

СОЗДАНИЕ СУПЕРКОМПЬЮТЕРНОЙ ИМИТАЦИИ ОБЩЕСТВА С АКТИВНЫМИ АГЕНТАМИ РАЗНЫХ ТИПОВ И ЕЁ АПРОБАЦИЯ

© 2022 г. В. Л. Макаров^{а,*}, А. Р. Бахтизин^{а,**}, Е. Д. Сушко^{а,***}, Г. Б. Сушко^{а,****}

^аЦентральный экономико-математический институт РАН, Москва, Россия

*E-mail: makarov@cemi.rssi.ru

**E-mail: albert.bakhtizin@gmail.com

***E-mail: sushko_e@mail.ru

****E-mail: gennady.sushko@gmail.com

Поступила в редакцию 28.06.2021 г.

После доработки 30.06.2021 г.

Принята к публикации 15.09.2021 г.

Статья продолжает цикл работ, посвящённых созданию больших агент-ориентированных моделей, построенных как искусственное общество, и разработке программного обеспечения для их реализации — системы проектирования масштабируемых агент-ориентированных моделей МЭБИУС. Базовым ядром системы служит демографическая модель, имитирующая естественное движение населения. Новым этапом в развитии работ, о котором идёт речь в статье, стало создание на основе данного ядра агент-ориентированной модели России, включающей в качестве агентов нового типа семьи, связанные с агентами-людьми иерархически. Кроме того, в модель введены объекты нового типа — проекты, предусматривающие создание в искусственной среде аналогов комплексных управляющих воздействий, направленных на стимулирование рождаемости. Разработанная на основе имитации реакции отдельных семей на введённые региональные меры поддержки модель позволяет отслеживать их влияние на основные демографические показатели. Агент-ориентированная модель России была апробирована на данных за длительный ретроспективный период на примере запуска программ материнского капитала и показала хорошее совпадение с официальной статистикой.

Ключевые слова: цифровое имитирование и моделирование систем, агент-ориентированное моделирование, суперкомпьютерные технологии, параллельные вычисления, имитация демографических процессов, апробация управленческих воздействий.

DOI: 10.31857/S0869587322050115

Современное развитие возможностей компьютерного моделирования социально-экономических процессов ставит на повестку дня создание систем поддержки принятия решений нового типа — не просто подбора и предварительного анализа информации, необходимой для принятия решений, а виртуальных полигонов для проигрывания различных сценариев и апробации ва-

риантов решений с имитацией их последствий. Использование подобного инструмента анализа позволяет в ходе компьютерных экспериментов выбирать сочетания разных мер воздействия на управляемую систему, а также стратегию их поэтапной реализации, приводящую в итоге к желаемым результатам или наглядно демонстрирующую границы достижимых результатов.

В последнее время особенно бурное развитие получил метод агент-ориентированного моделирования, основанный на имитации индивидуального поведения социально-экономических акторов [1]. В агент-ориентированной модели (АОМ) создаётся популяция агентов, представляющих в искусственной среде реальных экономических акторов вместе с их индивидуальными характери-

МАКАРОВ Валерий Леонидович — академик РАН, научный руководитель ЦЭМИ РАН. БАХТИЗИН Альберт Рауфович — член-корреспондент РАН, директор ЦЭМИ РАН. СУШКО Елена Давидовна — кандидат экономических наук, ведущий научный сотрудник ЦЭМИ РАН. СУШКО Геннадий Борисович — кандидат технических наук, старший научный сотрудник ЦЭМИ РАН.

стиками и процедурами, имитирующими самостоятельные действия (поведение) этих акторов. АОМ успешно применяются для имитации разнообразных процессов – демографических, экономических, экологических и других. Агент-ориентированный подход даёт возможность учитывать дифференциацию отдельных групп населения с точки зрения их реакции на управляющее воздействие, вплоть до имитации индивидуальной реакции людей на изменение внешней среды, зависящей от их личностных характеристик и обстоятельств. Именно это позволяет в АОМ имитировать ситуацию, не наблюдавшуюся ранее, что невозможно для статистических методов.

О популярности такого направления моделирования свидетельствует увеличившееся за последние 20 лет количество публикаций на эту тему. Так, по данным двух крупнейших библиографических баз данных SCOPUS и Web of Science, начиная с 2000 года, число статей, посвящённых агент-ориентированным моделям, возросло более чем в 120 раз, в то время как количество работ, в которых использовались другие методы моделирования, прирастало меньшими темпами.

