

СОЦИОДЕМОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

DOI: 10.15838/sa.2024.1.41.1

УДК 519.876.5;314.8.062 | ББК 65.05;60.723

© Калачикова О.Н., Короленко А.В., Дианов Д.С.

КОНЦЕПЦИЯ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЙ МОДЕЛИ «ЦИФРОВОЙ ДЕМОГРАФИЧЕСКИЙ ДВОЙНИК ВОЛОГОДСКОЙ ОБЛАСТИ»



ОЛЬГА НИКОЛАЕВНА КАЛАЧИКОВА

Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация

e-mail: onk82@yandex.ru

ORCID: [0000-0003-4681-4344](#); ResearcherID: [I-9562-2016](#)



АЛЕКСАНДРА ВЛАДИМИРОВНА КОРОЛЕНКО

Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация

e-mail: coretra@yandex.ru

ORCID: [0000-0002-7699-0181](#); ResearcherID: [I-8201-2016](#)



ДАНИИЛ СЕРГЕЕВИЧ ДИАНОВ

Вологодский научный центр Российской академии наук
Вологда, Российская Федерация

e-mail: daniil.dianov@gmail.com

ORCID: [0000-0003-4766-8801](#); ResearcherID: [ADK-8080-2022](#)

В условиях демографических вызовов (депопуляции, старения населения, снижения рождаемости, сокращения вклада миграции в компенсацию естественной убыли населения) и необходимости достижения стратегических национальных приоритетов в демографической сфере особую актуальность приобретают исследования, направленные на создание реалистичных моделей общества для прогнозирования сценариев демографического развития и апробации различных вариантов управляющих воздействий на него. Такую возможность предоставляют цифровые демографические двойники – агент-ориентированные модели, в основу которых заложена имитация индивидуального поведения отдельных агентов – членов общества. Та-

кие модели выступают платформой для проведения экспериментов в сфере управления демографическими процессами, а следовательно, служат инструментом поддержки принятия управленческих решений. Цель работы заключалась в обосновании концепции и программной реализации агент-ориентированной модели, имитирующей демографическое развитие региона (Вологодской области), предназначенной для апробации управленческого воздействия на него. Рассмотрены примеры зарубежных и отечественных агент-ориентированных моделей. Несмотря на имеющиеся разработки не теряет актуальности построение цифровых демографических двойников для отдельных субъектов РФ, особенно для регионов демографического неблагополучия. Представлена концепция агент-ориентированной модели «Цифровой демографический двойник Вологодской области»: рассмотрены ее структурные блоки (имитация воспроизводства населения и миграционного поведения, имитация внешних воздействий – иммиграции), типы агентов (агенты-люди и агенты-территории) и их свойства, характеристики внешней среды, перечислены основные допущения и ограничения модели, методы имитации демографических процессов, отдельное внимание уделено схеме поведения агента-человека. Описана конструкция модели, раскрыты основные параметры ее программной реализации. Преимущества модели заключаются в учете при имитации поведения агентов-людей их демографических состояний и переходов между ними; использовании данных социологических мониторинговых опросов; применении для моделирования новой программной среды GamaPlatform; учете территориального фактора при моделировании и возможности детализации модели на разных уровнях.

Агент-ориентированное моделирование, цифровой двойник, демографическое развитие, демографические процессы, Вологодская область.

Введение

В условиях демографических вызовов (депопуляции, старения населения, снижения рождаемости, сокращения вклада миграции в компенсацию естественной убыли населения) и необходимости достижения стратегических национальных приоритетов в демографической сфере особую актуальность приобретают исследования, направленные на создание реалистичных моделей общества для прогнозирования сценариев демографического развития и апробации различных вариантов управляющих воздействий на него.

Демографические процессы являются классическими примерами процессов, формирующихся «снизу вверх», так как решения принимаются на уровне отдельных индивидуумов, а общие показатели складываются в результате агрегирования действий этих индивидуумов. Поэтому демография – одно из направлений применения агент-ориентированного подхода, широко представленное в научной литературе (Макаров и др., 2019).

Основная идея агент-ориентированных моделей (АОМ) заключается в построении вычислительного инструмента, представляющего собой совокупность агентов, искусственное общество, которое состоит из взаимодействующих между собой самостоятельных агентов с определенным набором свойств. При этом работа АОМ основана на имитации индивидуального поведения каждого из агентов – членов этого общества, а изменения общего состояния всей системы являются интегральным результатом действий отдельных агентов (Макаров и др., 2015).

Британский исследователь E. Silverman и его коллеги обозначили три ключевые проблемы демографии, которые поможет решить агент-ориентированное моделирование: потребность в проведении анализа демографических явлений на трех уровнях – от индивидов через домохозяйства и географические регионы до уровня всего общества; необходимость в связывании статистических данных с другими полез-

ными источниками информации для получения значимых результатов о возможных траекториях демографических процессов в будущем; решение вопроса об уровне сложности демографических моделей и степени использования эмпирических данных, полученных в результате поперечных и продольных исследований, при их построении. Как отмечают авторы, агент-ориентированные модели существенно отличаются от статистических подходов, поскольку могут рассматривать явления, для которых нет явного аналитического представления, тем самым могут обеспечить объяснительную силу в случае нелинейных явлений или сложных взаимодействий (социальное поведение) и включать в себя трудно формализуемые элементы (встраивание в социальный контекст, сети отношений и связанные с ними пространственные элементы) (Silverman et al., 2013). Цифровые демографические двойники (искусственные общества), разработанные с помощью агент-ориентированного подхода, выступают платформой для проведения экспериментов в сфере управления демографическими процессами (Макаров и др., 2022), следовательно, служат инструментом поддержки принятия управленческих решений.

Цель работы заключалась в обосновании концепции и программной реализации агент-ориентированной модели, имитирующей демографическое развитие региона (Вологодской области), в т. ч. основные демографические процессы, предназначенной для апробации управленческого воздействия на него. Для достижения обозначенной цели были поставлены следующие задачи:

- обзор опыта разработки агент-ориентированных демографических моделей в зарубежных и отечественных исследованиях;
- представление и обоснование концепции агент-ориентированной модели «Цифровой демографический двойник Вологодской области»;
- описание конструкции модели, в частности основных параметров ее программной реализации.

