

Валерий МАКАРОВ, Альберт БАХТИЗИН, Елена СУШКО

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДЕМОГРАФИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА*

В работе описана конструкция агент-ориентированной модели России, имитирующей основные демографические процессы — смертность, рождаемость и миграцию. Изменение места жительства, так же как и рождение детей, является результатом выбора отдельных агентов, обусловленным внешними экономическими условиями и внутренними установками, которые различаются для городских и сельских жителей. Структура населения России в целом и ее регионов образуется в результате агрегирования действий отдельных агентов.

Ключевые слова: агент-ориентированная модель, демографические процессы, социальное моделирование

Прогнозирование развития любых социально-экономических процессов, происходящих как на территории всей страны, так и на территории отдельных ее регионов, основано прежде всего на количественном и качественном прогнозе динамики воспроизводства населения и его пространственного распределения. Особенно важно понимание того, как будут развиваться и каково будет соотношение основных групп населения:

- социальных (городское и сельское население);
- возрастных (трудоспособного, моложе и старше трудоспособного возраста).

В последнее время для имитации поведения сложных социально-экономических систем все шире применяется особый вид имитационного моделирования, а именно, агент-ориентированное¹, реализация которого стала возможной только с появлением современных вычислительных средств. Основная идея, лежащая в основе агент-ориентированных моделей (АОМ), заключается в построении вычислительного инструмента, представляющего собой совокупность агентов, образующих искусственное общество, и состоящее из взаимодействующих между собой самостоя-

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

¹ См.: Макаров В.Л., Бахтизин А.Р. Социальное моделирование — новый компьютерный прорыв (агент-ориентированные модели). М.: Экономика, 2013; Handbook of Research on Agent-Based Societies: Social and Cultural Interactions / Goran Trajkovski and Samuel G. Collins, editors. — New York: Information Science Reference Hershey, 2009.

тельных агентов с определенным набором свойств. 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.

Вводные замечания

Учитывая, что демографические процессы в обществе во многом определяются индивидуальным выбором отдельных людей, не удивительно широкое применение АОМ в моделировании этой сферы².

Для агент-ориентированных (мультиагентных) систем, создаваемых для имитации реальных социально-экономических процессов, характерны определенные черты, отличающие их от моделей других процессов, и эти особенности должны быть учтены при разработке моделей данного класса. Реальные экономические агенты, такие, например, как предприятия или люди, участвуют одновременно во многих процессах, при этом у разных процессов состав значимых для них свойств агентов различается. Поэтому агенты устроены сложно – множество свойств, множество конкурирующих между собой целей и наличие процедур агрегирования тех и других, а также процедур принятия решений. При этом для обеспечения адекватности создаваемых подобных моделей необходимо создавать большие популяции таких сложных агентов. Кроме того, в одной модели могут присутствовать агенты разных типов, образующие иерархические и сетевые структуры. Все это возможно реализовать только с использованием параллельных вычислений на суперкомпьютерах, что ставит самостоятельные задачи обеспечения *эффективности распараллеливания моделируемых процессов* (динамической декомпозиции модели для обеспечения масштабируемости – уменьшения времени расчетов при увеличении числа используемых процессоров).

Отметим, что прогнозированием демографических процессов занимаются многие научные центры в России (к примеру, Высшая школа экономики, Институт социально-экономических проблем народонаселения РАН, Московский государственный университет, Европейский университет в Санкт-Петербурге и др.).

Однако агентный подход применительно к социальной системе России практически не используется. В этой связи разрабатываемая нами модель может рассматриваться в качестве одной из первых.

Зарубежные аналоги

Рассмотрим сперва аналогичные и наиболее известные модели, разработанные за рубежом, где применение АОМ для моделирования демографических процессов используется уже более 10 лет.

² См., напр.: *Billari Francesco C. and Prskawetz Alexia*, eds. (2003): Agent-based computational demography: Using simulation to improve our understanding of demographic behaviour. Springer, 2003; *Wu Belinda M., Birkin Mark H.* Agent-Based Extensions to a Spatial Microsimulation Model of Demographic Change. Agent-Based Models of Geographical Systems, Springer, 2012. P. 347–360.

