

СОЦИАЛЬНО-ДЕМОГРАФИЧЕСКИЙ ПОТЕНЦИАЛ РЕГИОНАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ

Для цитирования: Шмидт Ю. Д., Ивашина Н. В., Лободин П. Н., Кухлевский А. Л. Прогнозирование межрегиональных миграционных потоков // Экономика региона. — 2017. — Т. 13, вып. 1. — С. 126-136
doi 10.17059/2017-1-12
УДК 314.1: 519.8

Ю. Д. Шмидт, Н. В. Ивашина, П. Н. Лободин, А. Л. Кухлевский

Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, Российская Федерация; e-mail: syd@dvfu.ru)

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МЕЖРЕГИОНАЛЬНЫХ МИГРАЦИОННЫХ ПОТОКОВ¹

В статье исследуется проблема моделирования межрегиональных миграционных потоков. Отмечается, что существующие модели межрегиональных миграционных потоков используют, как правило, агрегированные данные и не учитывают, что решение о переезде на новое место жительства формируется и принимается на микроуровне, на уровне домашних хозяйств. Цель исследования — разработать методику прогнозирования межрегиональных миграционных потоков региона, учитывающую поведение домашних хозяйств на микроуровне. Тестируется гипотеза исследования: моделирование поведения домашних хозяйств на локальном уровне в вопросах принятия решения о переезде на новое место жительства в другие регионы, с учетом существующих взаимодействий с родственниками и другими сообществами, позволяет получать адекватные прогнозы межрегиональных миграционных потоков. Разработан методический подход и создан программный продукт для прогнозирования межрегиональных миграционных потоков региона на основе предложенной в работе модификации модели клеточного автомата и эконометрических моделей процессов рождаемости и смертности, которые апробированы на примере Приморского края. Авторская модель клеточного автомата является разновидностью комбинированного вероятностного клеточного автомата, в котором состояние каждой клетки меняется в зависимости от состояния четырех ближайших соседей (окрестность фон Неймана) и четырех клеток, выбранных случайным образом. В статье построен среднесрочный прогноз межрегиональных миграционных потоков Приморского края. Проведенное исследование показывает возможность и целесообразность моделирования межрегиональных миграционных потоков клеточными автоматами. Весьма перспективным направлением исследований является моделирование и других макроэкономических процессов на основе моделирования клеточными автоматами поведения домашних хозяйств, фирм и других субъектов экономической деятельности на локальном уровне.

Ключевые слова: прогноз, миграция, межрегиональный поток, клеточный автомат, регионы, методический подход, программный комплекс, Приморский край

Введение

Миграционные процессы как сложные социально-экономические явления привлекают внимание многих исследователей не только научной актуальностью (выявление современных тенденций, анализ динамики и влияния различных социально-экономических факторов на их интенсивность, моделирование и прогнозирование количественных ха-

рактеристик миграционных процессов), но и их огромной практической значимостью для многих регионов мира. Миграция оказывает существенное влияние на формирование демографической структуры населения территорий, состояние региональных и локальных рынков труда. Для успешного проведения социально-экономической политики необходимо уметь прогнозировать величину и направление миграционных потоков, а для этого нужно учитывать особенности межрегиональной и внутренней миграции и ее определяю-

¹ © Шмидт Ю. Д., Ивашина Н. В., Лободин П. Н., Кухлевский А. Л. Текст. 2017.

щие факторы, а также оценивать последствия миграции. Это невозможно без построения моделей миграции.

Существует значительный опыт отечественных и зарубежных ученых применения эконометрических моделей для моделирования миграционных процессов [1–4]. Наряду с традиционным эконометрическим аппаратом для моделирования миграции населения применяются нелинейные динамические модели [5, 6].

Для моделирования движения населения достаточно успешно используется теория случайных процессов. В работе [7] и большинстве последующих работ в этой области в качестве модели движения населения используются марковские цепи — дискретные марковские процессы с дискретным временем.

В настоящее время в научной литературе сравнительно невелико количество работ, посвященных моделированию внутренней миграции в России. В работе [8] показано, что миграционные потоки в России зависят от средней заработной платы в регионе и от уровня цен. В работе отмечается, что основные миграционные потоки наблюдаются между регионами со сравнительно высоким уровнем социально-экономического развития. Уровень денежных доходов населения оказывает существенное влияние на возможность переезда на новое место жительства.

В работе [1] показано, что в 90-е гг. в России наблюдался убывающий тренд объемов внутренней миграции, при этом различия в уровне социально-экономического развития регионов страны увеличивались. Это согласуется с общемировыми тенденциями снижения объемов внутренней миграции в развитых странах мира.

В настоящее время существует целый ряд работ (например [9, 10]), посвященных исследованию миграции в различных странах мира, в которых обосновано, что на миграцию влияют не только различия в межрегиональных рынках труда, заработная плата и ее покупательская способность, но и социальные условия проживания, климат и географическое положение регионов.

Эти и подобные работы выполнены на агрегированных данных на уровне регионов и страны в целом. Но мигранты принимают решение о переезде на локальном уровне, проживая на конкретной территории, в конкретных социально-экономических условиях и обществе. Выбирают мигранты, в конечном итоге среду проживания — определенное поселение, город со своим локальным рынком

труда, если даже первоначально и было только желание переехать на новое место жительства в другой регион. При этом миграционная активность населения проявляется достаточно быстро при возникновении неблагоприятных социально-экономических условий на территории проживания, значительно опережая многие другие демографические процессы. Поэтому при прогнозировании межрегиональных миграционных потоков необходимо учитывать, что решение о переезде на новое место жительства формируется и принимается на микроуровне, на уровне домашних хозяйств.