Теоретико-методологические аспекты исследования

В результате развития компьютерных наук был разработан вычислительный подход к изучению человеческого поведения, который начал применяться в рамках социальных наук в 1990-е гг. и получил активное развитие в 2000-е гг. (Billari et al., 2003), в т. ч. в рамках демографической науки. Разработкой агент-ориентированных демографических моделей занимаются как зарубежные, так и отечественные исследователи. Среди зарубежных демографических моделей стоит отметить агент-ориентированную *модель заключения брака, или т. н. модель «Обручальное кольцо»*, разработанную пионерами агентной вычислительной демографии F.C. Billari с коллегами (Billari et al., 2007). В ее основе лежит предположение о том, что формирование брачного партнерства является результатом социального взаимодействия между разнородными индивидами, при этом социальное давление признается ключевой силой, управляющей процессом заключения первого брака. Главными факторами вероятности вступления в брак в модели выступили наличие партнера и желательность брака. Доступность партнеров в популяции агентов-людей моделировалась с учетом набора потенциальных партнеров как в ближайшем окружении, так и в пределах возрастной группы. Желательность брака моделировалась путем учета динамики социального давления, выражающегося в доле женатых людей в соответствующей социальной сети. Согласно полученным результатам, предлагаемая АОМ может воспроизвести форму вероятности вступления в брак, наблюдающуюся на популяционном уровне (т. е. функция вероятности возникает «снизу вверх») (Billari et al., 2007). Уровень социального давления определяет, насколько далеко агент готов заглянуть в поисках доступного партнера. Таким образом, агенты, находящиеся под большим социальным давлением, расширят зону своего поиска. Поиск партнерских отношений в модели является взаимным: брак происходит только тогда, когда и агент, и подходящий партнер

находятся в приемлемом возрастном диапазоне. Как только агент сможет найти супругу, он сможет родить детей, и эти дети будут добавлены к населению «Обручального кольца» (Silverman et al., 2013).

Е. Silverman с коллегами усовершенствовали модель «Обручального кольца», предложив модель «Свадебного пончика», описывающую формирование партнерств с учетом изменения состояния здоровья людей на протяжении жизни (Silverman et al., 2013). В модели предложено сразу несколько расширений: вместо одномерного пространства обитания агентов (кольцо) используется двумерное (тор); смертность не ограничена 100-летним интервалом; смертность и рождаемость определяются наблюдаемыми (эмпирическим) и прогнозируемыми показателями в Англии и Уэльсе; прогнозирование показателей осуществлялось с использованием варианта стандартной билинейной демографической модели Ли – Картера; первоначальная структура населения по возрасту, полу и семейному положению соответствует данным переписи населения 1951 года в Англии и Уэльсе; модель учитывает более широкое определение партнерства и не ограничивается законным браком (агенты могут образовывать любые сожительствующие партнерства, поскольку роды часто происходят вне рамок супружеских отношений); в модель была включена упрощенная модель состояния здоровья, отражающая вероятность перехода агентов в состояние «плохого здоровья», которая увеличивается с возрастом. Авторы обозначают следующие преимущества модели: возможность изучения связанных жизней смоделированных людей в различных сценариях; легкость внедрения симуляции в соответствующие социальные или физические пространства; комплексный подход позволяет преодолеть некоторые ограничения, связанные с данными, т. к. дополняет доступную статистическую информацию предположениями о правилах поведения агентов; статистические эмуляторы для анализа чувствительности позволяют исследовать пространство параметров базовых агентных моделей (Silverman et al., 2013).

Группой американских исследователей (В. Aparicio-Diaz и соавторы) была разработана модель перехода к родительству, отражающая влияние социального взаимодействия на рождаемость (Aparicio-Diaz et al., 2011). Моделирование производилось только для женщин и учитывало различные стадии их жизненного цикла, но не включало создание партнерств. Агенты в модели наделены тремя характеристиками: возраст, предполагаемое образование и количество (кратность) рождений. Агенты эндогенно формируют свою сеть на основе социальной близости (социальная сеть агента представлена друзьями, братьями и сестрами и матерью). Социальная сеть агента оказывает влияние на индивидуальные вероятности рождения и на их кратность. Исследование показало, что разработанная модель, учитывающая влияние социальных взаимодействий и социального давления, в высокой степени отражает изменения в сроках и количестве рождений в Австрии за три десятилетия (с 1984 по 2004 год). Также данная модель была использована для прогнозирования повозрастных коэффициентов рождаемости на период до 2016 года (Aparicio-Diaz et al., 2011).

Модель изменения миграционных потоков (модель экологической миграции) исследователей из Великобритании (D. Kniveton, Ch. Smith, Sh. Wood) предназначена для воспроизведения климатической миграции в 1970–2000 гг. в Буркина-Фасо и моделирования миграционных потоков до 2060 года (Kniveton et al., 2011). Агенты-люди в модели взаимодействуют друг с другом и окружающей средой, чтобы выработать намерения адаптироваться к изменениям количества осадков посредством миграции. На вероятность миграции агентов влияют как индивидуальные характеристики, так и их размещение в социальной сети, в рамках которой обсуждаются изменения количества осадков. Каждый человек рассматривает варианты адаптации на основе трех компонентов: своего отношения к адаптационному поведению, своей субъективной нормы (или оценки ожиданий других) и своего воспринимаемого поведенческого контроля (или воспринимае-

мой адаптивной способности). С учетом особенностей личности используются значения вероятности миграции, отражающие нормативную вероятность того, что такая личность предпримет каждый вариант адаптации. Модель показала, что переход к более сухому климату приводит к крупнейшим общим и международным миграционным потокам в сочетании с изменениями в инклюзивном и взаимосвязанном социальном и политическом управлении. В то время как самые низкие международные миграционные потоки возникают в условиях более влажного климата с исключительными и разнообразными сценариями управления (Kniveton et al., 2011).

В России также ведутся разработки агент-ориентированных демографических моделей. Так, коллективом исследователей ЦЭМИ РАН (В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.Д. Сушко) разработана *демографическая модель региона России*, на основании которой осуществлена имитация репродуктивного поведения населения (Макаров и др., 2015). Агенты в модели были разделены на две группы, различающиеся репродуктивными стратегиями: агенты первой группы придерживаются традиционной стратегии, для которой характерна высокая рождаемость, а агенты второй группы – современной, при которой рождаемость существенно ниже. При этом на одной территории представлены оба типа, хотя и в разной пропорции для представителей разных этнических и социальных групп (например, заметна разница между городским и сельским населением). В модели на основе использования вероятностных механизмов имитируются процессы естественного движения населения региона – смертность и рождаемость. Вымирание агентов происходит в соответствии с половозрастными коэффициентами смертности, но одинаковыми для всей популяции. Создание же новых агентов (рождение детей) в модели является результатом выбора агентов-женщин репродуктивного возраста и зависит от их внутренних установок, связанных с принадлежностью к той или иной группе. Возрастная и социальная структура населения региона в целом обра-

зуется в результате агрегирования действий отдельных агентов. В ходе экспериментов авторы установили, что разработанная агент-ориентированная модель, несмотря на очевидное упрощение действительности, верно воспроизводит как начальное состояние населения условного региона, включая его половозрастную и социальную структуру, так и динамику основных характеристик этого населения (Макаров и др., 2015).

