

УДК 332.14

## О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К МОДЕЛИРОВАНИЮ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ДИФфуЗИИ ИННОВАЦИЙ

Ю.Д. Шмидт, О.Н. Лободина

*Шмидт Юрий Давыдович* — доктор экономических наук, руководитель Приморской лаборатории экономики и глобальных проблем. Институт экономических исследований ДВО РАН, ул. Тихоокеанская, 153, Хабаровск, Россия, 680042. Заведующий кафедрой бизнес-информатики и экономико-математических методов. Дальневосточный государственный университет, ул. Суханова, 8, Владивосток, Россия, 690091. E-mail: syd@dvfu.ru.

*Лободина Ольга Николаевна* — аспирантка. Дальневосточный государственный университет, ул. Суханова, 8, Владивосток, Россия, 690091. E-mail: relloudder@gmail.com.

Рассматриваются проблемы моделирования распространения инноваций в экономических системах. Показываются возможности и ограничения применения детерминированных и вероятностных клеточных автоматов при моделировании диффузии инноваций. Для преодоления ограничений модели вероятностного клеточного автомата предлагается ее модификация. Построен клеточный автомат, который реализует два различных типа автомата по способу выбора множества соседних клеток (классический и комбинированный) и по способу изменения состояния клетки. Этот автомат позволяет моделировать различные виды диффузии инноваций и поддерживает несколько режимов работы: с учетом отсутствия или непроницаемости границ, однородности или неоднородности территории.

*Диффузия инноваций, моделирование, клеточные автоматы, модификация, вероятностный и комбинированный клеточный автомат.*

DOI: 10.14530/se.2015.2.103-115

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы значительно увеличилось количество научных публикаций, посвященных различным аспектам инновационного развития страны, включая вопросы оценки уровня инновационного развития регионов и распространения инноваций [2; 7; 12]. Анализ инновационных процессов, форм и методов государственной поддержки и стимулирования инноваций, изучение

механизмов распространения инноваций в пространстве являются востребованными направлениями экономических теоретических и практических исследований. Однако целостная научная теория региональных инновационных систем, взаимоувязывающая инновации и пространственное развитие, еще не сформирована [7], слабо разработаны вопросы моделирования инноваций, учитывающие особенности распространения инноваций в пространстве.

Детальное обоснование возможности математического моделирования инновационных процессов на основе теории автономных динамических систем и комплекс математических нелинейных моделей динамики инноваций в рамках линейной и нелинейной концепции инноваций, записанных в терминах уравнений популяционной динамики, приведены в работах [1; 5; 8]. Для анализа взаимодействий участников инновационных процессов успешно используются теоретико-игровые модели, основанные в большинстве случаев на традиционных моделях теории игр, включая классическую игру Штакельберга («лидер-последователь») [4].

Модели системной динамики позволяют получить более глубокое понимание реальной системы и того, как она реагирует на внешние воздействия. Так как инновационные процессы по своей природе являются динамическими, модели системной динамики позволяют выявить системные и динамические сценарии взаимодействия между участниками и подсистемами инновационного процесса. Взаимодействие и влияние науки и технологий на региональные инновационные системы исследуются в работах [17; 18; 20], влияние свойств и характеристик пространственных экономических систем на создание и внедрение инноваций – в работах [16; 22].

Для исследования диффузии инноваций в социально-экономических системах успешно применяются клеточные автоматы [14; 15; 21]. Диффузия инноваций определяется как процесс, посредством которого инновации «передаются через определенные каналы с течением времени среди членов социальной системы» [21].

Теория клеточных автоматов имеет сравнительно небольшую, но достаточно продуктивную историю, основные этапы которой детально изложены в работе [11], в которой особое внимание уделено фундаментальным свойствам клеточных автоматов: параллельности и локальности.

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 состояни-

ем решетки. В модели клеточного автомата каждое состояние решетки соответствует некоторому моменту времени, которое изменяется дискретно 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. В математическом виде это можно записать следующей формулой:

$$a(i, t + 1) = F(a(i, t), \sum_{j \in T} a(j, t)), \quad (1)$$

где  $F$  — функция, характеризующая соответствующее правило,  $T$  — множество номеров клеток, влияющих на состояние клетки  $i$  в период времени  $t+1$ .