В статье «Демография и социальное моделирование: история двух подходов к моделированию»³ рассматривается АОМ популяции людей, разработанная для отражения потенциальной синергии от применения агентного подхода к исследованию демографических процессов. Агенты в модели имеют сложную структуру с большим числом состояний, а прогноз демографической динамики возможен на различных уровнях — от отдельных домашних хозяйств до всего населения Великобритании.

В работе «Агент-ориентированная модель заключения брака»⁴ рассматривается АОМ, в которой взаимодействующие в социуме агенты вступают в брак, а вероятность этого события зависит в основном от числа доступных партнеров. При этом интерес в бракосочетании определяется также долей агентов от общего числа, уже заключивших брак. Продолжением предыдущего исследования является работа «Агент-ориентированное моделирование социальных взаимодействий и демографического поведения», в которой описаны три АОМ, рассматривающие различные составляющие демографической системы, в частности, процесс заключения браков, изменения рождаемости и др.⁵

В книге «Динамика численности населения и проекционные методы»⁶ исследуются демографические проблемы Западной Европы, связанные со старением населения, увеличением числа разводов, снижением количества заключенных браков, увеличением числа мигрантов и т.д. Для исследования этих процессов, взаимоувязанных с экономической ситуацией, а также со странами — донорами миграции, применяются агентные модели.

В работе «Падение Берлинской стены: моделирование миграции между Западной и Восточной частями Германии»⁷ предлагается модель, объясняющая наблюдаемые с 1989 г. миграционные потоки из Восточной Германии в Западную. Агенты в модели представляют людей из пяти восточногерманских государств, принимающих решения о миграции в зависимости от посылаемых макроуровнем сигналов (уровень безработицы, разница между доходами на Западе и Востоке и др.). Расчеты, в частности, показали, что географическая близость и спрос на квалифицированный труд являются основными факторами размера миграции.

³ Silverman Eric, Bijak Jakub, Hilton Jason, Cao Viet Dung and Noble Jason. When Demography Met Social Simulation: A Tale of Two Modelling Approaches // Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASSS), 2013. Vol. 16 (4) , Article 9 / URL: <http://jasss.soc.surrey.ac.uk/16/4/9.html>.

⁴ Billari Francesco C., Prskawetz Alexia, Diaz Belinda Aparicio, Fent Thomas. The «Wedding-Ring»: An agent-based marriage model based on social interaction // Demographic Research (Max Planck Institute for Demographic Research in Rostock, Germany), 2007. Vol. 17, Article 3. P. 59–82.

⁵ См.: Diaz Belinda Aparicio: Agent-Based Models on Social Interaction and Demographic Behaviour (Ph.D. Thesis) Technische Universität Wien. 2010.

⁶ Population Dynamics and Projection Methods / edited by John Stillwell and Martin Clarke, Springer Netherlands, 2011.

⁷ Billari Francesco C., Prskawetz Alexia. The Collapse of the Berlin Wall: Simulating State-Level East to West German Migration Patterns. In: Agent-Based Computational Demography. Heidelberg: Physica Verlag. 2003.

Используемая методология

В создаваемой нами среде *AnyLogic*⁸ мультиагентной модели России демографические процессы рассматриваются в разрезе регионов – субъектов РФ, которые включают популяции агентов, соответствующих фактическому распределению населения по полу и возрасту в пределах этих регионов. Для моделирования таких демографических процессов, как смертность, рождаемость и миграция населения, используется комбинация двух методов⁹:

- *метода передвижки возрастов*, при котором каждый год выжившие в соответствии с половозрастными коэффициентами выживаемости ежегодно становятся на год старше и участвуют в процессе миграции, а также в репродуктивном процессе (в соответствии с данными о рождаемости для женщин фертильного возраста);
- *покомпонентного метода*, основанного на учете динамики основных демографических показателей – смертности, рождаемости и миграции: на основе наблюдений выявляются тенденции изменения этих показателей и строятся соответствующие индексы, которые и используются затем в моделировании, изменяя для каждого прогнозного года демографические показатели в методе передвижки возрастов.

При такой процедуре прогнозирования различные сценарии получаются при варьировании индексов, фактически означая разные предположения о развитии отдельных процессов.

Мультиагентная модель позволяет лучше друг друга воспроизводить эти процессы в разрезе регионов – субъектов РФ.