Для учета этих аспектов в данной статье предлагается использовать клеточные автоматы для моделирования и прогнозирования межрегиональных миграционных потоков. Теория клеточных автоматов имеет сравнительно небольшую, но достаточно продуктивную историю, основные этапы которой детально изложены в работах [11–13].

В последние годы клеточные автоматы находят свое применение при моделировании социальных явлений как для качественного анализа процессов в виде структурных элементов различных теоретических моделей, так и для численного прогнозирования [14, 15]. Результаты исследований в области городской миграции, использующих клеточные автоматы, представлены в работах [16, 17]. В этих работах сделан акцент на использование клеточных автоматов при анализе нелинейных динамических взаимодействий домашних хозяйств в сообществе в силу простоты реализации подобными моделями взаимодействия домашних хозяйств на микроуровне, а также способности моделей учитывать влияние макроэкономических условий на моделируемые процессы. В частности, модели клеточного автомата, разработанные в работе [17], включают правила, которые управляют решением домашних хозяйств о переезде в другой район города. Каждое домашнее хозяйство имеет свою социальную структуру, которая представлена интегральным показателем, отражающим некоторые бытовые характеристики домашнего хозяйства: средний возраст жителей, средний доход, статус занятости и т. д. Решение о переезде возникает, когда имеется значительное расхождение между социальным статусом домашнего хозяйства и средним социальным статусом района его проживания.

В целом у моделей клеточных автоматов достаточно много положительных качеств, которые, несомненно, влияют на активность их ис-

пользования в различных областях науки. В модели клеточного автомата каждая клетка изменяет свое состояние, взаимодействуя с ограниченным числом клеток, как правило, ближайшего окружения. Однако имеется возможность одновременного (параллельного) изменения состояния всех клеток, всей решетки на основе общего правила клеточного автомата. Это свойство позволяет при моделировании связывать процессы, происходящие на микроуровне, с изменениями процессов, протекающими на макроуровне. Это важнейшее свойство клеточных автоматов, позволяющее их успешно использовать для моделирования систем, в которых значительную роль играют пространственные взаимодействия между элементами.

Цель данного исследования — разработать прогноз межрегиональных миграционных потоков Приморского края, используя модифицированную модель комбинированного клеточного автомата. Анализ существующих моделей, используемых для моделирования миграционных потоков, показывает, что, несмотря на достаточно широкое их разнообразие, в большинстве моделей используются только агрегированные данные. При этом возникает определенный разрыв между поведением экономических объектов на микроуровне, соответствующими эмпирическими данными и прогнозируемыми показателями миграционных процессов на макро- и мезоуровнях.

Гипотеза исследования заключается в том, что моделирование клеточными автоматами поведения домашних хозяйств на локальном уровне в вопросах принятия решения об отъезде в другие регионы позволит получить адекватные прогнозы межрегиональных миграционных потоков.

Описание модели клеточного автомата

Клеточный автомат состоит из конечной совокупности объектов (ячеек), как правило, образующих регулярную решетку. Другими словами, если не использовать строгие математические термины, это — совокупность ячеек, определенным образом соединенных между собой и образующих равномерную сетку (решетку). При этом состояние каждой i -й ячейки (клетки) в момент времени t характеризуется некоторым числом $a(i, t)$ или набором чисел. Совокупность состояний всех клеток решетки называется состоянием решетки. В модели клеточного автомата каждое состояние решетки соответствует некоторому моменту времени, которое изменяется дис-

кретно по шагам (итерациям). Состояние решетки меняется в соответствии с некоторым законом, который называется правилом клеточного автомата. Правила определяют, какое состояние должно быть у клетки в следующий момент времени, в зависимости от состояний ее и некоторых других клеток в текущий момент времени.

Классическая модель клеточного автомата имеет следующие свойства:

- сеть клеточного автомата является однородной, то есть правила изменения состояний для всех клеток одинаковы;
- множество состояний каждой клетки конечно;
- на клетку могут повлиять лишь клетки из ее окрестностей, ближайшие соседи;
- состояния всех клеток меняются одновременно, в конце итерации.

Клеточный автомат, в котором состояние клеток в последующий момент времени определяется на основе некоторых вероятностей, называется вероятностным клеточным автоматом.

В современных условиях повлиять на решение домашних хозяйств о переезде могут не только ближайшие соседи, но и произвольно расположенные в пространстве агенты. Для моделирования этой ситуации можно использовать комбинированный вероятностный клеточный автомат, предложенный в работе [14], в котором состояние каждой клетки меняется в зависимости от состояния четырех ближайших соседей (имеющих общую сторону) и четырех клеток, выбранных случайным образом.

При реализации модели клеточного автомата будем использовать прямоугольные сетки клеток для исследуемого региона и каждого федерального округа России, а также для стран ближнего зарубежья. Каждая прямоугольная сетка содержит количество клеток, соответствующее количеству домашних хозяйств в данном регионе, с учетом предположения, что домашнее хозяйство состоит из трех человек. Также при построении клеточного автомата необходимо задать правила его поведения на границах сетки, в данном исследовании предлагается режим работы автомата с отсутствием границ, то есть первая строка считается продолжением последней, а последняя — предшествующей первой (то же самое относится и к столбцам).

