

[DOI: 10.17323/2587-814X.2022.1.7.21](https://doi.org/10.17323/2587-814X.2022.1.7.21)

Моделирование миграционных и демографических процессов с использованием FLAME GPU

В.Л. Макаров^a 

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

А.Р. Бахтизин^a 

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

Г.Л. Бекларян^a 

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

А.С. Акопов^{b, a} 

E-mail: aakopov@hse.ru

Н.В. Стрелковский^c 

E-mail: strelkon@iiasa.ac.at

^a Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук
Адрес: Россия, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47

^b Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»
Адрес: Россия, 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20

^c Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА)
Адрес: Австрия, г. Лаксенбург

Аннотация

В данной статье представлен подход к моделированию миграционных и демографических процессов с использованием платформы FLAME GPU, предназначенной для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования. Данный подход основан на ранее предложенной имитационной модели взаимодействия двух сообществ: мигрантов и коренных жителей, реализованной в системе AnyLogic. Такая модель имела относительно малую размерность дискретного пространства для существования популяций и детерминированную систему принятия решений каждого агента. Вместе с тем, наличие множественных взаимодействий между агентами и переходов между их состояниями обуславливает высокую вычислительную сложность подобной модели. Использование FLAME GPU позволило существенно расширить возможности проведения численных экспериментов, главным образом, за счет распараллеливания вычислительных процессов на уровне каждого агента и занимаемого им ресурса, а также реализации механизма множественных вычислений класса Монте-Карло. В результате исследованы зависимости ключевых характеристик рассматриваемой системы (в частности, общей численности населения, доли мигрантов, количества ассимилированных мигрантов, темпов роста ВВП и др.) от наиболее важных параметров модели (например, доли новых мигрантов, государственных расходов на интеграцию, периодичности создания новых рабочих мест и др.). Предложенный подход может быть использован для разработки систем поддержки принятия решений по планированию найма новых сотрудников на основе прогнозной динамики миграционных и демографических процессов.

Ключевые слова: агентное моделирование, миграционные и демографические процессы, популяционная динамика, крупномасштабное моделирование, параллельные вычисления на GPU, суперкомпьютерное моделирование, поддержка принятия решений

Цитирование: Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Стрелковский Н.В. Моделирование миграционных и демографических процессов с использованием FLAME GPU // Бизнес-информатика. 2022. Т. 16. № 1. С. 7–21. DOI: 10.17323/2587-814X.2022.1. 7.21

Введение

В настоящее время многие компании и организации сталкиваются с дефицитом трудовых ресурсов, необходимостью формирования плана найма новых сотрудников на долгосрочную перспективу с учётом прогнозируемой динамики миграционных и демографических процессов. В условиях ухудшения внутренней демографической ситуации, многие предприятия вынуждены переориентироваться на привлечение мигрантов. Однако, из-за наличия множества препятствий, обусловленных недостаточным уровнем владения местным языком, отсутствием требуемого уровня квалификации и ряда других факторов, возникают естественные ограничения в привлечении внешней рабочей силы, которые могут быть преодолены только за счёт процессов ассимиляции и интеграции, реализуемых в свою очередь в условиях финансовой поддержки со стороны государства.

Разработка систем поддержки принятия по планированию найма новых сотрудников и созданию новых рабочих мест может быть основана на имитационных моделях, учитывающих прогнозную динамику рынка трудовых ресурсов. Так, например, в условиях распространения эпидемий, государством могут быть введены ограничения на приток внешней рабочей силы, приводящие к дефициту трудовых ресурсов в отраслях экономики, ориентированных на мигрантов. С другой стороны, развитие высокотехнологичных предприятий обуславливает необходимость создания новых рабочих мест, привлекательных для высококвалифицированного местного населения. При этом, ключевым вопросом для бизнеса и государства является обеспечение рационального сосуществования двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей.

В результате, актуализируется задача исследования и прогнозирования миграционных и демографических процессов с использованием методов имитационного моделирования. Подобные методы, в

частности, агент-ориентированный подход (АОМ), позволяют построить и исследовать поведение цифрового сообщества, состоящего из агентов со своими индивидуальными правилами поведения.

Среди известных агент-ориентированных моделей дискретного типа (т.е., с дискретным пространством существования агентов) можно выделить хорошо известную «Сахарную модель» (Sugarscape model) [1], которая получила широкое распространение в качестве инструмента анализа привлекательности локальных участков с ресурсами («условным сахаром») для агентов. Следует отметить модель «кочевников и землепашцев» [2, 3], в которой одни агенты («условные землепашцы») создают ресурсы, а другие уничтожают их с целью расширения личного пространства («условные кочевники»). Также, хорошо известны модели сегрегации населения класса Шеллинга [4, 5], модели движения ансамбля беспилотных транспортных средств [6, 7], модели миграционных и демографических процессов [8–10] и др.

Среди инструментов имитационного моделирования, позволяющих реализовать АОМ общего назначения, можно выделить NetLogo, AnyLogic [11], а также системы, предназначенные для суперкомпьютерного агентного моделирования Repast HPC [12], MASS CUDA [13, 14], FLAME GPU [15–18] и др.

В целом, большинство подобных систем различаются способом программной реализации агентов: либо с использованием только одного центрального процессора CPU (например, NetLogo, AnyLogic), либо на основе мультикластерной архитектуры на основе семейства CPU (Repast HPC) и методов MPI (Message Passing Interface), и, наконец, на основе графических процессоров GPU (Graphics Processing Unit) [19]. Среди данных платформ следует выделить, FLAME GPU ², которая характеризуется рядом преимуществ. Данная платформа является свободным программным обеспечением с открытым исходным кодом, поддерживает возможность

¹ <https://flamegpu.com/>

визуализации модели с использованием программной библиотеки OpenGL [20]. Кроме того, она позволяет осуществлять множественный запуск ансамбля моделей [21–24], как на персональном компьютере (ПК) с использованием Visual Studio C++, так и под управлением операционной системы Linux на суперкомпьютерных системах класса NVIDIA CUDA² (например, NVIDIA QUADRO RTX, NVIDIA Tesla и т.д.). В результате обеспечивается гибкий подход к разработке АОМ на обычных ПК и проведению вычислительных экспериментов на кластерах GPU.

Платформа FLAME GPU использовалась для разработки агентных моделей в различных областях – от биологии до экономики. Насколько известно авторам данной статьи, на момент её написания платформа FLAME GPU применялась для моделирования миграционных процессов лишь в двух работах [25, 26]. Другие наиболее близкие работы – моделирование поведения агентов в «сахарной» модели, описанной выше [27]. Моделирование миграционных процессов представляет дополнительную техническую сложность в связи с необходимостью динамически создавать агентов-мигрантов в процессе симуляции.

Данная работа нацелена на разработку агент-ориентированной модели популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: коренных жителей и мигрантов с программной реализацией в системе суперкомпьютерного имитационного моделирования FLAME GPU. Предлагаемый подход позволил осуществить серию вариационных экспериментов и выявить важные зависимости в динамике исследуемых миграционных и демографических процессах.

1. Общее описание модели

Рассматривается искусственная социально-экономическая система, состоящая из коренного и внешнего населения, взаимодействующего друг с другом посредством как личных контактов типа «агент-агент», так и с помощью передачи сообщений. В подобной системе агентами являются как индивидуумы (коренные жители и мигранты), так ресурсы, которые обладают «способностью» оценивать ближайших агентов и отправлять им информацию о своем состоянии и соответствии интересам агентов. В данном случае, высокотехнологичные

ресурсы в большей степени соответствуют коренным жителям, а низкотехнологичные – мигрантам.