В дальнейшем этой же группой исследователей была разработана *агент-ориентированная демографическая модель «Россия»*, воссоздающая в искусственной среде структуру и особенности функционирования реальных социально-экономических систем, а также технологии реализации подобных АОМ в суперкомпьютерной среде (Макаров и др., 2018; Макаров и др., 2019; Makarov et al., 2022). Базовым блоком модели служит блок, имитирующий процессы смертности, рождаемости и миграции. Смертность в модели имитируется на основе использования данных статистики о возрастно-половой структуре умерших для моделируемого региона, в то время как имитация рождаемости и миграции основана на индивидуальном поведении агентов, зависящем и от внутренних свойств агентов, и от факторов внешней среды. Каждый агент-человек выбирает партнера, создает семью и «рождает» ребенка (создает нового агента-человека) в соответствии со свойственной именно ему репродуктивной стратегией, зависящей, в свою очередь, от приверженности агента определенному типу воспроизводства. Агент обладает следующими свойствами: возраст, пол, максимальное желаемое количество детей в семье и количество уже родившихся детей. Кроме того, агент «помнит» о своих семейных связях. Для этого в модели используются его индивидуальные коллекции (списки) – коллекции родителей, детей, братьев и сестер, других родственников (Макаров и др., 2018; Makarov et al., 2022). К миграции агентов в модели побуждает разница в уровне среднедушевых доходов между различными регионами, а также наличие привлекательных рабочих мест в других регионах или их

отсутствие в регионе – месте жительства. Большую роль в принятии миграционных решений играют социальные связи агентов (например, родственные), от которых во многом зависит уровень информированности агентов об условиях рынка труда (Макаров и др., 2018).

Коллективом исследователей ФАНУ «Востокгосплан» (Е.А. Россошанская, Т.А. Дорошенко, Н.А. Самсонова и др.) разработана *агент-ориентированная модель Дальневосточного федерального округа* с детализацией по 11 субъектам РФ, включающим 230 муниципальных образований, и реализацией в реальном масштабе (1:1) (Россошанская и др., 2022). Структура модели отражает компоненты изменения численности населения и включает естественный (соотношение рождаемости и смертности) и миграционный (соотношение прибывших и выбывших) прирост. Взаимосвязь между компонентами изменения численности населения моделируется в рамках условной жизненной траектории агента, которая включает образовательную, трудовую, семейную и миграционную траектории. Переход между этапами жизненного цикла и траекториями описывается параметрами и ограничениями системы, характеристикой внешней среды, функциональными зависимостями как для отдельных элементов и процессов, так и для всей их совокупности. Главным элементом модели выступает агент-человек (персона), имеющая как индивидуальные свойства, так и принадлежность к семье и домохозяйству. Персоны в модели могут агрегироваться в совокупную численность населения муниципального образования, субъекта или макрорегиона. Элемент «регион» имеет ряд характеристик, отражающих привлекательность территории для проживания / миграционного притока населения, что требуется для оценки интегрального и региональных уровней привлекательности регионов в ДФО, в том числе с учетом реализации экспериментальных расчетов по реализации мер государственной миграционной и социальной политики. Элемент содержит сводную статистику популяции

на уровне макрорегиона, регионов и муниципальных образований. В ходе работы модели для агента-человека рассчитываются вероятности переходов между состояниями на основе стратегий поведения, а принимаемые им решения определяются с помощью мультипликатора значений тех или иных факторов или алгоритмов на основе сравнения альтернатив (Россошанская и др., 2022).

Кроме того, разрабатываются агент-ориентированные модели, имитирующие отдельные демографические процессы. Так, Т.А. Дорошенко создана *АОМ образовательной миграции населения региона* (на примере Вологодской области), имитирующая процесс перемещений населения в связи с учебой с учетом миграционных установок отдельных агентов-людей, поведения образовательных организаций и политики региональных органов власти (Дорошенко, 2019). В модели выделены три типа агентов: агент «человек», агент «образовательная организация», агент «власть», каждый из которых наделен характеристиками, представленными в виде параметров. Агенты-люди (абитуриенты) разделены на три группы: выпускники, поступившие в медицинские университеты (и, следовательно, покинувшие регион), выпускники, которые поступили на специальности, отличные от медицинских; никуда не поступившие выпускники (образовательная миграция отсутствует). В ходе принятия решения о месте получения образования агенты-люди подразделяются на подгруппы: «малообеспеченные», «в погоне за престижем», «тесные семейные связи», «забота о будущем» и «лишь бы поступить и уехать». Агент «управленцы» присутствует в неявном виде, его поведение задается за счет изменения управляемых параметров модели (задание числа бюджетных мест; введение дополнительных региональных стипендий). Воздействие на поведение остальных агентов происходит посредством регулирования параметров агента «образовательная организация» (установка проходных баллов; зачисление / отказ в зачислении; открытие новых специальностей; установка количества платных мест; определение стоимости

обучения). В качестве среды модели выступает территория региона с ее образовательной средой. В ходе работы модели во время каждого шага модельного времени создается популяция агентов численностью, равной количеству выпускников общеобразовательных организаций, затем они наделяются характеристиками (параметрами). Исходя из эмпирического распределения агенты подразделяются по трем группам, приобретая соответствующие состояния. В зависимости от заданных параметров агентов каждой группы и в соответствии с параметрами агента «образовательная организация», условиями концептуальной модели все население разделяется на уехавших из региона и оставшихся. В конце каждого шага модельного времени происходит удаление всех агентов популяции. Числовые данные о распределении выпускников по группам позволяют оценить процесс образовательной миграции в будущем. Разработанная АОМ показала соответствие реальной системе, а проведение вычислительных экспериментов в модели образовательной миграции позволило выявить наилучшие сценарии действия агентов всех типов (Дорошенко, 2019).