Имеются вероятности выезда из исследуемого региона по 9 направлениям (федеральные округа РФ, страны дальнего и ближнего зарубежья). Пусть $p_0, p_1, \dots, p_9$, где p_0 — вероятность

остаться проживать в исследуемом регионе, p_i — вероятность переехать на постоянное место жительства в i -й регион, $i = 1, \dots, 9$. Эти вероятности вычисляем как средние за ряд лет.

Формируем клетки, соответствующие домашним хозяйствам исследуемого региона. Количество клеток соответствует числу жителей, деленному на 3, то есть считаем, что семья состоит в среднем из трех человек. Используя датчик случайных чисел, равномерно распределенных на отрезке $[0, 1]$, отмечаем исходное состояние клеток числами от 0 до 9. Если состояние клетки 0, то соответствующее домашнее хозяйство остается на следующий период жить в исследуемом регионе, если — i , то уезжает в i регион, $i = 1, \dots, 9$.

Алгоритм расчетов в модели на каждой итерации состоит из следующих этапов:

1. Определение домашних хозяйств, принявших решение выехать из исследуемого региона.

2. Определение количества домашних хозяйств, принявших решение приехать в исследуемый регион.

3. Уточнение количества клеток сетки, соответствующей исследуемому региону, учитывая процессы миграции, рождаемости и смертности.

4. Пересмотр по исследуемому региону клеток сетки и определение их состояний.

На первом этапе выполняем один шаг по сетке, соответствующей исследуемому региону. Перебираем для каждой клетки 4 соседние клетки и четыре выбранные случайным образом в регионе. В этих клетках рассматриваем их состояния:

— если можно отметить состояние среди соседних и выбранных клеток, которое отлично от нуля и таких клеток больше, чем клеток в любом другом ненулевом состоянии среди этих клеток, то при переезде данное домашнее хозяйство выезжать будет в регион, который соответствует отмеченному состоянию по этим клеткам;

— если такого состояния нет, то по m клеткам с ненулевым состоянием, по вероятностям выезда в соответствующие регионы $p_{i_1}, p_{i_2}, \dots, p_{i_m}$ вычисляем $p = \sum_{j=1}^m p_{i_j}$. Разбиваем отрезок $[0, 1]$ на интервалы длины p_{i_j} / p , $j = 1, \dots, m$. Генерируем случайное число из отрезка $[0, 1]$ и выбираем регион выбытия в соответствии с тем, в какой интервал попадает число.

Учитывая состояние всех клеток-соседей — окружения (8 клеток) и используя функцию Лапласа, строим функцию перехода $P(n)$.

$$W(n) = P\left(-3\sigma \leq x \leq -3\sigma + \frac{3}{4}\sigma n\right) = \Phi\left(-3 + \frac{3}{4}n\right) + \Phi(3), \quad (1)$$

$$P(n) = \frac{W(n)}{k}, \quad k = \frac{0,9973}{\sum_{i=1}^9 p_i}, \quad (2)$$

где n — число клеток из окрестности текущей клетки в состоянии ненулевом; σ — среднее квадратичное отклонение; $\Phi(x)$ — функция Лапласа.

Это вполне согласуется с центральной предельной теоремой теории вероятностей, согласно которой если случайная величина представляет собой сумму большого числа взаимно независимых случайных величин, то она имеет распределение близкое к нормальному. Более того, для нормально распределенной случайной величины справедливо правило трех сигм: если случайная величина распределена нормально, то абсолютная величина ее отклонения от математического ожидания не превосходит утроенного среднего квадратичного отклонения.

Вычисляем случайное число x , если $x < P(n)$, то домашнее хозяйство принимает решение уехать в выбранный регион. Запоминаем координаты этой клетки. В противном случае состояние клетки 0 и семья остается проживать в регионе.

На втором этапе аналогичным образом по сеткам, соответствующим федеральным округам и странам ближнего зарубежья, определяем домашние хозяйства, принявшие решение выехать в исследуемый регион. По каждому федеральному округу и ближнему зарубежью известна вероятность выехать в исследуемый регион — g_i . Все клетки соответствующей сетки имеют состояние 0 или 1, в зависимости от того, принимает домашнее хозяйство решение оставаться проживать в этом регионе или выехать в исследуемый регион. Перебираем для каждой клетки 4 соседние клетки и четыре выбранные случайным образом в регионе. В этом случае функция перехода $P(n)$ имеет следующий вид:

$$P(n) = \frac{W(n)}{k}, \quad k = \frac{0,9973}{g_1}, \quad (3)$$

где n — число клеток из окрестности текущей клетки в состоянии 1.

Вычисляем случайное число x , если $x < P(n)$, то домашнее хозяйство принимает решение уехать в исследуемый регион. В противном

случае состояние клетки 0, и семья остается проживать на прежней территории. По каждой сетке рассчитываем количество приезжающих в исследуемый регион, находим их сумму.

На этапе 3 вычисляется сальдо миграции за итерацию: разность количества домашних хозяйств, принявших решение выехать и приехать в исследуемый регион.