Таким образом, важной особенностью реализации имитационной модели взаимодействия сообществ мигрантов и коренных жителей во FLAME GPU, является механизм непрерывного обмена сообщениями между агентами и ресурсами.

Как и ранее, многочастичные взаимодействия агентов моделируются в двумерном дискретном пространстве с относительно небольшой размерностью 100×100 и вместимостью не более 10 000 агентов. При этом реализация модели во FLAME GPU направлена в большей степени на повышение временной эффективности модели в условиях выполнения множественных расчетов с использованием методов класса Монте-Карло. Размерность дискретного пространства, ограничивающего как количество имеющихся рабочих мест, так и численность связанных с ними агентов, может быть существенно увеличена практически без потерь временной эффективности, главным образом, за счет распараллеливания вычислительных процедур («функций уровня агентов») на графических процессорах (GPU). В подобном дискретном пространстве агент может занимать только одну ячейку с рабочим местом или без него в каждый момент времени. Вместе с тем, сложность параллельной реализации рассматриваемой модели и отсутствие автоматической синхронизации агентов во FLAME GPU, обуславливают необходимость дополнительного контроля данного правила и устранения возможных коллизий в случае необходимости.

Как и ранее, в модели обеспечивается создание «высокотехнологичных» и «низкотехнологичных» рабочих мест, на которые нацелены коренные жители и мигранты, соответственно. Оба типа рабочих мест обеспечивают занимающих их агентов-индивидуумов приращением уровня личного комфорта. Вместе с тем, на уровень личного комфорта коренного населения негативно влияет соседство с агентами-мигрантами, что обуславливается имеющимися культурными различиями и психологическими особенностями агентов.

Все рабочие места формируются централизованно и равномерно случайным образом во всех свободных ячейках дискретного пространства с разными вероятностями, заданными для «высокотехнологичных» и «низкотехнологичных» рабочих

² <https://developer.nvidia.com/>

мест, соответственно. Несмотря на то, что данный подход является наиболее затратным для государства, он может помочь избежать дефицита рабочих мест, что особенно важно при высоких темпах миграции. К тому же, большее количество равномерно распределенных рабочих мест, позволяет существенно увеличить количество взаимных контактов между коренными жителями и мигрантов, что положительно влияет на уровень владения местным языком, возможность получения релевантного местного образования и т.д., что способствует снижению времени, требуемого на ассимиляцию и интеграцию.

Вклад «высокотехнологичных» и «низкотехнологичных» рабочих мест, занятых, как правило, коренными жителями и мигрантами, в экономический рост (ВВП) и государственные трансферты (ГТ) различен. Отношение ВВП на единицу трудовых ресурсов в «высокотехнологичных» отраслях экономики, значительно выше по сравнению с «низкотехнологичными». При этом, создание «низкотехнологичных» рабочих мест обуславливает дополнительные государственные расходы, которые также увеличиваются с ростом количества «безработных» агентов.

В модели обеспечивается приток мигрантов с последующей «трансформацией» прибывающих агентов в коренных жителей по истечению срока необходимого на ассимиляцию (1–30 лет). Иммиграция обусловлена в основном «гравитационным эффектом» [10], задающим усиливающую обратную связь между количеством имеющихся неассимилированных мигрантов и интенсивностью притока новых. При этом, в модели доля новых иммигрантов (от числа уже имеющихся), как и затраты на образование и интеграцию являются ключевыми управляющими параметрами. Поэтому, миграционный процесс в подобной системе, можно рассматривать как «управляемый» и «контролируемый» со стороны лица принимающего решения (государства).

На каждом шаге модели агентами реализуется поиск ближайшего рабочего места, соответствующего его типу. Вместе с тем, особенностью технической реализации модели во FLAME GPU является обратный порядок реализации данной процедуры, т.е., ресурсы отбирают себе наиболее подходящих агентов, и, в случае положительного исхода, назначают им свои координаты в качестве целевых ячеек, одновременно блокируя доступ всем остальным агентам.

Также агенты-коренные жители и агенты-мигранты осуществляют поиск наиболее подходящего партнера для брака и рождения детей (т.е., с учетом его возраста, семейного статуса и др.). Если уровень личного комфорта агента ниже заданного порогового уровня, он ищет работу, если выше и он пока не имеет семейных связей, то осуществляется поиск партнера для брака и рождения детей (конечно при условии подходящего возраста и прочих характеристик).

Итак, все агенты-индивидуумы могут находиться в стационарном состоянии, состоянии поиска рабочего места, состоянии поиска партнера, состоянии готовности иметь детей и т.д. Агенты-мигранты могут также перейти в состояние ассимиляции по истечению некоторого срока, являющегося эндогенной характеристикой модели. При этом, коренные жители характеризуются более высокими значениями пороговых характеристик (в частности, минимальный уровень личного комфорта), обуславливающих их переход в новые состояния, например, состояние поиска рабочего места, стационарное состояние, рождение детей и др.

Формальная постановка задачи и детализированное описание модельных зависимостей (без учета эффекта ассимиляции и интеграции) представлены в работе [8].

2. Программная реализация

Основные вычислительные процедуры и функции предложенной имитационной модели представлены в *таблице 1* с учётом условной последовательности их исполнения. Функции типа **FLAMEGPU_STEP_FUNCTION** реализуются в каждый модельный момент времени на уровне центрального процессора (CPU), функции класса **FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION** последовательно выполняются в режиме параллельных вычислений с использованием графических процессоров (GPUs). При этом, более высокая производительность в сравнении с традиционным способом реализации агент-ориентированных моделей достигается за счет распараллеливания логики работы каждого агента, обменивающихся друг с другом сообщениями с учётом их пространственного расположения.

В *таблице 1* под данными «по агентам» понимаются характеристики агентов-коренных жителей и агентов-мигрантов (например, пол, возраст, семейный статус, тип агента и т. д.), а «данные по ресурсам»

Таблица 1.