Эксперименты с агент-ориентированными моделями использовались на практике – при подготовке важных управленческих решений. Особенно ярким примером служат эпидемиологические АОМ. Скажем, модель Джошуа Эпштейна [2] применялась специалистами Университета Джонса Хопкинса, а также Департамента национальной безопасности США для исследований, посвящённых стратегии быстрого реагирования на различного рода эпидемии. В 2009 г. была создана версия этой модели, включающая 6.5 млрд агентов, с помощью которой имитировались последствия распространения вируса гриппа А(Н1N1/09) в масштабах планеты. Известна также АОМ, разработанная под руководством эпидемиолога и профессора Имперского колледжа Лондона Нила Фергюсона [3]. Она направлена на имитацию процессов распространения коронавируса SARS-CoV-2 среди населения Великобритании и использовалась для анализа действий правительства, которые способны повлиять на ход вспышки эпидемии.

Агент-ориентированные модели могут применяться не только для задач оперативного управления, но и для подготовки стратегических решений, имеющих глубокие и отдалённые последствия для всего общества. С этой целью разрабатываются более сложные комплексные АОМ, в которых имитируется множество процессов, протекающих в обществе одновременно и взаимно влияющих друг на друга.

РАЗВИТИЕ АВТОРСКОЙ КОНЦЕПЦИИ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ КАК ИСКУССТВЕННОГО ОБЩЕСТВА И ПРОГРАММНЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ЕЁ РЕАЛИЗАЦИИ

В ЦЭМИ РАН в течение ряда лет развивается собственная концепция комплексной региональной агент-ориентированной модели как искусственного общества, призванная воспроизводить пространственное распределение и социально-экономическую структуру общества реального, а также его взаимодействие с природной и техногенной средой [4]. В рамках такой АОМ могут объединяться несколько частных моделей – природной среды региона, социально-демографической структуры его населения и структуры его экономики. В ней могут создаваться популяции агентов разных типов, которые связаны иерархически. Например, агенты-люди образуют иерархию с агентами-предприятиями, на которых они трудятся. Таким образом, в АОМ регион моделируется как большая система [5], развивающаяся на основе действий многочисленных самостоятельных агентов, аналогичных реальным экономическим акторам. Термин “большая система” в данном случае приобретает дополнительный смысл, так как численность популяций агентов в АОМ может доходить до реальной численности соответствующих сообществ (например, населения региона).

Для практической реализации АОМ подобной конструкции в ЦЭМИ РАН разработано программное средство МЁБИУС [6] – система проектирования агент-ориентированных моделей для запуска на суперкомпьютерах, включающих популяции агентов разных типов. МЁБИУС поддерживает динамическое изменение численности и пространственного распределения агентов за счёт имитации их исчезновения и появления новых; обеспечивает образование и поддержание социальных связей агентов с помощью системы обмена сообщениями, а также позволяет создавать эффективно масштабируемые агент-ориентированные модели с популяциями агентов разных типов численностью до 1 млрд. Масштабирование означает обеспечение параллельного выполнения программного кода модели на нескольких вычислительных процессорах суперкомпьютера. Имитация сложных сценариев взаимодействия агентов реализуется путём разделения моделируемых процессов на отдельные этапы (стадии), по окончании которых происходит синхронизация параллельных вычислений и обмен подготовленными агентами сообщениями. Например, имитация смертности происходит в несколько этапов: сначала удаляются ссылки на “умерших” агентов у всех их родственников, затем пересчитываются адреса в тех ячейках, где бу-

дуг удаляться агенты, а новые адреса сообщаются всем агентам, которых это касается, и только потом “умершие” удаляются из ячеек физически (подробнее об этом см. в работе [7]). Ядром системы МЭБИУС служит демографическая модель, воспроизводящая возрастно-половую и социальную структуру населения региона, а также его пространственное распределение по территории административных единиц региона с соответствующими адресами пространственных ячеек, относящихся к тому или иному процессору. Базовая демографическая модель имитирует процессы естественного движения населения на основе поведения агентов-людей.

В работе [8] представлены результаты апробации авторского подхода к моделированию искусственного общества в системе МЭБИУС на примере демографической АОМ России с добавлением моделирования последствий введения программы материнского капитала [9]. Цель исследования – оценить применимость указанной АОМ в системе государственного управления демографическими процессами, что подразумевает соответствие высоким требованиям к правдоподобию получаемых результатов моделирования – иначе было бы невозможным распространять выводы, полученные в результате компьютерных экспериментов, на существующую в действительности социальную систему. В работе [8] имитировались процессы естественного движения населения в разрезе регионов России и, как результат агрегирования, – по России в целом. После этого полученные показатели численности населения регионов были дополнены сведениями о фактических миграционных потоках в течение изучаемого ретроспективного периода (2002–2018 гг.) с учётом последующего естественного прироста/убыли мигрантов, что позволило существенно улучшить совпадение результатов моделирования с официальными статистическими данными. Так, если без учёта миграции число регионов с отклонением модельных данных от факта в пределах $\pm 2\%$ составило в 2003 г. 72, а в 2018 – лишь 19, то с учётом миграции число таких регионов возросло до 80 и 40 соответственно. Очевидно, что в модели не были учтены иные факторы, заметно повлиявшие на процессы рождаемости.