Рассчитывается естественный прирост (убыль) населения исследуемого региона. Если выполняется настройка автомата, то естественный прирост (убыль) населения вычисляется за соответствующий год по статистическим данным. При выполнении прогнозных расчетов естественный прирост (убыль) населения вычисляется за год по эконометрическим моделям смертности и рождаемости в исследуемом регионе. При этом выполняется следующая последовательность расчетов:

- 1) выделение из исходного перечня показателей основных факторов, влияющих на анализируемый демографический процесс, с использованием факторного анализа;

- 2) построение регрессионного уравнения зависимости количественных показателей анализируемого демографического процесса от выделенных основных факторов;

- 3) прогнозирование значений выделенных основных факторов на следующие периоды времени с использованием стандартных методов прогнозирования временных рядов;

- 4) вычисление прогнозных значений количественных показателей анализируемого демографического процесса по построенному регрессионному уравнению и прогнозным значениям выделенных основных факторов;

- 5) расчет прогнозируемых значений естественного прироста (убыли) населения исследуемого региона по годам на прогнозируемый период времени.

С учетом вычисленных значений сальдо миграции и естественного прироста (убыли) населения определяются численность населения исследуемого региона в конце итерации или за анализируемый период (отчетный или прогнозный год) и количество клеток соответствующей сетки.

На этапе 4 распределяются случайным образом прибывшие в исследуемый регион домашние хозяйства по клеткам сетки, соответствующим выехавшим из исследуемого региона домашним хозяйствам, при необходимости изменяется количество клеток. Значения состояния, которые получают такие клетки, определяются в соответствии с вектором вероятности отъезда на текущий год из исследу-

емого региона. Выполняется переход на этап 1 или завершается процедура расчетов. Если выполняется настройка автомата, то количество итераций определяется по величине разности между рассчитанным количеством и реальным значениям выехавших за этот год людей. Если выполняется прогноз, то количество итераций определяется как средняя величина итераций автомата для моделирования периода в один год в среднем за пять лет при настройке автомата.

Результаты эксперимента

Разработанный клеточный автомат был апробирован на статистических данных по Приморскому краю. Миграционные процессы на Дальнем Востоке России с конца XIX в. были объектами пристального внимания государства. До 1990 г. миграционные процессы оказывали существенное влияние на прирост населения региона, проводилась активная государственная политика по привлечению трудовых мигрантов, переселенцев для освоения территории, развития военно-промышленного комплекса, повышения обороноспособности страны, развития транспортной инфраструктуры, кораблестроительной отрасли, рыбной промышленности. Миграционная политика в эти годы основывалась на принципах создания льгот для привлечения и закрепления населения на территории Дальнего Востока России, материального стимулирования и обеспечения более высокого уровня жизни для населения региона.

Радикальные перемены, происходившие в Российской Федерации после распада СССР в 1990-е гг., повлияли существенным образом на миграционные процессы в России и регионах. По данным Росстата за период 1990–2014 гг. численность населения Приморского края сократилась на 355 тыс. чел., в том числе за счет миграционной убыли на 233 тыс. чел. В основном регион покидает экономически активное население. Так, в 2014 г. доля лиц трудоспособного возраста в общем количестве мигрантов, покинувших Приморский край, составила 78,4 %.

Рассмотрим эти процессы более детально на примере Приморского края, прогнозируя межрегиональные миграционные потоки в этом регионе.

Для вычисления величины миграционных потоков будем использовать клеточные автоматы. На начало каждого года за период с 2004 г. по 2014 г. имеются следующие данные, используемые в качестве входных данных в

программный комплекс, созданный для реализации предложенного клеточного автомата:

— численность населения Приморского края, каждого федерального округа, включая Дальневосточный (без Приморского края), стран ближнего зарубежья;

— вектор средних значений по годам вероятностей выезда населения из Приморского края по федеральным округам, дальнему и ближнему зарубежью;

— вектор средних значений по годам вероятностей приезда населения в Приморский край из федеральных округов, дальнего и ближнего зарубежья;

— въездные и выездные межрегиональные миграционные потоки Приморского края по годам.

Для прогнозирования численности родившихся и умерших в Приморском крае были выделены факторы, которые оказывают существенное влияние на исследуемые процессы. Анализ уровня влияния факторов на процессы проводился с помощью корреляционных матриц. С целью уменьшения количества используемых в моделях переменных и негативного влияния явления мультиколлинеарности использовались процедуры факторного анализа.

Для исследования демографических процессов в Приморском крае, использовались следующие показатели, вычисленные по статистическим данным за период с 1999 г. по 2014 г.: X_1 — ВРП на душу населения, в ценах 1999 г., тыс. руб.; X_2 — численность безработных, в % к активному населению; X_3 — среднегодовая численность занятых в экономике, в % к численности населения края; X_4 — выбросы вредных веществ в атмосферу, на 10 тыс. человек, т; X_5 — сброс загрязненных сточных вод на 100 тыс. человек, млн m^3 ; X_6 — численность населения края, тыс. чел.; X_7 — среднемесячная заработная плата работающего, к величине прожиточного минимума, %; X_8 — количество личных автомобилей, на 1000 человек населения края; X_9 — затраты на покупку товаров и оплату услуг, в % от доходов; X_{10} — количество коек в больничных учреждениях, на 10 тыс. населения региона; X_{11} — общая заболеваемость жителей, на 1000 человек населения, ед.; X_{12} — число детей в дошкольных учреждениях, на 10 тыс. чел. населения региона; X_{13} — численность населения с денежными доходами ниже величины прожиточного минимума, в процентах к общей численности населения; X_{14} — доля лиц, совершивших преступления, в % к населению региона; X_{15} — жилищный фонд всего, m^2 /чел.;

Таблица 1

Факторные нагрузки в модели рождаемости

Используемый показатель	Факторные нагрузки (factor loadings)	
	Фактор 1	Фактор 2
X_1	0,8297	0,5245
X_2	−0,1346	−0,9309
X_3	0,4680	0,7779
X_7	0,8430	0,4992
X_8	0,9444	0,2570
X_9	−0,4020	−0,6367
X_{12}	0,8899	0,4373
X_{15}	0,7607	0,6252
X_{16}	0,8019	0,5543
X_{17}	−0,9530	−0,1635
Процент описательной дисперсии	56,11	33,83
Накопленный процент	56,11	89,94

Источник: рассчитано авторами.