**Основные вычислительные процедуры
и функции имитационной модели**

Название функции	Назначение	Входные сообщения	Выходные сообщения
FLAMEGPU_INIT_FUNCTION (init_function)	Инициализация модели. Формирование начальных популяций коренных жителей, мигрантов и рабочих мест.	Нет	Нет
FLAMEGPU_STEP_FUNCTION (BasicOutput)	Прибытие новых агентов-мигрантов, рождение новых агентов (коренных жителей и мигрантов) у семейных пар (с большей вероятностью) и одиночных агентов (с меньшей вероятностью).	Нет	Нет
FLAMEGPU_STEP_FUNCTION (AgentUpdate)	Оценка (т.е. сбор) результатов вычислений по ансамблю агентов в каждый момент времени.	Нет	Нет
FLAMEGPU_EXIT_CONDITION (exit_condition)	Проверка выполнения критерия останова модели.	Нет	Нет
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (check_all_agents, MsgArray2D, MsgNone)	Проверка и устранение потенциальных коллизий, обусловленных случайным попаданием агентов в одну ячейку дискретного пространства	Данные по агентам	Нет
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (workplaces_creation, MsgNone, MsgNone)	Создание новых рабочих мест на основе имеющейся популяции ресурсов. Выбытие рабочих мест.	Нет	Данные по ресурсам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (update_cell, MsgArray2D, MsgArray2D)	Распространение информации агентам об имеющихся ресурсах (рабочих местах). Проверка «занятости» ресурса агентом.	Данные по агентам	Данные по ресурсам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (check_cell, MsgArray2D, MsgArray2D)	Распространение информации другим агентам (коренным жителям и мигрантам) об имеющихся агентах (со своими характеристиками) и занимаемых ими ресурсах. Определение типа ресурса, занимаемого агентом.	Данные по ресурсам	Данные по агентам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (agent_to_agent_contacts, MsgArray2D, MsgNone)	Оценка частоты контактов типа «агент-агент» (в рамках 8-клеточного «Мурова соседства») для оценки (пересчета) уровня владения местным языком у мигрантов, и уровня личного комфорта у коренных жителей, снижающегося при контакте с мигрантами.	Данные по агентам	Данные по агентам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (looking_for_partner, MsgArray2D, MsgArray2D)	Функция поиска ближайшего партнера, соответствующего заданным критериям (например, пол, возраст, семейный статус и т.д.).	Данные по агентам	Данные по агентам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (get_married, MsgArray2D, MsgNone)	Фиксация брака с агентом, отправившим сообщение на основе уникального идентификатора (ID).	Данные по агентам	Нет
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (looking_for_resource, MsgArray2D, MsgArray2D)	Функция поиска агента, наиболее близко расположенного к каждому рабочему месту и находящегося в состоянии поиска работы. Назначение целевой ячейки с ресурсом отобранному агенту.	Данные по агентам	Данные по ресурсам
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (update_agent_state, MsgNone, MsgNone)	Обновление состояния каждого агента, в зависимости от значений его характеристик (например, уровня личного комфорта, возраста, семейного статуса и т.д.).	Нет	Нет
FLAMEGPU_AGENT_FUNCTION (moving_transaction, MsgArray2D, MsgNone)	Транзакция перемещения агента в дискретном пространстве с целью занятия рабочего места, на основе данных о целевой ячейке, переданных соответствующим ресурсом.	Данные по ресурсам	Нет

представляют собой характеристики рабочих мест (например, тип ресурса, «занят/свободен» и т.д.).

Разработанная имитационная модель поддерживает два основных способа выполнения вычислительных процедур:

- ♦ одиночный расчет, выполняемый для одного выбранного сценария с фиксированными значениями управляющих параметров и визуализацией состояния агентов с использованием библиотек Open GL [20];
- ♦ множественные вычисления, реализуемые с использованием метода класса Монте-Карло [21–24] за счет параллельного запуска имитационной модели в режиме так называемого «ансамбля». Данный подход позволяет варьировать значениями управляющих параметров в заданных диапазонах, в частности, с использованием равномерного, нормального и др. функций распределения со своими характеристиками.

Визуализация состояний агентов во FLAME GPU выполняется с использованием Open GL и, в частности, представляет собой решетку заданной размерности, в ячейках которой размещаются агенты: мигранты и коренные жители, и ресурсы: высокотехнологичные и низкотехнологичные рабочие места. Также, имеются свободные клетки, не содержащие ресурсов и агентов. При этом, если агент трудоспособного возраста занимает клетку, не имеющую рабочего места, то, он считается без-

работным и уровень его личного комфорта будет постепенно снижаться. Отметим, что визуализация состояний агентов и их динамика, т.е. перемещение в новые клетки дискретного пространства реализуется в каждый момент модельного времени. Подобный подход, позволяет качественно оценить развитие популяций с учётом индивидуального выбора агентами наиболее предпочтительных рабочих мест, а также изучить эффекты сегрегации и др.

3. Результаты численных экспериментов

Все расчеты проводились на суперкомпьютере FORSITE DSWS PRO на базе QUADRO RTX 6000 на временном интервале 80 лет. Общее количество агентов-ресурсов в модели фиксировано (10 000) и ограничено размерностью заданного дискретного пространства (100 × 100). Количество агентов-коренных жителей и мигрантов меняется в диапазоне от 0 до 10 000, и является результатом имитационного эксперимента. Значения основных параметров модели представлены в *таблице 2*.

На *рис. 1–4* представлены частотные диаграммы для наиболее важных характеристик исследуемой системы, полученные с использованием метода класса Монте-Карло, агрегированного с предложенной агентной моделью посредством ее управляющих параметров и целевых функционалов.

Таблица 2.

Основные параметры модели

Наименование параметра	Минимальное значение	Максимальное значение
Доля новых мигрантов (от численности уже имеющих)	0,1	0,5
Доля государственных расходов на образование в ВВП на душу населения	0,1	0,5
Время жизни высокотехнологичных рабочих мест	5	15
Время жизни низкотехнологичных рабочих мест	5	15
Периодичность формирования новых рабочих мест	5	15
Продолжительность жизни коренных жителей	70	90
Продолжительность жизни мигрантов	60	80
Минимальный возраст вступления в брак и рождения детей коренных жителей	18	30
Минимальный возраст вступления в брак и рождения детей мигрантов	18	30
Минимальный уровень личного комфорта коренных жителей	3	10
Минимальный уровень личного комфорта мигрантов	3	10
Пенсионный возраст	60	75

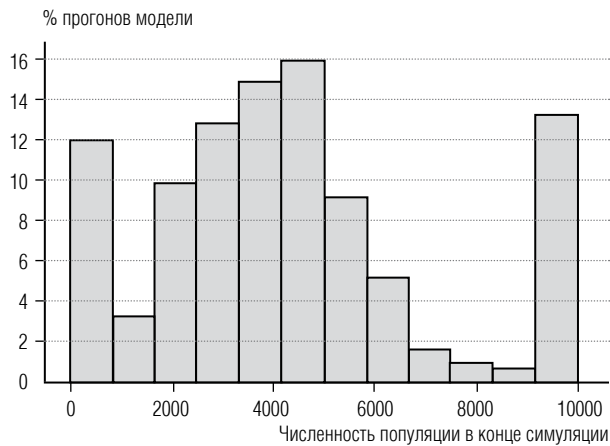


Рис. 1. Частотная диаграмма для численности популяции.

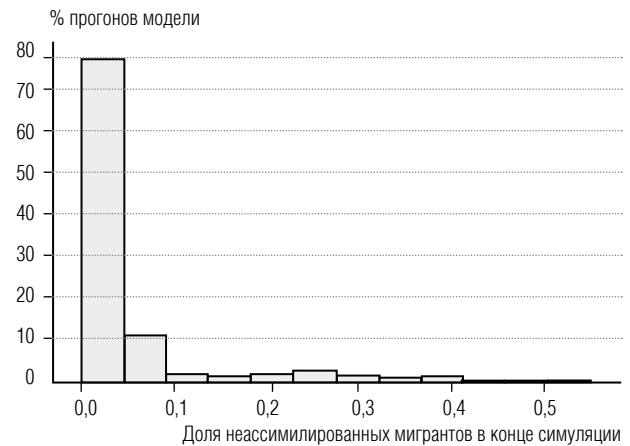


Рис. 3. Частотная диаграмма для доли неассимилированных мигрантов

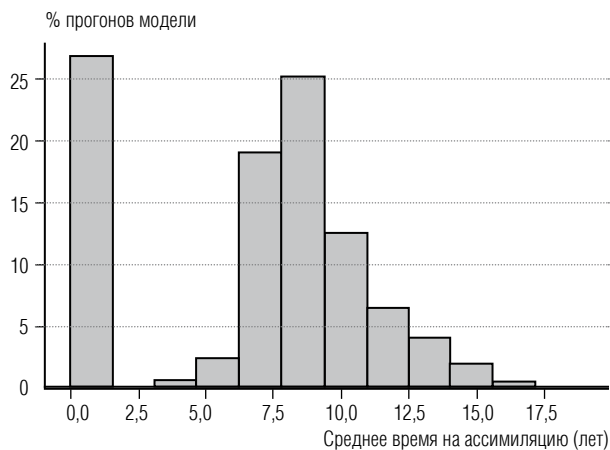


Рис. 2. Частотная диаграмма для среднего времени, требуемого на ассимиляцию и интеграцию.