Алгоритмы модели

Имитация смертности в модели. Используются коэффициенты смертности для получения вероятности умереть для агента каждого возраста – отдельно для мужчин и женщин. При переходе к следующему шагу (году) коэффициенты смертности перед применением умножаются на соответствующий индекс. Таким образом, исходными данными для имитации этого процесса служат половозрастные коэффициенты смертности и индексы их изменения. Степень детализации индексов можно повышать, вводя дифференциацию по отдельным группам агентов и/или по отдельным регионам. Таким образом, можно учесть влияние социальных, экономических и экологических факторов. Причем учитывается как негативное влияние (например, ухудшение экологии), так и влияние позитивное (например, улучшение системы здравоохранения).

Смерть (если не учитывать суицид) происходит не по воле агентов, в то время как другие демографические процессы в значительной степени зависят от индивидуального выбора каждого агента.

⁸ *AnyLogic* – инструмент имитационного моделирования, который поддерживает все подходы к созданию имитационных моделей: процессно-ориентированный (дискретно-событийный), системно-динамический и агентный, а также любую их комбинацию. Более подробно / URL: <http://www.anylogic.ru>.

⁹ См.: Бахметова Г.Ш. Методы демографического прогнозирования. М.: Финансы и статистика, 1982. С. 159.

Имитация миграции. В соответствии с моделью экономически активные агенты могут выбирать место жительства, стремясь улучшить свое материальное положение. Для имитации такого поведения агентов используется информация о средней заработной плате, величине прожиточного минимума и уровне безработицы в различных регионах, а также процедура миграционного выбора, позволяющая агентам выбирать место жительства в зависимости от текущего состояния внешней среды — как стимулов для миграции, так и ограничений для ее осуществления. Для имитации миграции нетрудоспособного населения каждый мигрирующий агент трудоспособного возраста вероятностным образом наделяется «семьей» в соответствии с данными статистики о распределении внутренних мигрантов по полу и возрасту.

Принципиальным моментом для разработчиков модели является то, что показатели миграции должны получаться автоматически как реакция популяции агентов на изменение экономических условий. Поэтому исходными данными для имитации процесса миграции служат статистические данные о ней, уровнях безработицы, заработной плате и прожиточном минимуме в выбранном базовом году, а также индексы изменения безработицы, заработной платы и прожиточного минимума. В то же время индексы изменения миграции напрямую не используются — вместо этого в модели имитируется процесс принятия агентами решения о выборе места жительства на основе обработки информации о состоянии экономики различных регионов. При этом при принятии решения об изменении места жительства учитывается разница между уровнями жизни в разных регионах (в качестве которой принимается отношение средней по региону заработной платы к величине прожиточного минимума), а ограничителем в реализации миграционных настроений является доступность трудоустройства на новом месте (в качестве которой принимается отношение уровня безработицы на прежнем месте к уровню безработицы на новом). Для выбора агентом акта миграции и его осуществления необходимо, чтобы качество жизни на новом месте жительства превышало в α раз качество жизни на старом, а показатель доступности трудоустройства на новом месте превышал β . Окончательный выбор производится случайным образом, причем вероятность выбора того или иного региона убывает вместе с увеличением его удаленности от места жительства агента (удаленность принимает целочисленные значения от 0 до 2 и соответствует значениям «регион — место жительства», «близкий регион», «дальний регион»). Коэффициенты α и β являются пороговыми значениями, и их величины определяются в процессе калибровки модели на фактических данных о миграции за ряд лет, так же как и величина γ , на которую снижается вероятность выбора региона из каждой следующей по дальности категории.

Имитация рождаемости. Агенты репродуктивного возраста в модели могут принимать решение о рождении детей. Так же как и при моделировании процессов миграции, разработчики модели исходили из установки, что показатели рождаемости должны получаться как реакция популяции агентов на изменение внешних условий. Поэтому исходными данными для имитации процесса рождаемости служат статистические данные, характеризующие в выбранном базовом году:

- рождаемость;
- национальный состав;
- соотношение городского и сельского населения;
- уровень безработицы;
- уровень заработной платы;
- величину прожиточного минимума.

Кроме выделенных абсолютных показателей учитываются и индексы изменения безработицы, заработной платы и прожиточного минимума. В то же время индексы изменения рождаемости напрямую не используются — вместо этого в модели имитируется процесс принятия агентами — женщинами фертильного возраста решения о рождении ребенка на основе как внутренней установки, обусловленной типом репродуктивного поведения (типом воспроизводства), так и информации об изменении экономической ситуации в месте проживания.