X_{16} — цены на вторичном рынке жилья, в ценах 1999 г., тыс. руб./ m^2 ; X_{17} — количество женщин в регионе в возрасте 15–34 лет, тыс. чел.; X_{18} — количество пожилых людей в регионе, тыс. чел.

При исследовании исходных показателей в модели прогнозирования количества родившихся в регионе с помощью критерия «каменистой осыпи» (*scree plot*) и критерия *Kaiser* были выделены два наиболее значимых фактора, описывающие 89,9 % дисперсии. Для получения более интерпретируемых объяснений этих факторов было произведено варимакс вращение. Результаты вычислений представлены в таблице 1.

Первый фактор имеет высокую корреляцию с показателями ВРП на душу населения (X_1), среднемесячной заработной платой работающего (X_7), обеспеченностью населения личными автомобилями (X_8), числом детей в дошкольных учреждениях (X_{12}), показателем жилищного фонда (X_{15}), ценами на вторичном рынке жилья (X_{16}) и высокую отрицательную корреляцию с количеством женщин в возрасте 15–34 лет (X_{17}). Данный фактор может быть интерпретирован как уровень жизни населения в условиях дефицита женщин фертильного возраста.

Второй фактор имеет высокую отрицательную корреляцию с численностью безработных (X_2) и покупкой товаров и оплатой услуг, в % от доходов (X_9) и положительную корреляцию с численностью занятых в экономике (X_3) показателем жилищного фонда (X_{15}). Этот фактор можно интерпретировать как уровень занятости и сбережений населения.

Таблица 2

Факторные нагрузки в модели смертности

Используемый показатель	Факторные нагрузки (factor loadings)	
	Фактор 1	Фактор 2
X_4	0,766748	0,202602
X_5	0,737625	0,458627
X_6	0,829023	0,407396
X_7	-0,918421	-0,265103
X_8	-0,964387	0,023189
X_9	0,522806	0,775728
X_{10}	-0,075801	0,940870
X_{11}	-0,669968	-0,455630
X_{13}	0,792080	0,550741
X_{14}	0,654524	0,534373
X_{16}	-0,907669	-0,307250
X_{18}	-0,983121	-0,054992
Собственные значения	7,429696	2,869061
Процент описательной дисперсии	59,7244	23,9088
Накопленный процент	59,7244	83,6332

Источник: рассчитано авторами.

Поскольку процесс рождения имеет временной шаг запаздывания около одного года, вводим временной лаг при построении регрессионного уравнения. Реализовав вычислительные процедуры множественной регрессии, получим:

$$R_t = 13,4745 - 0,1258 \times FR1_{t-1} + 0,2663 \times FR2_{t-1},$$

(10,3077) (-2,6110) (3,6828)

где R_t — число родившихся в год t ; $FR1_t$ — уровень жизни населения в условиях дефицита женщин фертильного возраста в год t ; $FR2_t$ — уровень занятости и сбережений населения в год t , значения в скобках — величина t -статистики рассчитанных коэффициентов. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,89$. F -критерий Фишера равен 48,58. Таким образом, уравнение регрессии статистически значимо при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Для прогнозирования значений факторов $FR1_t$ и $FR2_t$ использовался полиномиальный тренд.

Аналогично был проведен факторный анализ показателей, характеризующих смертность населения Приморского края (табл. 2).

Уравнение множественной регрессии для определения количества умерших D_t в году t имеет следующий вид:

$$D_t = 32,9474 + 0,0115 \times FD1_t - 0,0246 \times FD2_{t0},$$

(8,8710) (4,2459) (-2,7328)

где $FD1_t$ — уровень жизни и экологии в регионе в год t ; $FD2_t$ — уровень экономической и криминальной безопасности жизни в регионе в год t , значения в скобках — величина t -статистики рассчитанных коэффициентов. Коэффициент детерминации $R^2 = 0,731$. F -критерий Фишера

Таблица 3

Фактические и расчетные значения рождаемости и смертности в Приморском крае, тыс. чел.

Год	Рождаемость			Смертность		
	Расчетное значение	Фактическое значение	Ошибка, %	Расчетное значение	Фактическое значение	Ошибка, %
1999	—	17,525	—	28,131	28,007	0,44
2000	18,964	18,393	3,11	29,874	29,513	1,22
2001	19,631	19,656	0,12	31,748	29,714	6,85
2002	20,455	20,816	1,73	31,406	30,858	1,78
2003	20,582	21,531	4,41	31,229	32,023	2,48
2004	21,101	21,598	2,30	30,378	32,112	5,40
2005	21,421	21,174	1,17	30,078	32,812	8,33
2006	21,764	20,935	3,96	29,892	30,052	0,53
2007	22,502	22,455	0,21	29,405	29,12	0,98
2008	23,207	22,602	2,68	29,183	28,944	0,44
2009	23,299	23,469	3,11	28,840	27,458	5,03
2010	23,281	23,164	0,50	28,294	27,974	1,15
2011	23,646	23,377	1,15	27,974	27,522	1,64
2012	24,505	24,627	0,50	26,616	26,743	0,48
2013	24,052	24,614	2,28	26,041	26,222	0,69
2014	23,027	24,693	6,75	25,938	25,953	0,06
2015	23,078	—	—	25,913	—	—
2016	23,076	—	—	26,001	—	—

Источник: фактическое значение — Центральная база статистических данных (ЦБСД) Федеральной службы государственной статистики РФ (<http://cbsd.gks.ru>); расчетное значение — рассчитано авторами.