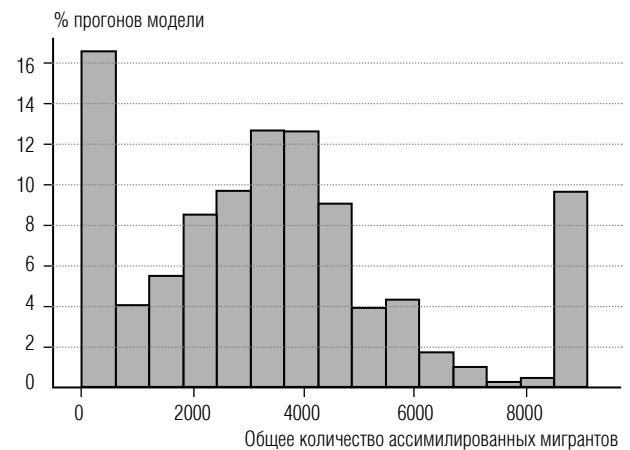


Рис. 4. Частотная диаграмма для общего количества ассимилированных мигрантов.

Отметим, что в ходе выполнения численных экспериментов были проведены множественные прогоны модели (более 1000) и отобраны наиболее различающиеся по оцениваемым характеристикам сценарии, визуализированные на рис. 1–4.

Как следует из рис. 1–4 медианные значения моделируемых показателей имеют явно выраженные значения. Также отметим частую наблюдаемость граничных значений показателей. При этом, по-видимому, существуют сценарии некоторого улучшения требуемых целевых характеристик (например, среднего времени, требуемого на ассимиляцию), однако они требуют больших государственных расходов на образование, увеличение числа рабочих мест и т.д.

Из рис. 5 следует, что не наблюдается однозначной зависимости доли неассимилированных мигрантов от среднего времени, требуемого на их ассимиляцию.

симиляцию — для самых частых значений первого показателя (от 7 до 12 лет) возможны разные значения второго: от 0 до 0,55.

Данные, изображенные на рис. 6, показывают практически линейную зависимость численности модельной популяции (общего числа агентов-коренных жителей и агентов-мигрантов) и общего количества ассимилированных мигрантов.

Далее, рассматриваются наиболее важные группы сценариев эволюционного развития сообществ мигрантов и коренных жителей:

- ♦ сценарии малоинтенсивной и нормальной миграции;
- ♦ сценарии интенсивной и сверхинтенсивной миграции.

Ключевые характеристики исследуемых сценариев представлены в таблице 3.

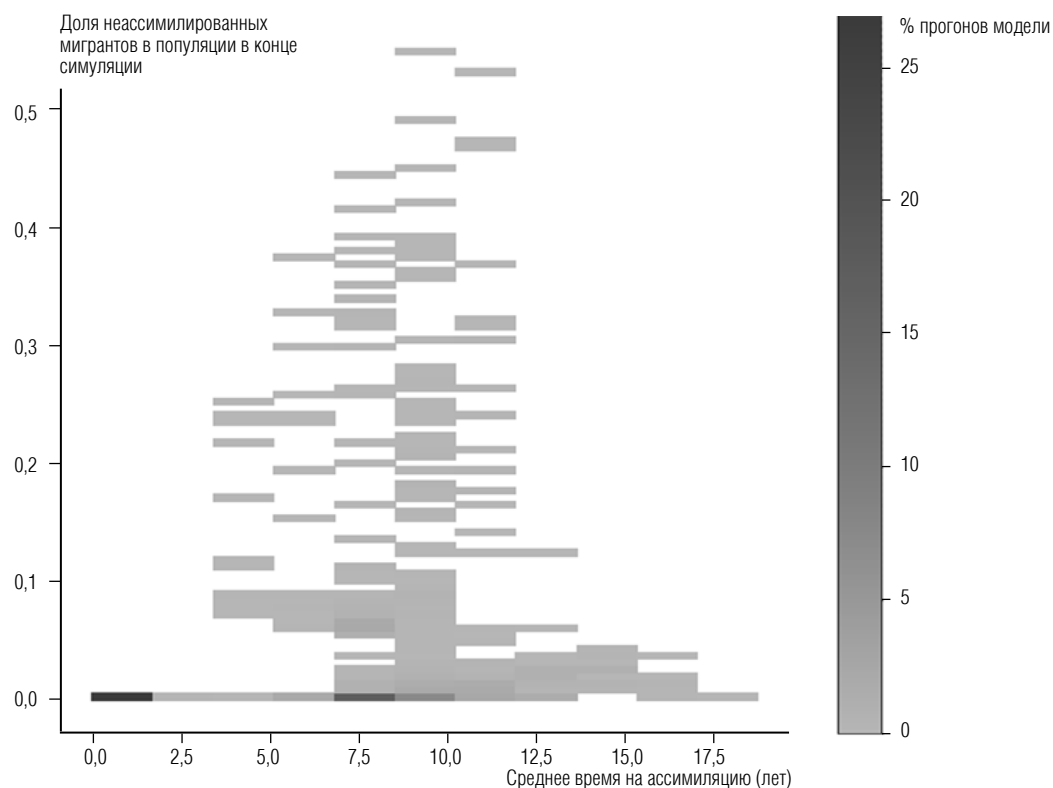


Рис. 5. Двумерная частотная диаграмма для среднего времени, требуемого на ассимиляцию и интеграцию и доли неассимилированных мигрантов.

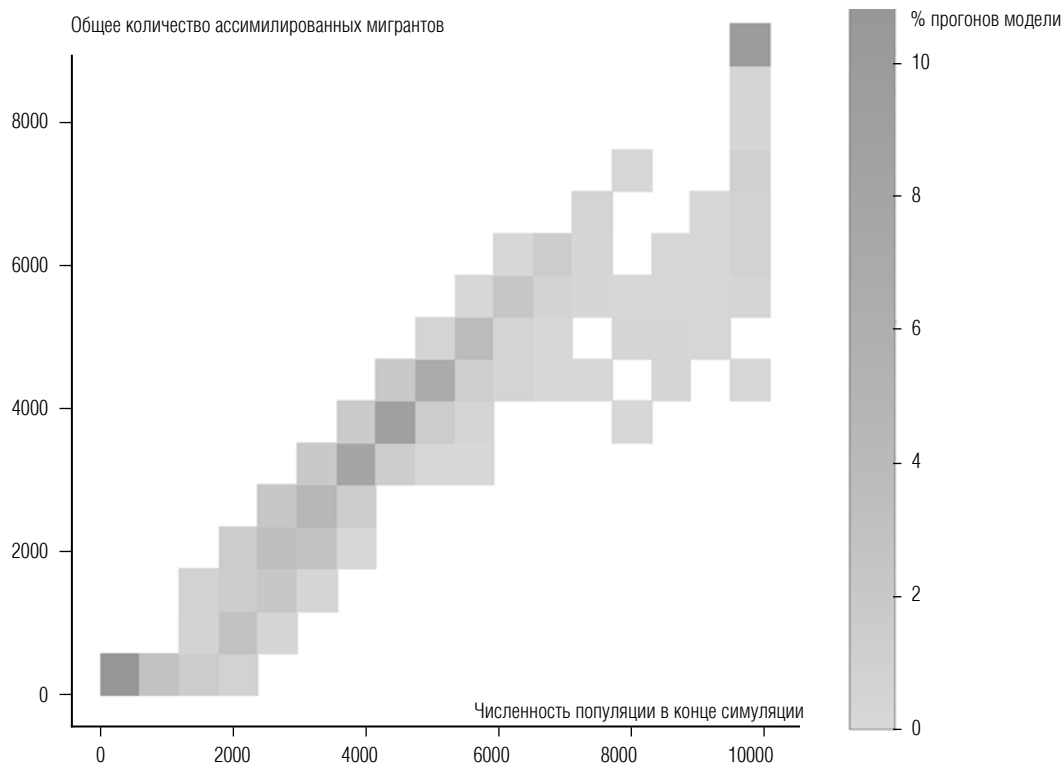


Рис. 6. Двумерная частотная диаграмма для численности модельной популяции и общего количества ассимилированных мигрантов.