В рассмотренных агент-ориентированных моделях имитируются либо отдельные демографические процессы, либо демографическая ситуация в целом посредством моделирования отдельных ее компонент (естественного движения и миграции). Некоторые из перечисленных моделей учитывают поведенческий фактор при имитации демографических процессов за счет использования данных социологических опросов, например, посредством внедрения в качестве характеристик агентов репродуктивных (желаемое число детей) и миграционных установок.

Несмотря на имеющиеся разработки, перспективным представляется построение «цифровых демографических двойников» для отдельных субъектов РФ, что во многом обусловлено значительной региональной дифференциацией демографического развития в России и потребностью региональных органов власти в эффективных инструментах управления им с учетом террито-

риальной специфики. Востребованность разработки агент-ориентированных демографических моделей особенно велика для регионов, находящихся в группе демографического неблагополучия, что важно для поиска механизмов выхода из депопуляции. Кроме того, большое значение приобретает учет поведенческого фактора при моделировании всех процессов – рождаемости, смертности и миграции. Это становится возможным благодаря данным социологических опросов населения, содержащих сведения об индивидуальных установках на создание семьи, деторождение и смену места жительства, а также об их мотивах и факторах.

Концепция агент-ориентированной модели «Цифровой демографический двойник Вологодской области»

В качестве модельного региона в рамках исследования выбрана Вологодская область. Регион стабильно входит в группу субъектов РФ с сокращающейся численностью населения за счет двойного действия естественной и миграционной убыли (Шабунова и др., 2021). В постсоветский период депопуляция в области не прекращалась ни на один год (Рыбаковский, 2023). Данный факт подчеркивает востребованность разработки агент-ориентированной демографической модели Вологодской области для поиска управленческих инструментов и механизмов выхода региона из депопуляции. При отражении как концепции модели, так и ее программной реализации будем придерживаться логики русскоязычной адаптированной формы ODD-протокола, предложенной коллективом исследователей (В.Л. Макаров, А.Р. Бахтизин, Е.А. Россошанская и др.) (Макаров и др., 2023).

Цель моделирования заключалась в разработке реалистичной компьютерной модели, имитирующей демографическое развитие региона (Вологодской области), в т. ч. основные демографические процессы, которая предназначена для апробации управленческого воздействия на них. Модель позволяет прогнозировать численность населения региона (в т. ч. половозрастных групп),

ключевые демографические процессы, проводить эксперименты для обоснования эффективности мероприятий региональной социально-демографической и миграционной политики.

В модели выделяются следующие структурные блоки, позволяющие адекватно отразить моделируемые процессы.

1. Блок имитации воспроизводства населения и миграционного поведения (внутренняя миграция, эмиграция)

В рамках данного блока имитируются процессы создания пар (семей) и их разрушения, рождаемости (рождения детей), смертности, а также перемещения агентов по территории региона (прибытие и выбытие в пределах региона) и выезда за его пределы. Имитация смертности производится на основании половозрастной структуры смертности в регионе (коэффициентов смертности по полу и возрасту) и соответствующих вероятностей смерти для отдельных половозрастных групп. Создание пар (семей) моделируется на основании половозрастных вероятностей вступления в брачные союзы (для несемейных агентов в возрасте 16 лет и старше). Имитация рождаемости осуществляется на основании принятия агентами-женщинами репродуктивного возраста решения о деторождении, зависящего как от их репродуктивных установок (желаемого числа детей) и наличия партнера, так и от внешних условий (социально-экономической ситуации, проводимой социально-демографической политики). Миграция в пределах региона имитируется на основании миграционных установок (установок на переезд) и условий внешней среды, отражающих привлекательность той или иной территории.

2. Блок имитации внешних воздействий (иммиграция)

Имитация иммиграции осуществляется через моделирование прибытия в регион новых агентов под действием параметров привлекательности территории.

В модели предполагаются следующие типы агентов: агенты-люди и агенты-территории (административно-территориальные единицы).

Агентом верхнего уровня является сама модель (макроагент-регион). Агенты-люди – основной тип агентов, агенты-территории – вспомогательный тип агентов, создающий пространство обитания агентов-людей. Агенты модели наделены рядом характеристик или свойств (табл.). Агенты-люди появляются в модели в ходе исходного формирования популяции, рождения детей, въезда на территорию региона (иммиграции). Удаление агентов-людей происходит в случае их смерти и выбытия за пределы региона. Агенты-территории задаются в ходе начального формирования модели, их число неизменно и соответствует количеству административно-территориальных единиц (муниципальных образований) в регионе.

Таблица. Агенты модели и их характеристики

Тип агента	Характеристики
Агенты-люди	<ul style="list-style-type: none"> - Индивидуальный номер, принадлежность к населенному пункту / муниципалитету (место жительства); - пол, возраст (дата рождения); - брачно-семейный статус; - длительность и кратность брака; - наличие и фактическое число детей; - уровень образования; - состояние занятости; - род деятельности; - уровень доходов; - принадлежность к семье и родственные связи; - принадлежность к домохозяйству; - репродуктивные установки; - установки в отношении заключения брака; - самосохранительные установки; - миграционные установки; - состояние здоровья
Агенты-территории (административно-территориальные единицы)	<ul style="list-style-type: none"> - Территориальное положение; - численность постоянного населения (в т. ч. городского и сельского); - численность предприятий; - заработная плата на предприятиях; - показатели развития социальной инфраструктуры (число образовательных организаций дошкольного, школьного, профессионального образования, охват образованием, численность учреждений здравоохранения, обеспеченность медперсоналом и койками), жилищные условия (обеспеченность населения жильем)
Источник: составлено авторами.	

Внешняя среда отражает особенности пространственного расположения, демографические, медико-биологические, социально-экономические и политические параметры. К ее характеристикам относятся, соответственно, пространственные (размещение населенных пунктов; размещение населения по населенным пунктам), демографические (общая численность населения, в т. ч. сельского и городского, половозрастная структура населения, половозрастные коэффициенты смертности, ожидаемая продолжительность жизни, возрастные коэффициенты рождаемости, суммарные коэффициенты рождаемости, половозрастные коэффициенты брачности и разводимости, распределение населения по брачно-семейному статусу, распределение по числу детей и пр.), медико-биологические (характеристики здоровья населения), социально-экономические (показатели рынка труда и структуры занятости, финансов, здравоохранения и образования, доходов и расходов населения, жилищных условий и др.), политические (показатели социально-демографической и миграционной политики) показатели.