Таблица 4

Фактический и расчетный миграционные потоки из Приморского края в 2014 г., чел.

Регион	Расчетное значение	Фактическое значение	Ошибка, %
Центральный ФО	2596	2581	0,58
Северо-Западный ФО	2219	2188	1,42
Южный и Северо-Кавказский ФО	2019	2046	1,32
Приволжский ФО	864	895	3,46
Уральский ФО	352	343	2,62
Сибирский ФО	1383	1359	1,77
Дальневосточный ФО (без ПК)	2762	2846	2,95
Дальнее зарубежье	216	190	13,6
Ближнее зарубежье	90	83	8,43
Выехавшие мигранты	12501	12531	0,24
Прибывшие мигранты	6860	6967	1,54

Источник: фактическое значение — Миграция населения Приморского края в 2015 году. Стат. бюл. / Приморскстат, 2016. 81 с.; расчетное значение — рассчитано авторами.

равен 17,648. Таким образом, уравнение регрессии статистически значимо при уровне значимости $\alpha = 0,05$.

Расчетные значения рождаемости и смертности в Приморском крае представлены в таблице 3.

В процессе экспериментов проводились расчеты по настройке клеточного автомата по годам с 2005 г. по 2014 г. Количество итераций клеточного автомата для моделирования миграционного потока одного года изменялось в пределах от 67 до 84. При этом критерием определения количества итераций клеточного автомата при моделировании миграции за соответствующий год являлась наименьшая ошибка модельного и реального числа выехавших за пределы Приморского края мигрантов. Ошибка по количеству выехавших за пределы Приморского края мигрантов в год составляла от 0,01 % до 0,60 %, по прибывшим мигрантам в край — от 1,54 % до 8,48 %.

Для иллюстрации вышеизложенного приведем данные по расчету миграционных потоков из Приморского края за 2014 г. Полученные для этого года результаты являются достаточно типичными. Проведено 74 итерации клеточного автомата, рассчитанное общее число выехавших из края составило — 12501 чел., фактически за этот год выехало — 12531 человек, ошибка — 0,24 %. В таблице 4 представлен фактический и расчетный миграционный поток из Приморского края в 2014 г.

Для моделирования миграционных потоков клеточным автоматом разработана кроссплатформенная программа на языке Go. Вычисления производились на компьютере с 4-ядерным процессором Intel Core i7 с тактовой частотой 2,5 ГГц и 16 ГБ оперативной памяти. Количество вычислений, проведенных в ходе экспериментов и прогнозных расчетов, достаточно велико. В среднем расчеты по разработанной модели для одного года занимали

Таблица 5

Прогнозные значения миграционного потока из Приморского края, чел.

Регион	2015	2016	2017
Центральный ФО	2669	2648	2840
Северо-Западный ФО	1723	1753	1621
Южный и Северо-Кавказский ФО	1605	1761	1557
Приволжский ФО	996	987	996
Уральский ФО	489	435	408
Сибирский ФО	1764	1689	1809
Дальневосточный ФО (без ПК)	3135	3303	3156
Дальнее зарубежье	165	154	184
Ближнее зарубежье	215	314	293
Выехавшие мигранты	12 903	13 044	12 864
Прибывшие мигранты	8 520	8 210	8 680
Численность населения ПК, на начало года	1 931 676	1 924 456	1 916 467
Численность населения ПК, на конец года	1 924 456	1 916 467	1 908 629

Источник: рассчитано авторами.

около 7 минут. В данном исследовании проводился среднесрочный прогноз межрегиональных миграционных потоков из Приморского края на три года. В качестве базового года для прогноза выступал 2014 г., количество итераций клеточного автомата для прогнозирования миграционных потоков из региона за один год составляло 72, полученное среднее значение за период настройки автомата. Результаты прогноза представлены в таблице 5.

Прогнозируемое количество мигрантов, выехавших из Приморского края на постоянное место жительства в другие регионы, достаточно хорошо согласуется с имеющими фактическими данными за 2015 г.

Заключение

Проведенное исследование показывает возможность и целесообразность моделирова-

ния межрегиональных миграционных потоков клеточными автоматами. Весьма перспективным направлением исследований является моделирование макроэкономических миграционных процессов на основе моделирования клеточными автоматами поведения домашних хозяйств на локальном уровне. Для расширения возможностей разработанного клеточного автомата при среднесрочном и долгосрочном прогнозировании межрегиональных миграционных потоков целесообразно, с нашей точки зрения, прогнозирование процессов рождаемости и смертности населения также проводить клеточными автоматами. Это позволит создать достаточно универсальную модель для прогнозирования миграционных потоков, легко настраиваемую под условия разных территорий.

Благодарность

Статья подготовлена при поддержке гранта РФФИ № 15-56-53032.