Для повышения правдоподобия имитации стоило в первую очередь обратить внимание на другие меры поддержки семей, реализованные в регионах. Эффект от региональных программ отмечается многими авторами [10, 11]. В работе [11] проведён анализ динамики таких показателей, как отношение рождений вторых и третьих детей к количеству первенцев, а также суммарный коэффициент рождаемости (среднее число рождений на одну женщину) за последние 30 лет. Отмечено, что резкое изменение тренда обоих показателей в сторону увеличения точно совпало с

моментами введения в 2007 г. федеральной программы материнского капитала и аналогичных региональных программ, принятых в 2012 г., которые были направлены на стимулирование рождения вторых и третьих детей. Таким образом, первоочередным направлением дальнейшего расширения функционала разработанной демографической АОМ России выбрано моделирование действия региональных программ.

РАЗВИТИЕ КОНСТРУКЦИИ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Представленная в работе [8] модель получала в качестве исходных данные о федеральной программе материнского капитала по годам, такие как сведения об условиях её получения (число детей в семье) и сумме в рублях. В ходе работы модели имитировалось влияние этой программы на вероятность рождения ребёнка для женщин, которые ещё не родили столько детей, сколько желали бы, и не получали материнский капитал ранее. То есть важную роль в имитации процесса рождаемости играла такая характеристика агентов, как желаемое число детей в семье, при распределении которой на популяции агентов были использованы данные исследования [12]. Таким образом, если в текущем году сумма материнского капитала была больше нуля, для агентов-женщин, удовлетворявших данным условиям, возрастала рассчитанная для них на текущий год вероятность рождения ребёнка, которая зависела от их возраста и региона проживания (учитывались региональные тенденции изменения суммарного коэффициента рождаемости). Причём размер прибавки к вероятности рождения ребёнка зависел от субъективной значимости этой суммы для каждого агента-женщины, а именно от величины материнского капитала в стоимости 1 м² жилья в регионе проживания (чем больше значимость, тем больше прибавка).

Для введения в модель имитации влияния региональных программ материнского капитала как единовременной выплаты при рождении ребёнка было сделано обобщение данной конструкции и создан новый класс – “проект”, представляющий в модели региональные меры поддержки семей. При этом учитывалось, что в некоторых регионах для получения поддержки семьи с детьми должны были удовлетворять дополнительному условию на величину среднедушевого дохода. В итоге для класса “проект” были выбраны следующие характеристики:

- индекс региона, в котором вводится мера поддержки семьи;
- индивидуальный номер проекта;
- год начала и год завершения реализации проекта;

- минимальное число детей в семье, дающее право на получение поддержки;
- пороговое соотношение среднедушевого дохода семьи и регионального прожиточного минимума, дающее право на получение поддержки;
- сколько раз семья может получить поддержку;
- суммы поддержки по годам (2002–2018 гг.) в рублях.

Введение дополнительного условия для получения регионального материнского капитала создало совершенно новую ситуацию, поскольку здесь речь шла о проверке уже не индивидуальных характеристик агента-женщины, претендующей на финансовую помощь, а о рассмотрении характеристик объекта другого типа — семьи, частью которого является агент-женщина. Задача потребовала введения в демографическую модель семьи как объекта нового типа. Его главные свойства:

- большая численность семей (того же порядка, что и численность популяции агентов-людей);
- иерархическая связанность семьи и агентов-людей: агенты-люди являются членами семей;
- общие черты с агентами-людьми: семьи пространственно распределены, как и агенты-люди; семьи в ходе работы модели могут появляться и исчезать; они должны поддерживать связи с агентами-людьми в процессе установления и поддержания родственных отношений.

С учётом этих свойств было принято решение о включении в модель не просто объектов нового типа, а класса агентов нового типа, способных к самостоятельному поведению, причём агенты двух типов связаны иерархией: агенты-люди → агенты-семьи. Поскольку класс агентов-семей образован от более общего класса “агент”, он унаследовал от него следующие свойства:

- индивидуальный адрес (номер пространственной ячейки плюс порядковый номер в ячейке);
- коллекцию (список) адресов социальных связей (список рассылки сообщений);
- пометку на удаление.

Кроме того, характеристиками класса “семья” стали:

- индекс региона, в котором проживает семья;
- суммарный доход;
- коллекция агентов-людей — членов семьи, которая и становится списком рассылки сообщений;
- коллекция программ поддержки, которые семья получала;
- процедура удаления — семья помечается на удаление, если в ней остаётся только один агент.

Отметим, что понятие семьи в модели отличается от общепринятого понятия домохозяйства. Связано это с тем, какие именно семьи могут претендовать на получение материнского капитала. Так, в модели семья не может содержать агентов-

родственников трёх поколений — семьи образуются агентами, связанными партнёрскими (супружескими) отношениями и/или отношениями мать (отец)—ребёнок (дети), если эти дети не имеют собственных партнёров или детей.