Для наполнения модели реальными данными и определения характеристик агентов привлекаются данные Федеральной службы государственной статистики и ее территориального отдела в Вологодской области (текущего статистического учета и Всероссийской переписи населения); для определения поведения агентов-людей – данные репрезентативных мониторинговых социологических опросов населения Вологодской области (мониторингов репродуктивного потенциала, физического здоровья населения и др.).

Теоретической основой построения модели выступили положения концепций демографического и эпидемиологического перехода, демографического поведения (в т. ч. потребности в детях), мобильного перехода (стадийности миграционного процесса).

В модели используется ряд допущений и ограничений:

– агентами в модели являются лица, постоянно проживающие на данной территории

(т. е. постоянное население), временное население не учитывается;

– демографическая ситуация в модели формируется в результате действий агентов-людей, агенты-территории формируют среду (пространство) их обитания, другие агенты не влияют на демографические процессы;

– в модели при имитации процессов рождаемости и создания семей не учитывались редко встречающиеся и не закрепленные законодательством виды брачных партнерств и семей (полигамные, однополые);

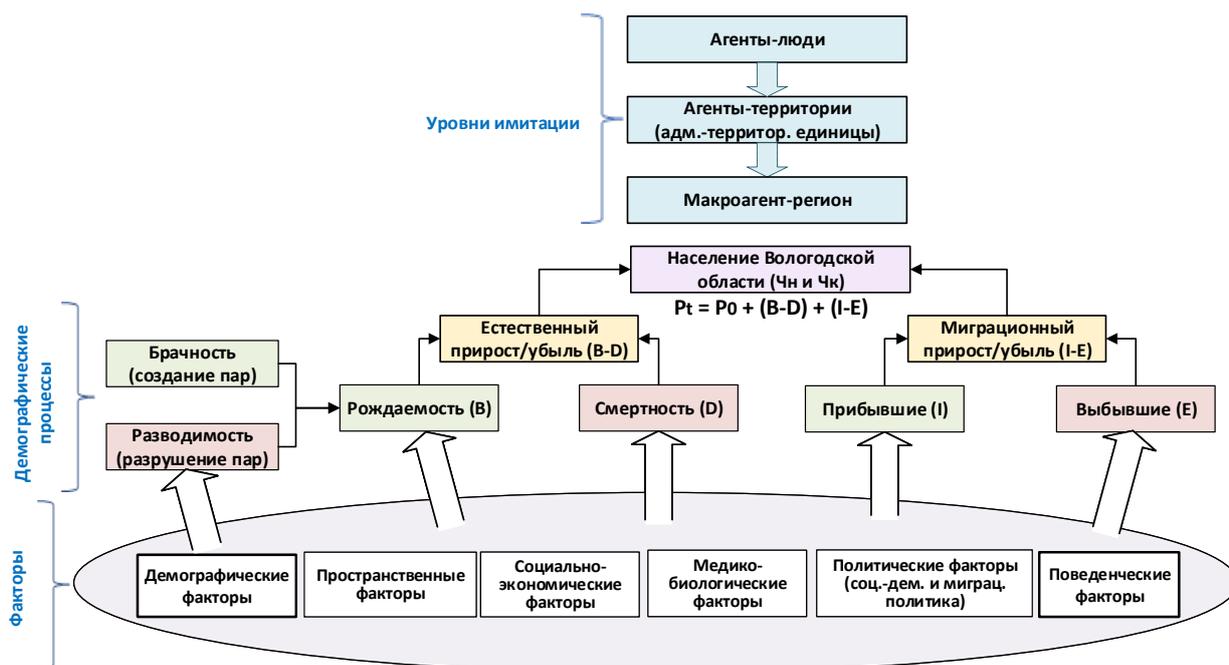
– рождения в модели происходят в рамках партнерств (незарегистрированных и зарегистрированных браков), рождения вне партнерств не рассматриваются ввиду сложности их статистического учета (в число внебрачных рождений по заявлению матери входят рождения в рамках неофициальных брачных союзов);

– смерть в модели происходит независимо от агентов (задается параметрами дожития), т. е. не учитывается добровольный уход из жизни (самоубийства составляют менее 1% умерших в регионе по данным за 2022 год), тогда как рождение ребенка и переезд во многом определяются решением агента;

– выезд агента за пределы региона (эмиграция) по умолчанию признается безвозвратным, т. к. отсутствуют статистические данные о возвратных миграциях;

– место жительства несовершеннолетних агентов-людей определяется местом жительства обоих его родителей (в случае совместного проживания) либо одного из родителей.

На *рис. 1* представлена концептуальная схема АОМ «Цифровой демографический двойник Вологодской области», отражающая компоненты формирования численности населения, а также их факторы. В основе формирования численности населения лежит уравнение демографического баланса, описывающее вклад естественного движения (соотношения смертности и рождаемости) и миграции (соотношения прибывших и выбывших). Отдельно отражены процессы брачности и разводимости, напрямую не



**Рис. 1. Концептуальная (логическая) схема
АОМ «Цифровой демографический двойник Вологодской области»**

Примечание: P_t – численность постоянного населения на конец года; P_0 – численность постоянного населения на начало года; B – число родившихся; D – число умерших; I – число прибывших; E – число выбывших.

Источник: составлено авторами.

влияющие на численность населения, но воздействующие на процесс воспроизводства, а именно на рождаемость. Обозначенные на схеме факторы содержат как характеристики внешней среды, так и параметры индивидуального поведения.

Для имитации демографических процессов привлечены следующие методы.

1. Расчет вероятностных показателей смертности, рождаемости, брачности, разводимости и миграции, в т. ч. из демографических таблиц.

2. Прогнозный метод передвижки по возрастам, предполагающий, что исходная численность и структура населения «передвигаются» в будущее, уменьшаясь при этом за счет умерших (и уехавших) и пополняясь за счет родившихся (и приехавших). Исходными данными для прогноза служат численность и структура населения (обычно по переписи населения) и гипотезы относительно тенденций воспроизводства и миграции населения в прогнозном периоде.

3. Покомпонентный метод, основанный на учете динамики ключевых демо-

графических показателей, а именно темпов изменения показателей рождаемости и смертности за предшествующие несколько лет. На их основании строятся индексы, которые используются в моделировании для изменения демографических показателей каждого прогнозного года в методе передвижки возрастов (Макаров и др., 2015; Сушко, 2012).

4. Метод типологии демографического поведения (выделение на основе социологических данных типов репродуктивного, матримониального, самосохранительного и миграционного поведения).