В модели используются принятые в специальной литературе следующие типы воспроизводства:

- традиционный тип, характеризующийся высокой рождаемостью;
- современный, или рациональный тип, характеризующийся снижением рождаемости¹⁰.

На территории нашей страны наблюдаются оба типа воспроизводства, причем в разной пропорции для представителей разных этнических и социальных групп (например, заметна разница между городским и сельским населением). Для имитации такого поведения агентов-женщин используются коэффициенты рождаемости, дифференцированные по возрастам агентов, которые корректируются в зависимости от места их жительства и динамики уровня жизни в регионе.

Изменения влияющих факторов внешней среды и внутренних установок происходят с разной скоростью. Так, уменьшение рождаемости (переход к другому типу воспроизводства) запаздывает на одно-два поколения по сравнению с улучшением экономической ситуации. Введя в модель подобные зависимости, мы добиваемся того, что *показатели рождаемости получаются автоматически как реакция популяции агентов на изменение экономических и социальных условий*.

Таким образом, агенты в модели наделены следующими характеристиками:

- пол;
- возраст;
- регион проживания (субъект РФ);
- место жительства (город или село);
- национальность;
- тип репродуктивного поведения;
- желаемое и фактическое число детей.

При создании агентов их характеристикам в соответствии с данными статистики вероятностным образом присваиваются определенные значения в такой последовательности, которая определяет выбор репродуктивной стратегии. В свою очередь тип репродуктивной стратегии определяет для агента-женщины максимальное (желаемое) число детей, а также с учетом ее возраста — фактическое число детей и вероятность рождения нового ребенка.

¹⁰ См.: Вишневецкий А.Г. Воспроизводство населения и общество: История, современность, взгляд в будущее. М.: Финансы и статистика, 1982. С. 159–197.

Полученные повозрастные коэффициенты рождаемости корректируются в зависимости от места жительства агента (уменьшаются для городского населения и увеличиваются для сельского на коэффициент вариации δ) и, кроме того, умножаются на индекс изменения уровня жизни.

Внешняя для агентов среда задается следующими характеристиками:

- уровнем инфляции и его индексом;
- дифференцированными по полу и возрасту;
- коэффициентами смертности и рождаемости в разрезе регионов;
- средней по регионам заработной платой и индексам ее изменения;
- индексами изменения коэффициентов смертности;
- настраиваемыми коэффициентами модели, такими как α , β , γ и δ ,

а также параметры β -распределения, с помощью которого определяется число детей для представительниц групп каждого типа воспроизводства.

Для того чтобы в модельных экспериментах можно было проследить влияние не только экономических, но и других факторов (например, социальных и/или экологических), необходимо будет не только расширить множество характеристик внешней для агентов среды, но и усложнить процедуры, имитирующие поведение агентов, введя в них зависимости от этих характеристик.

Схематично описанные алгоритмы основных компонентов демографических процессов, реализующихся на каждом шаге работы модели, могут быть представлены в виде следующих фрагментов псевдокода в стиле *Java* (листинги 1 – 3):

```
int n = <Численность населения>;
int max_age = <Максимальное значение возраста в модели>;
double mortality[2, max_age] = <Половозрастные коэффициенты смертности>;
double index_mortality[2] = <Индексы изменения коэффициентов смертности>;
double p = <Вероятность смерти>;

// Корректировка текущих значений повозрастных коэффициентов
// смертности для мужчин и женщин

for (int i = 0; i < max_age; i++) {
    mortality[0, i] = mortality[0, i] * index_mortality[0];
    mortality[1, i] = mortality[1, i] * index_mortality[1];
}

// Вымирание агентов в соответствии с коэффициентами смертности

for (int j = 0; j < n; j++) {
    p = bernoulli( mortality[<Пол агента j>, <Возраст агента j>] );
    if ( p > 0 ) {
        remove_agent( agent.get(j) );
        n--;
    }
}
```