Таблица 3.

Исследуемые сценарии и модельные допущения

Группа сценариев	Номер Сценария	Доля новых мигрантов	Доля гос. расходов на образование и интеграцию
Сценарии малоинтенсивной (нормальной) миграции	Сценарий 1	0,1	0,1
	Сценарий 2	0,1	0,25
	Сценарий 3	0,1	0,5
Сценарии интенсивной миграции	Сценарий 4	0,2	0,1
	Сценарий 5	0,2	0,25
	Сценарий 6	0,2	0,5
Сценарии сверхинтенсивной миграции	Сценарий 7	0,3	0,1
	Сценарий 8	0,3	0,25
	Сценарий 9	0,3	0,5

На рис. 7–10 представлена модельная динамика ключевых характеристик рассматриваемой системы на интервале в 80 модельных лет, являющаяся результатом поведения ансамбля взаимодействующих агентов — коренных жителей и мигрантов.

Из рис. 7–8 следуют следующий важный вывод. При существующих паттернах поведения агентов, существенного увеличения численности популяции можно достичь только в условиях интенсивной и сверхинтенсивной миграции. Однако, подобные сценарии вызовут существенный рост доли мигрантов в численности популяции, что может привести к росту социальной напряженности.

Из рис. 9 следует, что наибольшие темпы роста ВВП можно достичь при сценариях интенсивной миграции, однако последующий за этим дефицит ресурсов приводит к постепенному снижению темпов экономического роста.

Из рис. 10 следует, что сценарии интенсивной и сверхинтенсивной миграции обуславливают существенный рост государственных расходов, в основном, связанный с необходимостью увеличения расходов на образование и интеграцию мигрантов, создания соответствующих рабочих мест, выплаты пособий по безработице и т. д.

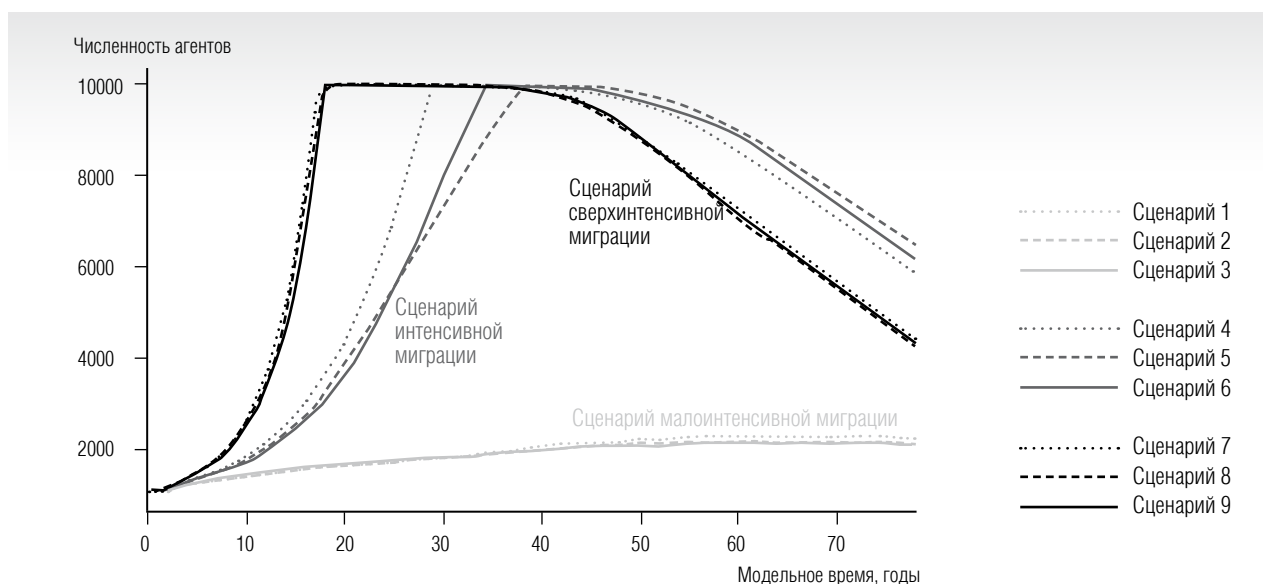


Рис. 7. Модельная динамика численности популяции.

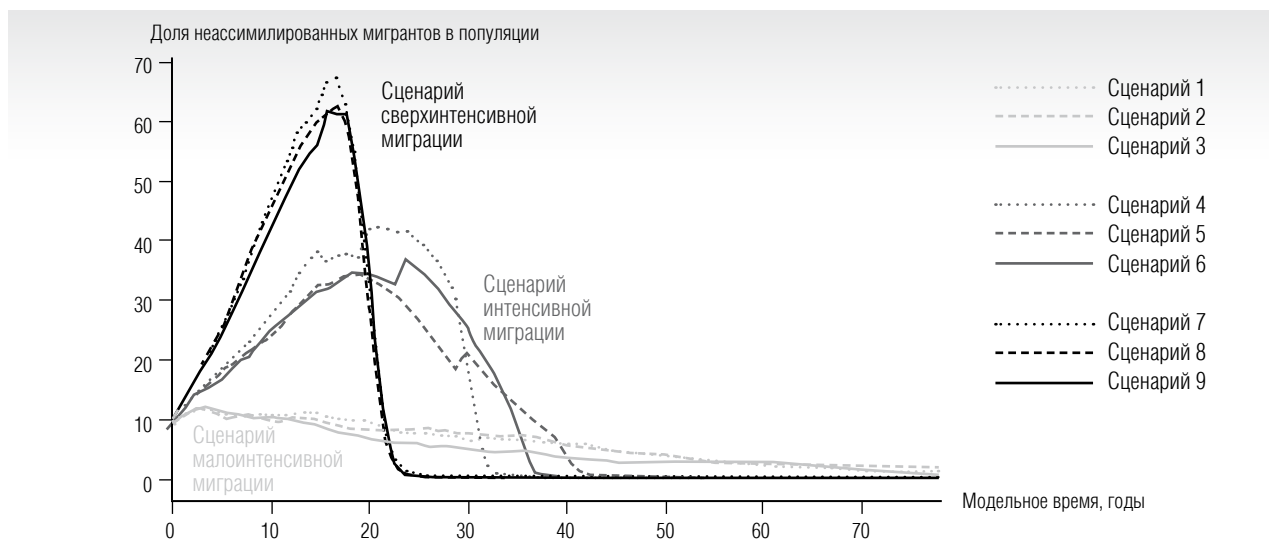


Рис. 8. Модельная динамика доли неассимилированных мигрантов в популяции.