Теоретически клеточные автоматы могут иметь любую размерность, однако чаще всего рассматривают одномерные и двумерные клеточные автоматы. В случае двумерного клеточного автомата решетка реализуется двумерным массивом и каждая клетка нумеруется упорядоченной парой чисел  $(a, b)$ . В этом случае у каждой клетки ближайшими соседями считаются либо клетки, имеющие с исходной общую сторону (окрестность фон Неймана), таких клеток будет 4, либо имеющие с исходной общую вершину (окрестность Мура), таких клеток будет 8.

Классическая модель клеточного автомата имеет следующие свойства:

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

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, которое позволяет их успешно использовать для моделирования систем, в которых значительную роль играют пространственные взаимодействия между элементами. Они хорошо зарекомендовали себя при моделировании динамики жидкости и газа в различных средах, в пограничных зонах, при моделировании систем, состоящих из большого числа частиц, взаимодействующих друг с другом нелинейно, при описании возникновения коллективных

явлений — турбулентности, упорядочения, хаоса, нарушения симметрии, фрактальности и других.

В последние годы клеточные автоматы находят свое применение при моделировании социальных явлений как чисто теоретические модели для качественного анализа процессов, так и для численного прогнозирования. Некоторые примеры клеточных автоматов, применяемых в задачах социологии, приведены в работе [9].

Результаты фундаментальных исследований в области клеточных автоматов представлены в работе [23], в которой сделан акцент на возможности использования клеточных автоматов при моделировании физических, биологических и вычислительных систем, в силу простоты реализации моделей, точности математических вычислений и способности моделей к моделированию сложных систем.

В целом у моделей клеточных автоматов достаточно много положительных качеств, которые, несомненно, влияют на активность их использования в различных областях науки. Однако есть и определенные негативные моменты, сдерживающие развитие этого направления математического моделирования, среди которых следует отметить слабую общую теоретическую базу клеточных автоматов, недостаточную разработку вопросов сходимости вычислительных экспериментов, вопросов устойчивости полученных численных решений.

В настоящее время существует достаточно много различных классификаций клеточных автоматов, из которых наиболее известна классификация Вольфрама, основанная на анализе возможной сложности поведения клеточного автомата. Классифицировать клеточные автоматы можно по разным признакам, в частности, по правилам изменения состояния клеток можно разделить автоматы на детерминированные и вероятностные. В детерминированных клеточных автоматах состояние каждой клетки в момент времени  $t + 1$  определяется однозначно состоянием этой клетки и ее ближайших соседей в момент времени  $t$ . Соответствующее правило имеет вид формулы (1).

Клеточный автомат, в котором состояние клеток в последующий момент времени определяется на основе некоторых вероятностей, называется вероятностным клеточным автоматом. В этом случае правило перехода состояния  $a(i, t)$  клетки  $i$  в состояние  $a(i, t + 1)$  можно представить в следующем виде:

$$W = W(a(i, t + 1) \mid (a(i, t), \sum_{j \in T} a(j, t))), \quad (2)$$

где  $W$  — вероятность перехода  $i$ -й клетки,  $T$  — множество номеров клеток ближайших соседей.

Вероятностный клеточный автомат, описывающий диффузию инноваций, представлен в работе [6]. Каждой клетке соответствует агент, который

может принять инновацию. Клетка может находиться в двух состояниях:  $S_1$  — новинка принята,  $S_0$  — новинка не принята, состояние  $S_1$  не может быть изменено. Автомат принимает или не принимает новинку, ориентируясь на мнение восьми или четырех ближайших соседей в окрестности данной клетки (окрестность Мура или Неймана). В зависимости от количества  $n$  приверженцев новинки существует пороговая функция  $P(n)$  — вероятность ее принятия. Для каждой клетки автомата на каждом шаге (такте) генерируется случайное число  $x$ , определяется количество соседей  $n$ , принявших инновацию, проверяется неравенство  $x < P(n)$ , если оно выполняется, клетка принимает инновацию, то есть переходит в состояние  $S_1$ .