Список источников

1. Andrienko Y., Guriev S. Determinants of interregional mobility in Russia. Evidence from panel data // *Economics of Transition*. — 2004. — Vol. 12(1). — Pp. 1–27.
2. Gerber T. Regional economic performance and net migration rates in Russia, 1993–2002 // *International Migration Review*. — 2006. — Vol. 40(3). — Pp. 661–697. doi: 10.1111/j.1747-7379.2006.00037.x.
3. Вакуленко Е. С., Мкртчян Н. В., Фурманов К. К. Моделирование регистрируемых миграционных потоков между регионами Российской Федерации // *Прикладная эконометрика*. — 2010. — № 1(21). — С. 35–55.
4. Прогнозирование спроса и предложения на региональном рынке труда / Под ред. Ю. Д. Шмидта. — Владивосток : ДВФУ, 2012. — 320 с.
5. Васильев А. М. Модель самоорганизации рынка труда // *Экономика и математические методы*. — 2001. — Т. 37. — № 2. — С. 123–127.
6. Коровкин А. Г. Динамика занятости и рынка труда. Вопросы макроэкономического анализа и прогнозирования. — М. : МАКС Пресс, 2001. — 317 с.
7. Blumen I., Kogan M., McCarthy P. The Industrial Mobility of Labor as a Probability Process, *Cornell Studies of Industrial and Labor Relations*. Vol. 6, Ithaca. — N.Y.: Cornell University Press, 1955. — 163 p.
8. Brown A. The economic determinants of internal migration flows in Russia during transition // *William Davidson Institute Working Papers*, 1997. — 89 p.
9. Sarra A. L., Signore M. A Dynamic Origin-constrained Spatial Interaction Model Applied to Poland's Inter-provincial Migration // *Spatial Economic Analysis*. — 2010. — Vol. 5(1). — Pp. 29–41. doi: 10.1080/17421770903511361.
10. Silaghi M., Ghatak S. Why do they move from rural to urban areas? Inter-regional migration in Romania // *Romanian Journal of Economic Forecasting*. — 2011. — Vol. 1. — Pp. 143–158.
11. Тоффоли Т., Марголуз Н. Машины клеточных автоматов / Пер. с англ. П. А. Власова и Н. В. Барабанова; под ред. Б. В. Баталова. — М.: Мир, 1991. — 280 с.
12. Wolfram S. A New Kind of Science. 2002 [Electronic resource]. URL: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>. (date of accesse 25.04. 2016).
13. Лобанов А. И. Модели клеточных автоматов // *Компьютерные исследования и моделирование*. — 2010. — Т. 2. — № 3. — С. 273–293.
14. Шмидт Ю. Д., Лободина О. Н. О некоторых подходах к моделированию пространственной диффузии инноваций // *Пространственная экономика*. — 2015. — № 2. — С. 103–115. doi: 10.14530/se.2015.2.103–115.
15. Cheng J., Masser I. Cellular Automata Based Temporal Process Understanding of Urban Growth // *Lecture Notes in Computer Science*. — 2002. — Vol. 2493. — Pp. 325–336.
16. Benito-Ostolaza J. M., Hernández P., Palacios-Marqués D., Vila J. Modeling local social migrations: A cellular automata approach // *Cybernetics and Systems*. — 2015. — Vol. 46 (3–4). — Pp. 287–302. doi: 10.1080/01969722.2015.1012898.
17. Dabbaghian V., Jackson P., Spicer V., Wuschke K. A cellular automata model on residential migration in response to neighborhood social dynamics // *Mathematical and Computer Modelling*. — 2010. — Vol. 52 (9–10). — Pp. 1752–1762. <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2010.07.002>.

Информация об авторах

Шмидт Юрий Давыдович — доктор экономических наук, профессор, заведующий кафедрой бизнес-информатики и экономико-математических методов, Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; e-mail: syd@dvfu.ru).

Ивашина Наталья Викторовна — кандидат экономических наук, доцент кафедры бизнес-информатики и экономико-математических методов, Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; e-mail: ivashina.nv@dvfu.ru).

Лободин Павел Николаевич — аспирант, Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; e-mail: lobodin@me.com).

Кухлевский Алексей Леонидович — аспирант, Дальневосточный федеральный университет (Российская Федерация, 690950, г. Владивосток, ул. Суханова, д. 8; e-mail: kafedra1352@gmail.com).

For citation: Shmidt, Yu. D., Ivashina, N. V., Lobodin, P. N. & Kukhlevsky, A. L. (2017). Forecasting of Interregional Migration Flows. *Ekonomika regiona [Economy of region]*, 13(1), 126-136.

Yu. D. Shmidt, N. V. Ivashina, P. N. Lobodin, A. L. Kukhlevsky

Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russian Federation; e-mail: syd@dvfu.ru).

Forecasting of Interregional Migration Flows

The article explores the problem of interregional migration flows modelling. As a rule, the existing models of interregional migration flows use the aggregated data and do not take into consideration the fact that a decision to relocate is formed and taken at the micro-level, at the level of households. The purpose of the present research is to develop the forecasting method for interregional migration flows of the region taking into consideration the behaviour of households at the micro-level. The research tests the hypothesis that the modelling of household behaviours at the local level as regards taking a decision to relocate to other regions, which takes into account the existing interactions with relatives and other communities, allows to obtain adequate forecasts of interregional migration flows. To forecast the interregional migration flows of the region, we develop a methodological approach and software solution, based on cellular automaton model modification proposed in the current work and on econometric models of birth and death processes, which have been tested on the Primorsky Krai data. The authors' model of the cellular automaton is a kind of the combined probabilistic cellular automaton in which the condition of each cell changes depending on a condition of four closest neighbours (von Neumann vicinity) and four cells chosen in a random way. The article builds a mid-term forecast of Primorsky Krai interregional migration flows. The research demonstrates the possibility and reasonability of modelling the interregional migration flows by cellular automata. The highly perspective direction of the research is the modelling of other macroeconomic processes based on modelling by cellular automata of a behaviour of households, companies and other economic entities at the local level.