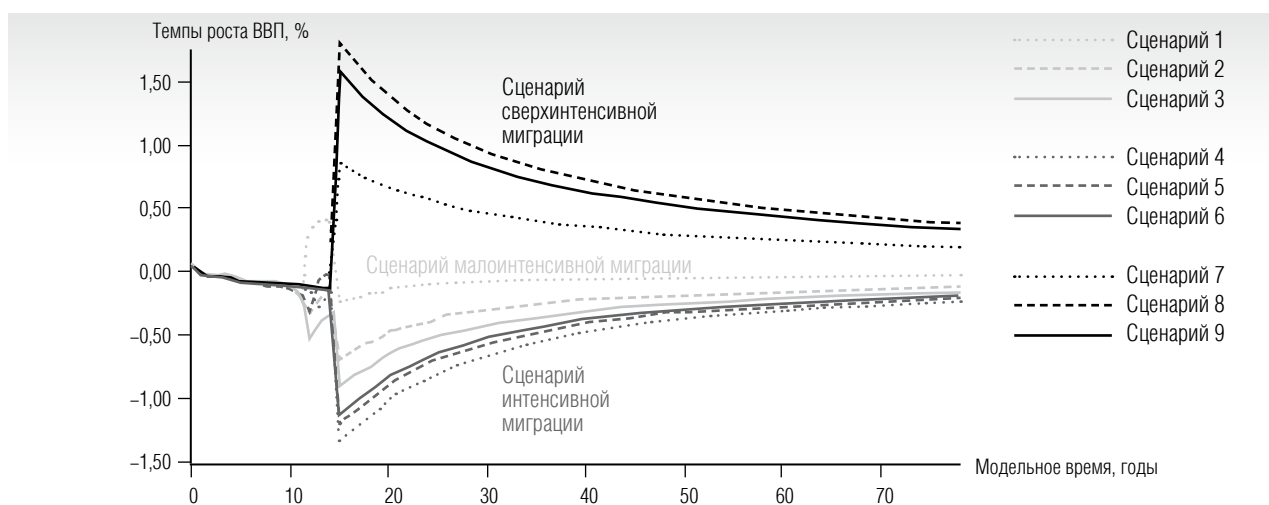


Рис. 9. Модельная динамика темпов роста ВВП.

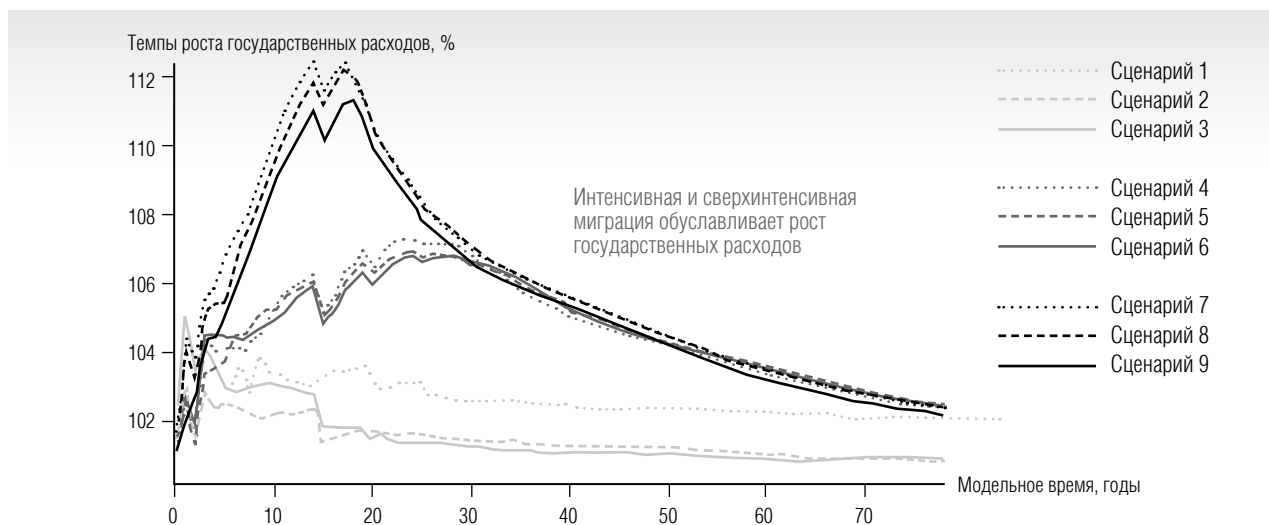


Рис. 10. Модельная динамика государственных расходов.

Заключение

В данной статье представлен новый подход к моделированию миграционных и демографических процессов с использованием FLAME GPU – платформы, предназначенной для суперкомпьютерного агент-ориентированного моделирования. Данная платформа позволяет распараллелить логику функционирования имитационной модели на уровне каждого агента, обеспечив существенное повышение временной эффективности соответствующих вычислительных процедур.

В результате с использованием искусственных данных и методов класса Монте-Карло выполнены исследования наиболее важных характеристик модели взаимодействия коренных жителей и мигрантов: численности популяции, среднего времени, требуемого на ассимиляцию, доли неассимилированных мигрантов в популяции и др. Определены сценарии, обеспечивающие положительный вклад в темпы экономического и демографического роста. При этом, реализация подобных сценариев, осно-

ванных преимущественно на интенсивной миграции, обуславливает необходимость существенного увеличения государственных расходов на образование и интеграцию.

Предложенный подход может быть использован для разработки систем поддержки принятия решений по планированию найма новых сотрудников на основе прогнозной динамики миграционных и демографических процессов.

Дальнейшие исследования будут направлены на усложнение и детализацию модели взаимодействия мигрантов и коренных жителей, применение методов кластеризации для формирования рабочих мест, исследование эффектов сегрегации и др., с использованием FLAME GPU. ■

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), в рамках научного проекта № 18-51-14010.