Добавление в модель нового типа агентов повлекло существенные изменения в конструкции демографической АОМ России. Так, в разные классы модели были добавлены

- а) на главном уровне:
 - численность семей;
 - процедура ввода новых исходных данных по регионам (средние зарплата и пенсия, прожиточный минимум);
 - процедура ввода данных о региональных проектах материнского капитала;
 - в процедуре установки стартового состояния блоки формирования всех родственных связей между агентами-людьми и образования семей;
 - блок стадий, связанных с удалением семей, который выполняется на каждом шаге имитации, соответствующем одному году, после блока стадий, обеспечивающих добавление (рождение) агентов-людей;
 - сбор статистики по численности семей;
- б) на уровне региона:
 - численность семей;
 - средняя заработная плата по годам (2002–2018 гг.) в рублях;
 - средняя пенсия по годам (2002–2018 гг.) в рублях;
 - прожиточный минимум по годам (2002–2018 гг.) в рублях;
 - коллекция всех региональных проектов поддержки семей;
 - коллекция действующих в текущий год региональных проектов, которая актуализируется на каждом шаге;
- в) на уровне агентов-людей:
 - переменная “доход” (для агентов трудоспособного возраста она рассчитывается исходя из средней заработной платы в регионе, а для агентов старше трудоспособного возраста — исходя из средней пенсии);
 - коллекция социальных связей — семьи партнёра, братьев и сестёр, а также соответствующее расширение списка рассылки сообщений;
 - процедура увеличения вероятности рождения ребёнка при наличии действующих проектов в регионе проживания агента-женщины, если она может претендовать на получение помощи, полностью аналогичная механизму влияния федерального материнского капитала;
 - процедура поиска партнёра для агента-женщины — агента-мужчины, жителя того же региона

с разницей в возрасте не более 10 лет, не родственника, у которого нет партнёрши;

- процедура установления партнёрских отношений и образования новой семьи при появлении первого ребёнка.

Внесённые изменения важны с точки зрения требований модели к вычислительным ресурсам. Так, появление популяции нового типа агентов, сопоставимой по численности с популяцией агентов-людей, потребует использования большего числа процессоров. Очевидно также, что должно заметно возрасти время установки стартового состояния модели для воссоздания структуры населения и семейных связей. Кроме того, включение новых стадий имитируемых процессов и соответствующих новых точек синхронизации неизбежно вызовет увеличение времени симуляции каждого шага. Последнее обстоятельство, как и рост трафика сообщений, которыми обмениваются агенты, в том числе при образовании семей и установлении родственных связей, может отразиться на эффективности работы суперкомпьютерной модели.

АПРОБАЦИЯ НОВОЙ КОНСТРУКЦИИ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ ДЕМОГРАФИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Нами рассмотрена динамика полученных ранее результатов моделирования численности населения с учётом влияния федерального материнского капитала и миграционного прироста, а также отклонение полученных значений от данных Росстата за 2003–2018 гг. [8]. В итоге выявлены 17 регионов, для которых в течение всего периода наблюдалось отклонение прогноза от факта в меньшую сторону, а к 2018 г. модельные данные отставали от фактических более чем на 2%. Стало очевидно, что модель не учитывала влияние некоторого множества факторов, повышавших рождаемость в этих регионах в указанный период. Нам же для эксперимента важно было выбрать регионы, в которых можно проследить влияние именно регионального материнского (семейного) капитала. Поэтому из полученного перечня мы изъяли регионы, в частности, Москву и Республику Татарстан, в которых региональные меры поддержки семей не включали программы материнского капитала, а также регионы, для которых отклонение от фактических значений численности населения увеличивалось равномерно на протяжении всего рассматриваемого периода, то есть отклонение было вызвано постоянно действующими факторами, а не реализацией какого-либо проекта. В итоге для апробации новой конструкции модели осталось 9 регионов, где отклонение результатов моделирования от факта заметно возрастало, начиная с 2012 г., и где были введены региональные программы мате-

ринского капитала. Эту группу составили Ямало-Ненецкий автономный округ (отклонение прогноза от факта в 2018 г. –7.8%), Ханты-Мансийский автономный округ (–6.8), Краснодарский край (–2.9), Санкт-Петербург (–6.3), Тюменская область (–4.9), Ставропольский край (–3.2), Новосибирская область (–2.4), Республика Саха (Якутия) (–2.1) и Ростовская область (–1.7). Особая ситуация наблюдалась в Ставропольском крае. Так, заявленный старт программы регионального материнского капитала с 1 января 2011 г. фактически не состоялся, а в 2015 г. был принят новый Закон № 127-КЗ [13], который с 1 января 2016 г. и вовсе отменил региональный материнский капитал. Тем не менее, на наш взгляд, анонсированная поддержка семей с детьми могла повлиять на репродуктивное поведение людей, поскольку получить её можно было лишь спустя три года с момента появления в семье ребёнка, то есть первые выплаты должны были начаться в 2014 г. Поэтому и данный регион был оставлен в списке, тем более что в указанный период в Ставрополье наблюдался некоторый рост суммарного коэффициента рождаемости (СКР).