Главными элементами модели выступают агенты-люди, поскольку их поведение и взаимодействие друг с другом и внешней средой определяет интегральное состояние всей системы. Поведение агента-человека складывается из смены демографических состояний в ходе наступления как повторяющихся, так и неповторяющихся событий (рис. 2). Состояния сменяются исходя из заданных правил принятия решений, регулирующих поведение агентов в зави-

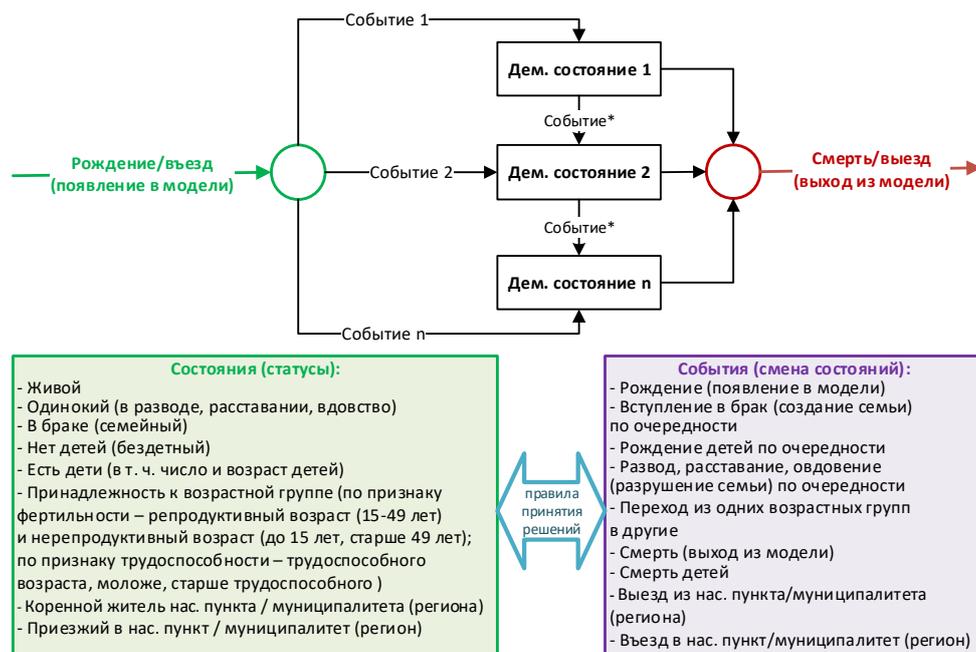


Рис. 2. Схема поведения агента-человека

* В случае неповторяющихся событий (например, рождение агента, переход из одних возрастных групп в другие, заключение и расторжение брака по очередности, рождение детей по очередности, смерть агента) переход между демографическими состояниями (статусами) носит односторонний характер (→). В случае повторяющихся событий (например, смена места жительства) возможен двусторонний переход (↔).

Источник: составлено авторами.

симости от внутренних свойств и характеристик среды (Макаров и др., 2015). Новый агент-человек появляется в случае начального формирования популяции агентов, рождения детей, въезда на территорию извне (из-за пределов модельного региона). Удаление агента из модели производится в случае его смерти и миграции за пределы региона.

В качестве параметров модели, управляемых экзогенно (пользовательские настройки), выступают продолжительность периода прогнозирования, среднее желаемое число детей в семье, средний возраст женщины при рождении ребенка, показатели миграционной привлекательности территории (наличие образовательных организаций среднего и высшего образования, уровень безработицы, размер заработной платы, обеспеченность жильем), преждевременная смертность (от предотвратимых причин смерти).

Программная реализация моделирования

На данном этапе исследования происходит апробация реализации перечисленных выше аспектов модели на техническом уровне. С этой целью был реализован расширяемый прототип модели, отражающий ее базовые компоненты. Прототип модели выполнен в среде агент-ориентированного моделирования GAMA Platform¹. GAMA Platform был выбран в качестве инструментария для разработки, исходя из следующих соображений:

- среда разработки основана на RCP (Rich Client Platform), что обеспечивает удобство использования и гибкость настроек интерфейса;
- GAML – агент-ориентированный язык, созданный для упрощения процесса разработки моделей;
- поддержка различных видов данных, включая ГИС, изображения, таблицы

¹ Исходный код проекта доступен по ссылке. URL: <https://github.com/mrDianov/VologdaDemographyABM>

и 3D-модели, что позволяет разрабатывать сложные и разнообразные модели;

- наличие Unit-тестирования облегчает отладку и улучшает качество кода;

- широкий функционал, сравнимый с объектно-ориентированными языками общего назначения, делает GAML подходящим для создания сложных и детальных моделей;

- родство с Java открывает возможности для интеграции с другими инструментами и расширения функциональности;

- открытость и доступность платформы делают ее привлекательной для исследователей и разработчиков, желающих создавать свои собственные инструменты и расширять границы применения агент-ориентированного моделирования.

Для прототипа модели в качестве регионов расположения агентов-людей выбраны муниципальные образования Вологодской области. Регионы заполняются населением согласно данным Росстата. Время в модели измеряется в календарных годах, шаг моделирования равен 1 году. Масштаб реализации модели 1:1. На каждом шаге у агентов-людей происходит проверка состояния репродуктивности, заключающаяся в рамках разработанного прототипа в сопоставлении возраста агента с заданным репродуктивным интервалом (для женщин – 15–49 лет, для мужчин – 15–60 лет). Агенты-люди мужского пола в репродуктивном состоянии, не имеющие партнера, формируют пары с женщинами репродуктивного возраста. Впоследствии у таких пар либо появляется потомство, либо, в случае отказа от деторождения, они остаются бездетными. При создании пар осуществляется проверка на отсутствие у потенциальных партнеров пары, а также близкого родства. Данные процессы происходят изолированно в различных регионах проживания, что моделирует зависимость демографической динамики от численности населения (для большей адекватности можно в дальнейшем учитывать плотность населения). В рамках сформированных пар создаются новые агенты-люди, тем самым моделируется процесс рождения детей. Рождение ребенка происходит с

заданной вероятностью (сформированной из статистических данных) и зависит от количества уже родившихся у данной пары детей. Завершающей стадией жизненного цикла агента-человека является его смерть. Вероятность смерти рассчитывается на каждом шаге и зависит от возраста и пола агента.

На последующих этапах реализации проекта предполагается дальнейшая детализация и расширение модели для использования ее в качестве средства поддержки принятия управленческих решений.