Литература

1. Epstein J.M., Axtell R. Growing artificial societies: Social sciences from the bottom up. Cambridge, MA: MIT Press. 1996. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3374.001.0001>
2. Белоусов Ф.А. Модель «кочевников» и «землепашцев» с ограниченным ресурсом пространственного перемещения // Экономика и математические методы. 2018. Т. 54. № 4. С. 124–131. <https://doi.org/10.31857/S042473880003336-8>
3. Белоусов Ф.А. Модель сообществ с двумя способами воспроизводства продукта (модель «кочевников» и «землепашцев») // Экономика и математические методы. 2017. Т. 53. № 3. С. 93–109.
4. Schelling T.C. Dynamic models of segregation // The Journal of Mathematical Sociology. Informa UK Limited. 1971. Vol. 1. No. 2. P. 143–186. <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>
5. Акопов А.С., Бекларян А.Л., Бекларян Л.А., Белоусов Ф.А., Хачатрян Н.К. Кластеризация агентов в модели сегрегации населения // Искусственные общества. 2020. Т. 15. № 4 [Электронный ресурс]: <https://artsoc.jes.su/s207751800012764-9-1/> (дата обращения: 30.06.2021). <https://doi.org/10.18254/S207751800012764-9>
6. Акопов А.С., Бекларян Л.А., Бекларян А.Л., Белоусов Ф.А. Моделирование движения ансамбля наземных беспилотных транспортных средств с использованием FLAME GPU // Информационные технологии. 2021. Т. 27. № 7. С. 339–349. <https://doi.org/10.17587/it.27.369-379>
7. Акопов А.С., Бекларян А.Л. Сценарное моделирование движения беспилотных транспортных средств в искусственной дорожной сети с использованием FLAME GPU // Искусственные общества. 2021. Т. 16. № 1. [Электронный ресурс]: <https://artsoc.jes.su/s207751800014028-9-1/> (дата обращения: 30.06.2021). <https://doi.org/10.18254/S207751800014028-9>
8. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей // Экономика и математические методы. 2020. Т. 56. № 2. С. 5–19. <https://doi.org/10.31857/S042473880009217-7>
9. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С. Агентно-ориентированная модель миграции в страны Европейского Союза с учетом индивидуальной системы принятия решений // Искусственные общества. 2019. Т. 14. № 2 [Электронный ресурс]: <https://artsoc.jes.su/s207751800005804-3-1/> (дата обращения: 30.06.2021). <https://doi.org/10.18254/S207751800005804-3>
10. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Бекларян Г.Л., Акопов А.С., Ровенская Е.А., Стрелковский Н.В. Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран европейского союза // Экономика и математические методы. 2019. Т. 55. № 1. С. 3–15. <https://doi.org/10.31857/S042473880004044-7>
11. Borshchev A. The big book of simulation modeling: Multimethod modeling with AnyLogic 6. AnyLogic North America. 2013.
12. Collier N., North M. Parallel agent-based simulation with repast for high performance computing // Simulation. 2013. Vol. 89, No. 10. P. 1215–1235. <https://doi.org/10.1177/0037549712462620>
13. Lysenko M., Roshan M.D. A framework for megascale agent based model simulations on graphics processing units // Journal of Artificial Societies and Social Simulation. 2008. Vol. 11. No. 4. [Электронный ресурс]: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/10.html> (дата обращения: 30.06.2021).

14. Emau J., Chuang T., Fukuda M. A multi-process library for multi-agent and spatial simulation // In Proc. of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing – PACRIM'11. P. 369–376. Victoria, BC, Canada, 24–26 August 2011. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2011.6032921>
15. Richmond P., Walker D., Coakley C., Romano D. High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU // Briefings in bioinformatics. 2010. Vol. 11. P. 334–347. <https://doi.org/10.1093/bib/bbp073>
16. Kabiri Chimeh M., Heywood P., Pennisi M. et al. Parallelisation strategies for agent based simulation of immune systems. BMC Bioinformatics 2019. Vol. 20. Article number: 579. <https://doi.org/10.1186/s12859-019-3181-y>
17. Kabiri Chimeh M., Richmond P. Simulating heterogeneous behaviours in complex systems on GPUs // Simulation Modelling Practice and Theory. 2018. Vol. 83. P. 3–17. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.002>
18. Kiran M., Richmond P., Holcombe M., Chin L., Worth D., Greenough C. FLAME: Simulating large populations of agents on parallel hardware architectures // In Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS '10). 2010. P. 1633–1636.
19. Vouzis P.D., Sahinidis N.V. GPU-BLAST: using graphics processors to accelerate protein sequence alignment // Bioinformatics. 2011. Vol. 27. No. 2. P. 182–188. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq644>
20. Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. Equation of state calculations by fast computing machines // The Journal of Chemical Physics. 1953. Vol. 21. No. 6. P. 1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
21. Hastings W.K. Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications // Biometrika. 1970. Vol. 57. No. 1. P. 97–109. <https://doi.org/10.2307/2334940>
22. Fox W.P., Burks R. Monte Carlo simulation and agent-based modeling (ABM) in military decision-making // In: Applications of Operations Research and Management Science for Military Decision Making. International Series in Operations Research & Management Science. 2019. Vol. 283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20569-0_8
23. Nianqiao J., Heng J., Jacob P. Sequential Monte Carlo algorithms for agent-based models of disease transmission. arXiv:2101.12156. 2021. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.12156>
24. McCreynolds T., Blythe D. Advanced graphics programming using OpenGL // In the Morgan Kaufmann series in computer graphics, Morgan Kaufmann, 2005. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-659-3.X5000-8>
25. Márquez C., César E., Sorribes J. Agent migration in HPC systems using FLAME // In Euro-Par 2013: Parallel Processing Workshops. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. Vol. 8374. P. 523–532. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54420-0_51
26. Richey M.K. Scalable agent-based modeling of forced migration. Diss. George Mason University, 2020.
27. Kehoe J. The specification of sugarscape. arXiv:1505.060122015. 2015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.06012>

Об авторах

Макаров Валерий Леонидович

доктор физико-математических наук; академик Российской академии наук;

научный руководитель, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0002-2802-2100

Бахтизин Альберт Рауфович

доктор экономических наук; член-корреспондент Российской академии наук;

директор, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0002-9649-0168

Бекларян Гаянэ Левоновна

кандидат экономических наук;

старший научный сотрудник, лаборатория компьютерного моделирования социально-экономических процессов, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1286-0345

Акопов Андраник Сумбатович

доктор технических наук;

профессор, департамент бизнес-информатики, Высшая школа бизнеса, Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики», 101000, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20;

главный научный сотрудник, лаборатория динамических моделей экономики и оптимизации, Центральный экономико-математический институт, Российская академия наук, 117418, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 47;

E-mail: aakopov@hse.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

Стрелковский Никита Витальевич

кандидат физико-математических наук;

научный сотрудник, Международный институт прикладного системного анализа (МИПСА), г. Лаксенбург, Австрия;

E-mail: strelkon@iiasa.ac.at

ORCID: 0000-0001-6862-1768

Simulation of migration and demographic processes using FLAME GPU

Valery L. Makarov^a

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

Albert R. Bakhtizin^a

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

Gayane L. Beklaryan^a

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

Andranik S. Akopov^{b, a}

E - mail: aakopov @ hse.ru

Nikita V. Strelkovskii^c

E-mail: strelkon@iiasa.ac.at

^a Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences
Address: 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia

^b HSE University
Address: 20, Myasnitskaya Street, Moscow 109028, Russia

^c International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA)
Address: 1, Schlossplatz, Laxenburg A-2361, Austria

Abstract

This article presents an approach to modelling migration and demographic processes using a framework designed for large-scale agent-based modelling – FLAME GPU. This approach is based on the previously developed simulation model of interaction between two communities: migrants and natives that is implemented in the AnyLogic simulation software. Despite a relatively simple configuration of the basic model, in particular, low dimensionality of the discrete space representing the operating environment of the agent populations and a deterministic decision-making system of each agent, the presence of multiple multiparticle interactions and transitions between agent states determines a high computational complexity of such a model. The use of FLAME GPU enables conducting extensive simulation experiments with the model, mainly due to the parallelisation of computational processes at the level of each agent, as well as the implementation of the mechanism of multiple

computations using Monte Carlo techniques. The developed framework is used to study the impact of the most important parameters of the model (e.g., rate of migration, governmental expenditures on integration, frequency of new workplaces creation, etc.) on the key outputs of the modelled socio-economic system (in particular, population size, share of migrants, number of assimilated migrants, GDP growth rate, etc.). The proposed approach can be used to develop decision-making systems for planning hiring new employees based on the forecast dynamics of migration and demographic processes.

Keywords: agent-based modelling, migration and demographic processes, population dynamics, large-scale modelling, parallel computing on GPU, supercomputer modelling, decision support

Citation: Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Strelkovskii N.V. (2022) Simulation of migration and demographic processes using FLAME GPU. *Business Informatics*, vol. 16, no. 1, pp. 7–21.