Отдельно следует остановиться на ситуации в Ростовской области, так как там право на получение регионального материнского капитала, введённого с 1 января 2012 г., получили при рождении третьего ребёнка лишь малоимущие семьи, чей среднедушевой доход не превышал величину регионального прожиточного минимума, что сузило область применения данной меры поддержки семей и должно было снизить эффект от её введения. Мы же рассматриваем данный регион как удачный пример, позволивший апробировать более сложную систему стадий имитации, поскольку здесь семья выступила как единое целое, получив право на материнский капитал при выполнении заданного условия.

Правомерность выбора данных регионов подтверждается и характером изменений в этих регионах суммарного коэффициента рождаемости. Динамика медианного для выборки значения СКР показана на рисунке 1, демонстрирующем скачкообразный рост среднего суммарного коэффициента рождаемости не только в 2007 г. (очевидно, вследствие запуска федеральной программы материнского капитала), но и в 2012 г., когда стартовало большинство региональных программ.

Таким образом, для апробации новой конструкции демографической АОМ России были выбраны регионы с проектами, соответствующими региональным программами материнского капитала (в таблице 1 представлены только те условия программ, которые использовались в эксперименте).

Эксперимент проводился по схеме “без проекта и с проектом”, то есть все многочисленные параметры модели (год начала и период имитации,

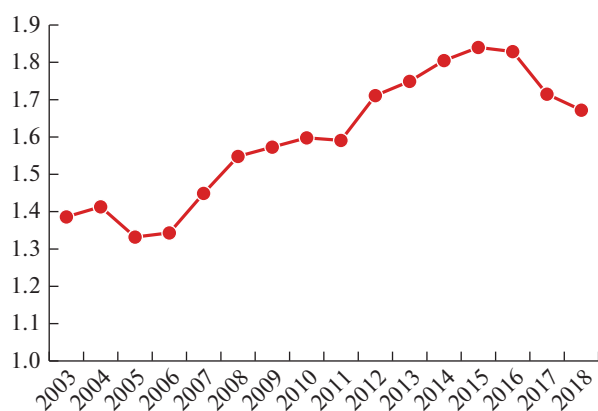


Рис. 1. Динамика медианного по выборке регионов значения суммарного коэффициента рождаемости

Источник: данные Росстата.

смертность/рождаемость и индексы их изменения, федеральная программа материнского капитала и т.д.), как и процедуры учёта миграционных потоков, оставались неизменными, менялся только файл исходной информации по региональным проектам. В базовом варианте региональных проектов не было, а во втором варианте вводились 9 представленных выше проектов, после чего для этих регионов сравнивались полученные варианты моделирования. Результаты эксперимента показаны в таблицах 2 и 3.

Данные таблицы 2 свидетельствуют об эффекте, оказанном добавлением в модель блока, имитирующего реакцию агентов на введение региональных программ материнского капитала. И хотя относительная значимость увеличения числа рождений на каждом шаге имитации в указанных регионах незначительна, в целом абсолютный прирост рождений по регионам выборки составил за весь рассматриваемый период свыше 400 тыс. человек. Рост числа рождений закономерно привёл к росту численности населения и, соответственно, к снижению отклонения результатов моделирования от фактических значений этого показателя (см. табл. 3).

Данные таблицы 3 свидетельствуют о том, что наибольшее влияние региональной программы на рост численности населения наблюдалось в Ямало-Ненецком АО (разница между отклонениями для вариантов 1 и 2 в 2018 г. составила -4.7 п.п.), что объясняется большой суммой материнского капитала. А наименьшее влияние наблюдалось в Санкт-Петербурге (-0.6 п.п.), что объясняется более высокой по сравнению с другими регионами стоимостью жилья и, соответственно, меньшей относительной значимостью материнского капитала в 100 тыс. руб. Оценивая результаты эксперимента в целом, отметим также, что во втором варианте значительно выросло число регионов, для которых отклонение от фак-

Таблица 1. Параметры региональных программ материнского (семейного) капитала, участвовавших в эксперименте [14–22]

