov I.A. Sredstva superkomp'juternyh sistem dlja raboty s agent-orientirovannyimi modeljami [Means of Supercom-

puter Systems to Work with an Agent-Based Model] // Программная инженерия. 2011. No. 3. P. 2-14.