Заключение

Агент-ориентированная модель «Цифровой демографический двойник Вологодской области», с одной стороны, опирается на имеющиеся разработки демографических АОМ, в частности учитывает основные принципы и алгоритмы их построения, методы, заложенные в моделирование, схемы реализации, подходы к выделению агентов и определению их ключевых свойств, с другой стороны, развивает методологию моделирования посредством использования новых инструментов (новой программной среды GamaPlatform), новых типов агентов (агентов-территорий), расширения перечня поведенческих характеристик, используемых при имитации поведения агентов-людей. Цифровой демографический двойник региона позволит не только осуществлять прогнозы численности и половозрастного состава населения Вологодской области, а также основных демографических процессов, но и с помощью сценарных компьютерных экспериментов оценивать влияние управленческих решений на разные параметры демографического развития региона.

К преимуществам модели следует отнести учет при имитации поведения агентов-людей их жизненного цикла, а именно демографических состояний и переходов между ними в ходе повторяющихся и неповторяющихся демографических событий; использование данных социологических мониторинговых опросов, отражающих параметры демографического поведения населения; использование для моделирования

новой программной среды GamaPlatform; учет территориального фактора (за счет введения агентов-территорий) и возможность детализации модели на разных уровнях (как муниципальных образований (районов и округов), так и отдельных населенных пунктов).

На следующих этапах проекта запланированы продолжение реализации модели в среде программирования, ее графическое представление, испытание и проверка корректности работы, проведение вычислительных экспериментов. В дальнейшем по аналогии с имитацией создания пар (семей),

рождаемости и миграции при имитации смертности планируется ее корректировка характеристиками самосохранительного поведения (в частности, поведенческими факторами риска). Кроме того, перспективным направлением развития модели выступает учет в ней пространственного фактора с помощью использования ГИС-технологий. Успешная реализация агент-ориентированной модели для Вологодской области в перспективе позволит по аналогии разработать цифровые двойники для других регионов, схожих по параметрам демографического развития.

ЛИТЕРАТУРА

- Дорошенко Т.А. (2019). Разработка агент-ориентированной модели образовательной миграции населения региона // Вестник Евразийской науки. № 5. URL: <https://esj.today/PDF/17ECVN519.pdf>
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Логинов Е.Л. (2022). Применение экономико-математических методов и моделей оптимального планирования в цифровой экономике будущего (ЦЭМИ АН СССР и ЦЭМИ РАН: прогностическая интерпретация и развитие научного наследия нобелевских лауреатов Л. В. Канторовича и В. В. Леонтьева). Москва: ЦЭМИ РАН. 248 с.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Россошанская Е.А., Дорошенко Т.А., Самсонова Н.А. (2023). Проблемы стандартизации описания агент-ориентированных моделей и возможные пути их решения // Вестник Российской академии наук. Т. 93. № 4. С. 362–372.
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д. (2015). Имитация особенностей репродуктивного поведения населения в агент-ориентированной модели региона // Экономика региона. № 3. С. 312–322. DOI: 10.17059/2015-3-25
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. (2018). Разработка агент-ориентированной демографической модели России и ее суперкомпьютерная реализация // Вычислительные методы и программирование. Т. 19. С. 368–378. DOI: 10.26089/NumMet.v19r433
- Макаров В.Л., Бахтизин А.Р., Сушко Е.Д., Сушко Г.Б. (2019). Агент-ориентированная суперкомпьютерная демографическая модель России: анализ апробации // Экономические и социальные перемены: факты, тенденции, прогноз. Т. 12. № 6. С. 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4
- Россошанская Е.А., Дорошенко Т.А., Самсонова Н.А. [и др.] (2022). Агент-ориентированная демографическая модель Дальнего Востока как инструмент поддержки принятия управленческих решений // Государственное управление. Электронный вестник. Вып. № 94. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-94-203-224
- Рыбаковский О.Л. (2023). Депопуляция в регионах России: итоги за 1992–2022 гг. и компоненты // Народонаселение. Т. 26. № 2. С. 4–17. DOI: 10.19181/population.2023.26.2.1
- Сушко Е.Д. (2012). Мультиагентная модель региона: концепция, конструкция и реализация: препринт. Москва: ЦЭМИ РАН. 54 с.
- Шабунова А.А., Калачикова О.Н., Короленко А.В. (2021). Демографическая ситуация и социально-демографическая политика Вологодской области в условиях пандемии COVID-19: II региональный демографический доклад / под ред. А.А. Шабуновой. Вологда: ВолНИЦ РАН, 89 с.
- Aparicio-Diaz B., Fent T., Prskawetz A., Bernardi L. (2011). Transition to parenthood: The role of social interaction and endogenous networks. *Demography*, 48 (2), 559–579. DOI: 10.1007/s13524-011-0023-6
- Billari F.C., Ongaro F., Prskawetz A. (2003). Introduction: Agent-Based computational demography. In: Billari F.C., Prskawetz A. (eds.). *Agent-Based Computational Demography. Contributions to Economics*. Physica, Heidelberg. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2715-6_1
- Billari F.C., Prskawetz A., Diaz B.A., Fent Th. (2007). The «Wedding-Ring»: An agent-based marriage model based on social interaction. *Demographic Research*, 17 (3), 59–82.

- Kniveton D., Smith Ch., Wood S. (2011). Agent-based model simulations of future changes in migration flows for Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 21 (1), 34–40. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.09.006
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. (2022). *Agent-based Modeling for a Complex World*. 2nd edition, revised. Moscow: Scientific publications department, GAUGN.
- Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V.D., Noble J. (2013). When demography met social simulation: A tale of two modelling approaches. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 16 (4), 9. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html>. DOI: 10.18564/jasss.2327

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Ольга Николаевна Калачикова – кандидат экономических наук, заместитель директора по научной работе, заведующий отделом, ведущий научный сотрудник, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: onk82@yandex.ru)

Александра Владимировна Короленко – научный сотрудник, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: coretra@yandex.ru)

Даниил Сергеевич Дианов – инженер, Вологодский научный центр Российской академии наук (Российская Федерация, 160014, г. Вологда, ул. Горького, д. 56а; e-mail: daniil.dianov@gmail.com)

Kalachikova O.N., Korolenko A.V., Dianov D.S.