Регион	Сумма, тыс. руб.	Период действия, годы	Условия предоставления
Санкт-Петербург	100 (с ежегодной индексацией)	2012–2026	рождение третьего ребёнка
Краснодарский край	100 (с ежегодной индексацией)	2011–2021	рождение третьего ребёнка
Ставропольский край	100	2011–2015	рождение третьего ребёнка
Ростовская область	100	2012–2018	рождение третьего ребёнка среднедушевой доход семьи ниже регионального прожиточного минимума
Тюменская область	40	2012–2021	рождение третьего ребёнка
Ханты-Мансийский АО – Югра	116	2012–2021	рождение третьего ребёнка
Ямало-Ненецкий АО	350 (с ежегодной индексацией)	2011–2021	рождение третьего ребёнка
Новосибирская область	100	2012–2021	рождение третьего ребёнка
Республика Саха (Якутия)	100 (с ежегодной индексацией)	2011–2021	рождение третьего ребёнка

Таблица 2. Прирост числа рождений, связанный с реализацией региональных проектов материнского капитала (тыс. человек) и его значимость (доля от населения региона в текущем году, %)

Регион	Год								Итого
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	
Санкт-Петербург		7.7 (0.2)	4.1 (0.1)	5.8 (0.1)	6.9 (0.2)	6.4 (0.2)	6.1 (0.1)	5.7 (0.1)	42.7
Краснодарский край	17.1 (0.4)	15.7 (0.3)	15.3 (0.3)	12.1 (0.3)	12.0 (0.2)	11.6 (0.2)	10.8 (0.2)	9.0 (0.2)	103.6
Ставропольский край	18.6 (0.7)	13.5 (0.5)	10.6 (0.4)	6.6 (0.3)	6.3 (0.2)				55.7
Ростовская область		13.2 (0.3)	10.7 (0.3)	10.0 (0.2)	6.9 (0.2)	6.0 (0.1)	7.4 (0.2)	5.8 (0.1)	59.9
Тюменская область		5.1 (0.2)	4.3 (0.1)	4.8 (0.1)	6.0 (0.2)	4.9 (0.1)	5.2 (0.2)	1.8 (0.1)	32.3
Ханты-Мансийский АО – Югра		7.9 (0.5)	5.5 (0.4)	4.2 (0.3)	3.2 (0.2)	4.1 (0.3)	4.1 (0.3)	2.2 (0.1)	31.2
Ямало-Ненецкий АО	8.5 (1.6)	3.9 (0.7)	5.0 (0.9)	2.4 (0.5)	2.9 (0.5)	2.1 (0.4)	1.3 (0.2)	1.6 (0.3)	27.8
Новосибирская область		11.2 (0.4)	5.7 (0.2)	4.8 (0.2)	4.6 (0.2)	5.0 (0.2)	4.9 (0.2)	2.7 (0.1)	39.0
Республика Саха (Якутия)	5.3 (0.5)	4.5 (0.5)	2.7 (0.3)	2.3 (0.2)	2.5 (0.2)	1.6 (0.2)	1.9 (0.2)	1.6 (0.2)	22.5
Всего	49.5 (0.2)	82.8 (0.3)	63.8 (0.3)	53.0 (0.2)	51.5 (0.2)	41.7 (0.2)	41.8 (0.2)	30.4 (0.1)	414.5

та составило менее 2% – на протяжении всего периода имитации оно равнялось пяти, в то время как в первом варианте неуклонно снижалось и к концу периода составило единицу. Последнее наблюдение, на наш взгляд, свидетельствует об адекватности разработанных алгоритмов имитации репродуктивного поведения людей, обеспечивших ещё большее приближение результатов моделирования к реальной действительности.

Следует отметить изменения в программном комплексе, связанные с реализацией нового блока модели, которые могли существенно повлиять на эффективность работы суперкомпьютерного варианта модели:

- добавление нового класса агентов-семей и создание соответствующей популяции;
- усложнение процедур установки стартового состояния системы;

- добавление на каждом шаге имитации новых стадий и соответствующих точек синхронизации, то есть возможных задержек в ходе работы модели;

- существенное увеличение количества связей агентов и, соответственно, рост трафика сообщений между агентами.

Всё это привело к изменению технических характеристик работы суперкомпьютерных вариантов модели. Так, при сопоставимой суммарной численности агентов значительно (более чем в 2 раза) выросло среднее время выполнения имитации на шаге и вдвое – среднее число сообщений, отправляемых на шаге агентами-людьми. Тем не менее общее время имитации остаётся вполне приемлемым. Например, общее время работы АОМ на одном процессоре при прогнозировании на 17 лет в первом варианте (без семей) составило при численности агентов 8 млн около 7.7 мин, а во втором варианте (4 млн агентов-лю-

Таблица 3. Сравнение отклонения результатов моделирования численности населения с учётом миграции от фактических значений для двух вариантов экспериментов: 1 – без региональных проектов и 2 – с реализацией региональных программ материнского капитала, %