DOI: 10.17323/2587-814X.2022.1.7.21

References

1. Epstein J.M., Axtell R. (1996) *Growing artificial societies: Social sciences from the bottom up*. Cambridge, MA: MIT Press. <https://doi.org/10.7551/mitpress/3374.001.0001>
2. Belousov F.A. (2018) Model of nomads and plowmen with a limited resource of spatial movement. *Ekonomika I Matematicheskie Metody*, vol. 54, no. 4, pp. 124–131 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880003336-8>
3. Belousov F.A. (2017) Model of civilization with two types of reproduction of product (model of nomads and plowmen). *Ekonomika I Matematicheskie Metody*, vol. 53, no. 4, pp. 93–109 (in Russian).
4. Schelling T.C. (1971) Dynamic models of segregation. *The Journal of Mathematical Sociology*. Informa UK Limited, vol. 1, no. 2, pp. 143–186. <https://doi.org/10.1080/0022250X.1971.9989794>
5. Akopov A.S., Beklaryan A.L., Beklaryan L.A., Belousov F.A., Khachatryan N.K. (2020) Clustering in model of population segregation. *Artificial societies*, vol. 15, no. 4. (in Russian). <https://doi.org/10.18254/S207751800012764-9>
6. Akopov A.S., Beklaryan L.A., Beklaryan A.L., Belousov F.A. (2021) Simulation of motion of an ensemble of unmanned ground vehicles using FLAME GPU. *Information technologies*, vol. 27, no. 7, pp. 339–349 (in Russian). <https://doi.org/10.17587/it.27.369-379>
7. Akopov A.S., Beklaryan A.L. (2021) Scenario simulation of autonomous vehicles motion in artificial road network using FLAME GPU. *Artificial societies*, vol. 16, no. 1 (in Russian). <https://doi.org/10.18254/S207751800014028-9>
8. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V. (2020) Agent-based modelling of population dynamics of two interacting social communities: migrants and natives. *Ekonomika I Matematicheskie Metody*, vol. 56, no. 2, pp. 5–19 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880009217-7>
9. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S. (2019) Agent-based model of migration to European Union countries with taking into account individual decision-making system. *Artificial societies*, vol. 14, no. 2 (in Russian). <https://doi.org/10.18254/S207751800005804-3>
10. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Beklaryan G.L., Akopov A.S., Rovenskaya E.A., Strelkovskii N.V. (2019) Aggregated agent-based simulation model of migration flows of the European Union Countries. *Ekonomika I Matematicheskie Metody*, vol. 55, no. 1. pp. 3–15 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S042473880004044-7>
11. Borshchev A. (2013) *The big book of simulation modeling: Multimethod modeling with AnyLogic 6*. AnyLogic North America.
12. Collier N., North M. (2013) Parallel agent-based simulation with repast for high performance computing. *Simulation*, vol. 89, no. 10, pp. 1215–1235. <https://doi.org/10.1177/0037549712462620>
13. Lysenko M., Roshan M.D. (2008) A framework for megascale agent based model simulations on graphics processing units. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, vol. 11, no. 4. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/11/4/10.html> (accessed 30 June 2021).
14. Emau J., Chuang T., Fukuda M. (2011) A multi-process library for multi-agent and spatial simulation. In *Proc. of 2011 IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and Signal Processing – PACRIM'11*, pp. 369–376. <https://doi.org/10.1109/PACRIM.2011.6032921>
15. Richmond P., Walker D., Coakley C., Romano D. (2010) High performance cellular level agent-based simulation with FLAME for the GPU. *Briefings in bioinformatics*, vol. 11, pp. 334–347. <https://doi.org/10.1093/bib/bbp073>
16. Kabiri C.M., Heywood P., Pennisi M. et al. (2019) Parallelisation strategies for agent based simulation of immune systems. *BMC Bioinformatics*, vol. 20, Article number: 579. <https://doi.org/10.1186/s12859-019-3181-y>
17. Kabiri Chimeh M., Richmond P. (2018) Simulating heterogeneous behaviours in complex systems on GPUs. *Simulation Modelling Practice and Theory*, vol. 83, pp. 3–17. <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2018.02.002>
18. Kiran M., Richmond P., Holcombe M., Chin L., Worth D., Greenough C. (2010) FLAME: Simulating large populations of agents on parallel hardware architectures. In *Proceedings of Proceedings of the 9th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS '10)*, pp. 1633–1636.

19. Vouzis P.D., Sahinidis N.V. (2011) GPU-BLAST: using graphics processors to accelerate protein sequence alignment. *Bioinformatics*, vol. 27, no. 2, pp. 182–188. <https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btq644>
20. Metropolis N., Rosenbluth A.W., Rosenbluth M.N., Teller A.H., Teller E. (1953) Equation of State Calculations by Fast Computing Machines. *The Journal of Chemical Physics*, vol. 21, no. 6, pp. 1087–1092. <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
21. Hastings W.K. (1970) Monte Carlo sampling methods using Markov chains and their applications. *Biometrika*, vol. 57, no. 1, pp. 97–109. <https://doi.org/10.2307/2334940>
22. Fox W.P., Burks R. (2019) Monte Carlo simulation and agent-based modeling (ABM) in military decision-making. In: *Applications of Operations Research and Management Science for Military Decision Making. International Series in Operations Research & Management Science*, vol. 283. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-20569-0_8
23. Nianqiao J., Heng J., Jacob P. (2021) *Sequential Monte Carlo algorithms for agent-based models of disease transmission*. arXiv:2101.12156. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2101.12156>
24. McCreynolds T., Blythe D. (2005) Advanced graphics programming using OpenGL. In: *The Morgan Kaufmann series in computer graphics, Morgan Kaufmann*. <https://doi.org/10.1016/B978-1-55860-659-3.X5000-8>
25. Márquez C., César E., Sorribes J. (2013) Agent migration in HPC systems using FLAME. In: *Euro-Par 2013: Parallel Processing Workshops. Lecture Notes in Computer Science*, vol 8374, Springer, Berlin, Heidelberg, pp. 523–532. https://doi.org/10.1007/978-3-642-54420-0_51
26. Richey M.K. (2020) *Scalable agent-based modeling of forced migration*. Diss. George Mason University.
27. Kehoe J. (2015) *The Specification of Sugarscape*. arXiv:1505.060122015. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1505.06012>

About the authors

Valery L. Makarov

Dr. Sci. (Phys.-Math.); Academician of Russian Academy of Sciences;

Academic Supervisor, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0002-2802-2100

Albert R. Bakhtizin

Dr. Sci. (Econ.); Corresponding Member of Russian Academy of Sciences;

Director, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: albert@cemi.rssi.ru

ORCID: 0000-0002-9649-0168

Gayane L. Beklaryan

Cand. Sci. (Econ.);

Senior Researcher, Laboratory of Computer Modeling of Social and Economic Processes, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: glbeklaryan@gmail.com

ORCID: 0000-0002-1286-0345

Andranik S. Akopov

Dr. Sci. (Tech.);

Professor, Department of Business Informatics, Graduate School of Business, National Research University Higher School of Economics, 20, Myasnitskaya Street, Moscow 101000, Russia;

Chief Researcher, Laboratory of Dynamic Models of Economy and Optimization, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences, 47, Nakhimovsky Prospect, Moscow 117418, Russia;

E-mail: aakopov@hse.ru

ORCID: 0000-0003-0627-3037

Nikita V. Strelkovskii

Cand. Sci. (Phys.-Math.);

Research Scholar, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria;

E-mail: strelkon@iiasa.ac.at

ORCID: 0000-0001-6862-1768