CONCEPT OF THE AGENT-BASED MODEL “DIGITAL DEMOGRAPHIC TWIN OF THE VOLOGDA REGION”

Studies, aimed at creating realistic models of society to forecast scenarios of demographic development and testing various options of controlling influences on it, is becoming particularly relevant in the context of demographic challenges (depopulation, population ageing, declining birth rate, decreasing contribution of migration to compensate for natural population loss) and the need to achieve strategic national priorities in the demographic sphere. Such an opportunity is provided by digital demographic twins – agent-based models, which are laid the foundations for simulation of individual behavior of separate agents – members of society. Such models serve as a platform for conducting experiments in the sphere of demographic processes management and, consequently, as a tool to support managerial decision-making. The aim of the paper is to substantiate the concept and program implementation of the agent-based model simulating the region’s demographic development (the Vologda Region), designed to test the managerial impact on it. The article considers examples of foreign and Russian agent-based models. Despite the existing developments, it is still relevant the construction of digital demographic twins for individual constituent entities of the Russian Federation, especially for the regions of demographic disadvantage. We present the concept of the agent-based model “Digital Demographic Twin of the Vologda Region”: its structural blocks (simulation of population reproduction and migration behavior, simulation of external influences – immigration), types of agents (agents-people and agents-territories) and their properties, characteristics of the external environment, list the main assumptions and limitations of the model, methods of simulation of demographic processes, pay special attention to the scheme of agent-human behavior. We describe the design of the model, and disclose the main parameters of

its software implementation. The advantages of the model include the following: taking into account their demographic states and transitions between them when simulating the behavior of agents-people; using data from sociological monitoring surveys; using the new software environment GamaPlatform for modeling; taking into account the territorial factor in modeling and the possibility of detailing the model at different levels.

Agent-based modeling, digital twin, demographic development, demographic processes, Vologda Region.

REFERENCES

- Aparicio-Diaz B., Fent T., Prskawetz A., Bernardi L. (2011). Transition to parenthood: The role of social interaction and endogenous networks. *Demography*, 48(2), 559–579. DOI: 10.1007/s13524-011-0023-6
- Billari F.C., Ongaro F., Prskawetz A. (2003). Introduction: Agent-Based computational demography. In: Billari F.C., Prskawetz A. (Eds.). *Agent-Based Computational Demography. Contributions to Economics*. Physica, Heidelberg. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-7908-2715-6_1
- Billari F.C., Prskawetz A., Diaz B.A., Fent Th. (2007). The “Wedding-Ring”: An agent-based marriage model based on social interaction. *Demographic Research*, 17(3), 59–82.
- Doroshenko T.A. (2019). Development of an agent-based model of educational migration in the region. *Vestnik Evrazijskoi nauki=The Eurasian Scientific Journal*, 5. Available at: <https://esj.today/PDF/17ECVN519.pdf> (in Russian).
- Kniveton D., Smith Ch., Wood S. (2011). Agent-based model simulations of future changes in migration flows for Burkina Faso. *Global Environmental Change*, 21(1), 34–40. DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2011.09.006
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Epstein J.M. (2022). *Agent-Based Modeling for a Complex World. 2nd Edition, Revised*. Moscow: Scientific publications department, GAUGN.
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Loginov E.L. (2022). *Primenenie ekonomiko-matematicheskikh metodov i modelei optimal'nogo planirovaniya v tsifrovoi ekonomike budushchego (TsEMI AN SSSR i TsEMI RAN: prognosticheskaya interpretatsiya i razvitie nauchnogo naslediya nobelevskikh laureatov L.V. Kantorovicha i V.V. Leont'eva)* [Application of Economic and Mathematical Methods and Models of Optimal Planning in the Digital Economy of the Future (CEMI of the USSR Academy of Sciences and CEMI of the Russian Academy of Sciences: Prognostic Interpretation and Development of the Scientific Heritage of Nobel Laureates L.V. Kantorovich and V.V. Leontiev)]. Moscow: TsEMI RAN.
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Rossoshanskaya E.A., Doroshenko T.A., Samsonova N.A. (2023). Problems of standardization of agent-based model description and possible ways to solve them. *Vestnik Rossiiskoi akademii nauk*, 93(4), 362–372 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D. (2015). Simulating the reproductive behavior of a region's population with an agent-based model. *Ekonomika regiona=Economy of Region*, 3, 312–322. DOI: 10.17059/2015-3-25 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2018). Development of an agent-based demographic model of Russia and its supercomputer implementation. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye*, 19, 368–378. DOI: 10.26089/NumMet.v19r433 (in Russian).
- Makarov V.L., Bakhtizin A.R., Sushko E.D., Sushko G.B. (2019). Agent-based supercomputer demographic model of Russia: Approbation analysis. *Ekonomicheskie i sotsial'nye peremeny: fakty, tendentsii, prognoz=Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 12(6), 74–90. DOI: 10.15838/esc.2019.6.66.4 (in Russian).
- Rossoshanskaya E.A., Doroshenko T.A., Samsonova N.A. et al. (2022). Agent-based demographic model of the Far East as a tool to support management decision making. *Gosudarstvennoe upravleniye. Elektronnyi vestnik*, 94. DOI: 10.24412/2070-1381-2022-94-203-224 (in Russian).
- Rybakovsky O.L. (2023). Depopulation in the regions of Russia: Results for 1992–2022 and components. *Narodonaseleniye=Population*, 26(2), 4–17. DOI: 10.19181/population.2023.26.2.1 (in Russian).
- Shabunova A.A., Kalachikova O.N., Korolenko A.V. (2021). *Demograficheskaya situatsiya i sotsial'no-demograficheskaya politika Vologodskoi oblasti v usloviyakh pandemii COVID-19: II regional'nyi demograficheskii doklad* [Demographic Situation and Socio-Demographic Policy of the Vologda Oblast in the Conditions of the COVID-19 Pandemic: Second Regional Demographic Report]. Vologda: VolRC RAS.

Silverman E., Bijak J., Hilton J., Cao V.D., Noble J. (2013). When demography met social simulation: A tale of two modelling approaches. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS)*, 16(4), 9. Available at: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html>. DOI: 10.18564/jasss.2327

Sushko E.D. (2012). *Mul'tiagentnaya model' regiona: kontseptsiya, konstruktsiya i realizatsiya: preprint* [Multi-Agent Model of the Region: Concept, Design and Realization: Preprint]. Moscow: TsEMI RAN.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ol'ga N. Kalachikova – Candidate of Sciences (Economics), Deputy Director for Science, Head of Department, Leading Researcher, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: onk82@yandex.ru)

Aleksandra V. Korolenko – Researcher, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: coretra@yandex.ru)

Daniil S. Dianov – Engineer, Vologda Research Center, Russian Academy of Sciences (56A, Gorky Street, Vologda, 160014, Russian Federation; e-mail: daniil.dianov@gmail.com)