Регион	2012 г.		2013 г.		2014 г.		2015 г.		2016 г.		2017 г.		2018 г.	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
Санкт-Петербург	-3.2	-3.2	-3.7	-3.6	-4.2	-4.0	-4.7	-4.5	-5.3	-4.9	-5.8	-5.4	-6.3	-5.7
Краснодарский край	-2.1	-1.7	-2.2	-1.5	-2.4	-1.5	-2.6	-1.5	-2.7	-1.5	-2.9	-1.4	-2.9	-1.3
Ставропольский край	-2.3	-1.7	-2.4	-1.3	-2.5	-1.1	-2.7	-1.1	-2.9	-1.0	-3.1	-1.3	-3.2	-1.4
Ростовская область	-1.3	-1.3	-1.4	-1.4	-1.5	-1.2	-1.6	-1.1	-1.7	-1.0	-1.8	-0.9	-1.7	-0.7
Тюменская область	-3.1	-2.9	-3.4	-3.1	-3.7	-3.3	-4.0	-3.5	-4.5	-3.8	-4.8	-4.0	-4.9	-3.9
Ханты-Мансийский АО – Югра	-3.9	-3.9	-4.5	-4.2	-5.1	-4.4	-5.7	-4.8	-6.1	-5.0	-6.5	-5.2	-6.8	-5.3
Ямало-Ненецкий АО	-4.4	-3.0	-4.9	-2.8	-5.6	-2.7	-6.3	-2.8	-7.1	-3.0	-7.6	-3.2	-7.8	-3.1
Новосибирская область	-1.5	-1.5	-1.7	-1.4	-1.8	-1.3	-2.0	-1.3	-2.2	-1.4	-2.4	-1.4	-2.4	-1.1
Республика Саха (Якутия)	-0.8	-0.5	-1.0	-0.3	-1.3	-0.2	-1.7	-0.3	-2.0	-0.4	-2.1	-0.3	-2.1	0.0
Максимальное отклонение	-4.4	-3.9	-4.9	-4.2	-5.6	-4.4	-6.3	-4.8	-7.1	-5.0	-7.6	-5.4	-7.8	-5.7
Минимальное отклонение	-0.8	-0.5	-1.0	-0.3	-1.3	-0.2	-1.6	-0.3	-1.7	-0.4	-1.8	-0.3	-1.7	0.0
Число регионов с отклонением ≤ 2.0%	3	5	3	5	3	5	3	5	2	5	1	5	1	5

дей с добавлением образованных ими агентов-семей) – 16.9 мин.

В новом варианте несколько снизилась и масштабируемость (ускорение работы модели, достигаемое при увеличении числа процессоров суперкомпьютера), хотя и этот важный показатель эффективности параллельной работы модели остаётся на высоком уровне (ускорение почти в 30 раз для 64-х процессоров), что показано на рисунке 2.

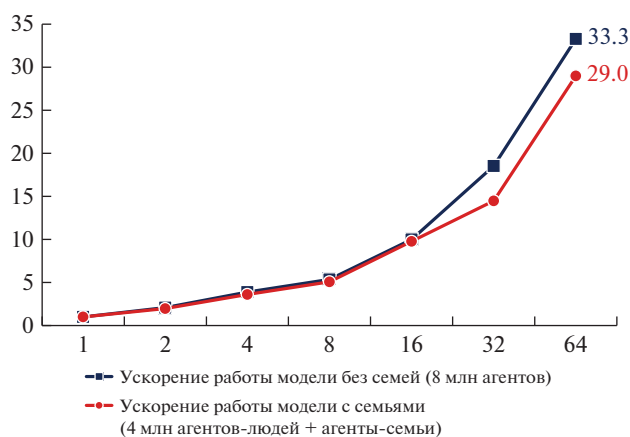


Рис. 2. Сравнение ускорения работы двух вариантов модели, достигаемого при использовании различного числа процессоров суперкомпьютера, количество раз

Таким образом, на основании проведённых экспериментов можно сделать следующие выводы:

- использованная при создании демографической АОМ России система проектирования МЁБИУС позволяет разрабатывать сложные модели, включающие агентов разных типов, поддерживающих социальные, в том числе иерархические, связи. При этом она обеспечивает их автоматическую декомпозицию на множестве вычислительных процессоров для эффективного распараллеливания программного кода на суперкомпьютерах;

- система МЁБИУС обеспечивает синхронизацию реакции отдельных элементов АОМ благодаря механизму разделения её работы на стадии, а последующее агрегирование их характеристик и состояний по иерархии позволяет оценить влияние планируемых мер на результирующие показатели, в качестве которых выбираются целевые для экспериментатора;

- добавление в модель такой конструкции, как “проекты”, позволяет приблизить характер проведения экспериментов к привычным приёмам планирования, применяемым практиками, что увеличивает привлекательность модели как инструмента подготовки управленческих решений.