Keywords: forecast, migration, interregional flow, cellular automaton, regions, methodological approach, software solution, Primorsky Krai

Acknowledgements

The article has been prepared with the support of the Russian Foundation for Basic Research № 15-56-53032.

References

1. Andrienko, Y. & Guriev, S. (2004). Determinants of interregional mobility in Russia. Evidence from panel data. *Economics of Transition*, 12(1), 1-27.
2. Gerber, T. (2006). Regional economic performance and net migration rates in Russia, 1993-2002. *International Migration Review*, 40(3), 661-697. DOI: 10.1111/j.1747-7379.2006.00037.x.
3. Vakulenko, E. S., Mkrtchian, N. V. & Furmanov, K. K. (2010). Modelirovanie registriruemyykh migratsionnykh potokov mezhdru regionami Rossiyskoy Federatsii. In Russian [Modelling of traceable migration flows between the regions of the Russian Federation]. *Prikladnaya ekonometrika [Applied econometrics]*, 1(21), 35-55.
4. Shmidt, Yu. D. (2012). *Prognostirovaniye sprosa i predlozheniya na regionalnom rynke truda. In Russian [Forecasting of offer and demand at the regional labour market]*. Vladivostok: DVFU Publ., 320.
5. Vasilyev, A. M. (2001). Model samoorganizatsii ryinka truda. In Russian [Model of labour market self-organization]. *Ekonomika i matematicheskie metody [Economics and mathematical methods]*, 37(2), 123-127.
6. Korovkin, A. G. (2001). *Dinamika zanyatosti i ryinka truda: voprosy makroekonomicheskogo analiza i prognozirovaniya [Dynamics of employment and labour market: issues of mathematical analysis and forecast]*. Moscow: MAKSPress Publ., 317.
7. Blumen, I., Kogan, M. & McCarthy, P. (1955). The Industrial Mobility of Labor as a Probability Process. *Cornell Studies of Industrial and Labor Relations*, vol. 6, Ithaca, N.Y.: Cornell University Press, 163.
8. Brown, A. (1997). The economic determinants of internal migration flows in Russia during transition. *William Davidson Institute Working Papers*, 89.
9. Sarra, A. L. & Signore, M. (2010). A Dynamic Origin-constrained Spatial Interaction Model Applied to Poland's Inter-provincial Migration. *Spatial Economic Analysis*, 5(1), 29-41. DOI: 10.1080/17421770903511361.

10. Silaghi, M. & Ghatak, S. (2011). Why do they move from rural to urban areas? Inter-regional migration in Romania. *Romanian Journal of Economic Forecasting*, 1, 143–158.
11. Toffoli T. & Margolus N. (1991). *Mashiny kletochnykh avtomatov*. In Russian [Cellular automata machines]. Trans. from English by P. A. Vlasov and N. V. Barabanov. In: B. V. Batalov (Ed.). Moscow: Mir Publ., 280.
12. Wolfram, S. (2002). *A New Kind of Science*. Retrieved from: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html>. (date of access 25.04. 2016).
13. Lobanov, A. I. (2010). Modeli kletochnykh avtomatov. In Russian [Cellular automata models]. *Kompyuternyye issledovaniya i modelirovanie* [Computer research and modeling], 2(3), 273–293.
14. Shmidt, Yu. D. & Lobodina, O. N. (2015). O nekotorykh podkhodakh k modelirovaniyu prostranstvennoy diffuzii innovatsiy. In Russian [Upon some approaches to modeling of innovations spatial diffusion]. *Prostranstvennaya Ekonomika* [Spatial Economics], 2, 103–115. DOI: 10.14530/se.2015.2.103–115.
15. Cheng, J. & Masser, I. (2002). Cellular Automata Based Temporal Process Understanding of Urban Growth. *Lecture Notes in Computer Science*, 2493, 325–336. DOI: 10.1080/01969722.2015.1012898.
16. Benito-Ostolaza, J. M., Hernández, P., Palacios-Marqués, D. & Vila, J. (2015). Modeling local social migrations: A cellular automata approach. *Cybernetics and Systems*, 46(3–4), 287–302.
17. Dabbaghian, V., Jackson, P., Spicer, V. & Wuschke, K. (2010). *A cellular automata model on residential migration in response to neighborhood social dynamics*. *Mathematical and Computer Modelling*, 52 (9–10), 1752–1762. Retrieved from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mcm.2010.07.002>

Authors

Yuriy Davydovich Shmidt — Doctor of Economics, Professor, Head of Department of Business Informatics and Economical and Mathematical Methods, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russian Federation; e-mail: syd@dvfu.ru).

Natalya Viktorovna Ivashina — PhD in Economics, Associate Professor, Department of Business Informatics and Economical and Mathematical Methods, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russian Federation; e-mail: ivashina.nv@dvfu.ru).

Pavel Nikolaevich Lobodin — PhD Student, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russian Federation; e-mail: lobodin@me.com).

Aleksey Leonidovich Kukhlevsky — PhD Student, Far Eastern Federal University (8, Sukhanova St., Vladivostok, 690950, Russian Federation; e-mail: kafedra1352@gmail.com).