Листинг 1. Программная реализация алгоритма «Смертность»

```
int n = <Численность населения>;
double inflation = <Инфляция>;

double alpha = <Пороговое значение разницы в уровне жизни>;
double beta = <Пороговое значение разницы в уровне безработицы>;
double gamma = <Коэффициент снижения вероятности переезда>;

int n_region = <Число регионов>;

double cost_living[n_region] = <Прожиточный минимум регионов>;
double wealth[n_region] = <Уровень жизни регионов>;
double fizzle[n_region] = <Уровень безработицы>;
double incom[n_region] = <Средняя заработная плата>;
double income_index[n_region] = <Индекс изменения зарплаты>;
double fizzle_index[n_region] = <Индекс изменения безработицы>;

int distance[n_region, n_region] = <Таблица взаимной удаленности регионов>;
double best_region[n_region, n_region] = <Коллекции доступных регионов>;

// Корректировка текущих значений средней зарплаты, прожиточного
// минимума, расчет показателей уровня жизни по регионам

for (int i = 0; i < n_region; i++) {
    incom[i] = income_index[i] * incom[i];
    cost_living[i] = inflation * cost_living[i];
    wealth[i] = incom[i] / cost_living[i];
}

// Актуализация коллекций, доступных для переселения регионов
// (для каждого региона)

int k = 0;
for (int i = 0; i < n_region; i++) {
    k = 0;
    for (int ii = 0; ii < n_region; ii++) {
        if ((wealth[ii] / wealth[i] > alpha) &
            (fizzle [i] / fizzle [ii] > beta)) {
            k = k + 1;
            best_region[i,k] = ii;
        }
    }
}

// Миграция агентов

int kk = 0;

for (int j = 0; j < n; j++) {
    if ( <Возраст агента j> == <Трудоспособный> ) {
```



```
for (int k = 0; k < n_region; k++) {
    kk = best_region[<Регион агента j>, k];
    p = bernoulli(1 - gamma* distance[<Регион агента j>,kk]);
    if ( p > 0 ) {
        <Регион агента j> = kk;
        break;
    }
}
}
```

**Листинг 2. Программная реализация алгоритма «Миграция агентов
трудоспособного возраста»**

```
int n_fem = <Число агентов-женщин фертильного возраста>;
int min_repr = <Нижняя граница фертильного возраста>;
int max_repr = <Верхняя граница фертильного возраста>;
int repr = max_repr - min_repr;

int max_children[n] = <Планируемое число детей>;
int children[n] = <Число рожденных детей>;

double birthrate[repr] = <Повозрастные коэффициенты рождаемости>;
double index_incom[n_region] = <Индексы изменения уровня жизни регионов>;
double index_birthrate = <Индекс изменения рождаемости>;
double delta = <Коэффициент вариации рождаемости>;

// Рождение новых агентов

for (int j = 0; j < n; j++) {
    if (( <Пол агента j> == <Женский>) &
        (<Возраст агента j> == <Фертильный>) &
        (children[j] < max_children[j])) {
        index_birthrate = index_incom[ [<Регион агента j>];
        birthrate[<Возраст агента j> - min_repr] =
            birthrate[<Возраст агента j> - min_repr] +
            delta * (<Тип поселения агента j> - 0,5);
        p = bernoulli(birthrate[<Возраст агента j> - min_repr] *
            index_birthrate);
        if ( p > 0 ) {
            add_agent();
            children[j]++;
        }
    }
}
```

Листинг 3. Программная реализация алгоритма «Рождаемость»

Расчеты

Исследования, которые можно проводить с использованием описанной модели:

- моделирование дифференциации регионов по уровню доходов и связанные с ней миграция и репродуктивное поведение населения;
- региональные изменения в национальной структуре населения;
- региональные изменения возрастной структуры населения.

Особенно важно рассмотрение структуры по категориям жителей – трудоспособное население, моложе трудоспособного и старше трудоспособного. Введя в модель в качестве варьируемого параметра возраст выхода на пенсию мужчин и женщин, можно также оценить изменения демографической нагрузки, вызванные различными решениями руководства страны.

В процессе работы системы можно получать оперативную информацию о социальном положении всех регионов России, в т.ч. с использованием картографической информации, меняющейся в режиме реального времени в зависимости от значений эндогенных параметров.

На базе описанной модели проведены экспериментальные расчеты с количеством агентов от 1000 до 1 млн, которые показали серьезные изменения в будущем (10–20 лет). Например, показано, что при сохранении текущих тенденций население Сибирского и Дальневосточного федеральных округов значительно сократится, в то время как в регионах Южного федерального округа, наоборот, произойдет существенный прирост.