Для дальнейшего развития представленного программного комплекса, на наш взгляд, необходимо:

- ввести в модель другие виды проектов — ежемесячные денежные выплаты, программы дополнительного образования для детей, которые, как показывают социологические исследования [12], значимы для принятия молодыми семьями решения о рождении ребёнка;
- разработать механизмы имитации миграции как осознанного выбора агентов с учётом показателей качества жизни в различных регионах и их значимости для агентов. Ключевым субъектом и в том, и в другом случае должна быть семья.

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-18-00240 “Суперкомпьютерные технологии в общественных науках”) с использованием вычислительных ресурсов Межведомственного суперкомпьютерного центра Российской академии наук (МСЦ РАН).

ЛИТЕРАТУРА

1. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013.
2. Epstein J.M. Modelling to contain pandemics // Nature. 2009. V. 460. № 7256. P. 687.
3. Ferguson N.M., Laydon D., Nedjati-Gilani G. et al. Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. Imperial College London (16-03-2020). <https://doi.org/10.25561/77482>.
4. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. Агент-ориентированная социо-эколого-экономическая модель региона // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. 2015. № 3(288). С. 2—11.
5. Бурков В.Н., Новиков Д.А. Теория активных систем: состояние и перспективы. М.: Синтез, 1999.
6. Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. Система проектирования масштабируемых агент-ориентированных моделей, включающих популяции агентов разных типов с динамически изменяющейся численностью и сложными многоэтапными взаимодействиями агентов, образующих социальные сети. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2020612410, 20.02.2020. Заявка № 2020611366 от 06.02.2020.
7. Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. A Design System For Scalable Agent-Based Models With Multi-Stage Interactions Of Agents Forming Social Connections // Lobachevskii Journal of Mathematics. 2020. № 8. P. 1492—1501.
8. Бахтизин А.Р., Макаров В.Л., Максаков А.А., Сушко Е.Д. Демографическая агент-ориентированная модель России и оценка её применимости для решения практических управленческих задач // Искусственные общества. 2021. Т. 16. Вып. 2. <https://artsoc.jes.su/s207751800015357-1-1/> (дата обращения 25.06.2021).
9. Федеральный закон от 29 декабря 2006 г. № 256-ФЗ “О дополнительных мерах государственной поддержки семей, имеющих детей”. <http://www.kremlin.ru/acts/bank/24820>
10. Гришина Е.Е., Цацура Е.А. Региональный материнский капитал: анализ региональных различий и влияния на репродуктивное поведение // Уровень жизни населения регионов России. 2017. № 3(205). С. 51—58.
11. Яковлев Е.И. Как материнский капитал повлиял на рождаемость // Ведомости. 2020. 27 февраля. <https://www.vedomosti.ru/opinion/articles/2020/02/27/823925-materinskii-kapital> (дата обращения 25.06.2021).
12. Шабунова А.А., Ростовская Т.К. О необходимости разработки модели оптимальных условий для формирования и реализации демографических установок // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. 2020. № 4. С. 38—57.
13. Закон от 2 декабря 2015 г. № 127-КЗ “О признании утратившими силу отдельных положений законодательных актов Ставропольского края”. <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/2600201512070002>
14. Закон Санкт-Петербурга от 6 декабря 2011 г. № 810—151 “О материнском (семейном) капитале в Санкт-Петербурге”. <https://docs.cntd.ru/document/891860338>
15. Закон Краснодарского края от 4 октября 2011 г. № 2344-КЗ «О внесении изменений в закон Краснодарского края “О социальной поддержке многодетных семей в Краснодарском крае”». <http://www.garant.ru/hotlaw/krasnodar/355526/>
16. Закон Ставропольского края от 27 декабря 2012 г. № 123-КЗ “О мерах социальной поддержки многодетных семей”. <https://docs.cntd.ru/document/461510451>
17. Закон Ростовской области от 10 апреля 2012 г. № 837-ЗС “О региональном материнском капитале”. <https://docs.cntd.ru/document/800005192?marker>
18. Постановление Правительства Тюменской области от 27 декабря 2011 г. № 503-п “О региональном материнском (семейном) капитале”. <https://docs.cntd.ru/document/906604071>
19. Закон Ханты-Мансийского АО — Югры от 28 октября 2011 г. № 100-ОЗ “О дополнительных мерах поддержки семей, имеющих детей, в ХМАО — Югре”. <https://docs.cntd.ru/document/543558954>
20. Закон Ямало-Ненецкого автономного округа от 1 июля 2011 г. № 73-ЗАО “О материнском (семейном) капитале в Ямало-Ненецком автономном округе”. <https://docs.cntd.ru/document/422400855>
21. Закон Новосибирской области от 30 сентября 2011 г. № 125-ОЗ “О дополнительных мерах социальной поддержки многодетных семей на территории Новосибирской области”. <https://docs.cntd.ru/document/465702050>
22. Закон Республики Саха (Якутия) от 16 июня 2011 г. 952-3 № 803-IV «О республиканском материнском капитале “Семья”». <https://docs.cntd.ru/document/453109686>