Подобный автомат может быть использован для моделирования диффузии локальных инноваций в рамках одного города или района. Вероятностный клеточный автомат хорошо моделирует диффузию инноваций для сетевого маркетинга.

Однако в масштабах целого региона или страны его применять нецелесообразно по ряду причин. Во-первых, существуют различные типы инноваций по области применения: технологические, организационно-управленческие, экономические, информационные и т. д. Для распространения многих из них нет необходимости непосредственного общения между агентами: информацию и технологию, например, можно передать через Интернет или другими средствами коммуникации. Во-вторых, экономическое пространство нельзя считать однородным как по численности населения, так и по восприимчивости к инновационному продукту. В-третьих, для устранения краевых эффектов сетка вероятностного клеточного автомата топологически «сворачивается в тор», т. е. первая строка считается продолжением последней, а последняя — предшествующей первой. Аналогично поступают и со столбцами. Предполагается, что инновации свободно распространяются за границы рассматриваемой территории и возвращаются оттуда. При использовании реальной топографии местности такое предположение нереалистично: диффузия невозможна.

## МОДИФИКАЦИИ МОДЕЛИ КЛЕТОЧНОГО АВТОМАТА

Для учета особенностей распространения различных типов инноваций по территории Российской Федерации рассмотрим несколько модификаций клеточных автоматов по способу изменения состояния клетки и формированию множества клеток, состояние которых при этом учитывается.

В современных условиях повлиять на решение о принятии или непринятии инноваций могут не ближайшие соседи, а произвольно расположенные в пространстве агенты. Для моделирования этой ситуации может быть использован клеточный автомат, в котором при определении состояния каждой

клетки учитывается состояния восьми или четырех клеток на сетке, выбранных случайным образом.

Однако более реалистичной является модель, когда при принятии решения учитывается мнение и ближайших соседей, и удаленных агентов. Для этого можно реализовать клеточный автомат, назовем его *комбинированным*, в котором состояние каждой клетки меняется в зависимости от состояния четырех ближайших соседей (окрестность фон Неймана) и четырех клеток, выбранных случайным образом.

В работе [13] обосновано, что показатель «Объем инновационных товаров, работ и услуг, млн руб.» характеризует инновационную активность региона и существенно влияет на уровень его экономического развития. Для учета в модели *неоднородности территории* страны, как по численности, так и по восприимчивости к инновациям, воспользуемся моделью энтропийной декомпозиции [10]. Каждый регион на сетке автомата имеет достаточно мелкое деление территории: занимает от 1 до 150 клеток. Для каждой клетки известна плотность проживающего на этой территории населения, а значит и численность населения в каждой клетке. Необходимо «распределить» значения показателя «Объем инновационных товаров, работ, услуг, млн руб.» по территории региона в зависимости от того, сколько человек проживает на территории, соответствующей данной клетке автомата.

Задача энтропийной декомпозиции для  $k$ -го региона, включающего  $M_k$  клеток, имеет следующий вид:

$$H_k(X_k) = -\sum_{j=1}^{M_k} x_{kj} \ln(x_{kj}) \rightarrow \max, \quad (3)$$

$$\sum_{j=1}^{M_k} x_{kj} = D_k, \quad \sum_{j=1}^{M_k} x_{kj} d_{kj} = Q_{kk}, \quad (4)$$

где  $x_{kj}$  — значение показателя для  $j$ -й клетки  $k$ -го региона,  $d_{kj}$  — численность населения в той же клетке,  $D_k$  — значение показателя «Объем инновационных товаров, работ и услуг, млн руб.» для  $k$ -го региона,  $Q_{kk}$  — экзогенный параметр модели.

Это задача нелинейной условной оптимизации, для ее решения воспользуемся математическим пакетом Wolfram Mathematica. Численность населения для каждой клетки автомата (тыс. чел.) получим, импортировав соответствующие данные о плотности населения из системы ArcView GIS и умножая ее на площадь территории, соответствующей данной клетке автомата.

Решив задачу (3–4) для каждого региона, получим значение показателя «Объем инновационных товаров, работ и услуг, млн руб.» для каждой клетки автомата.

В литературе представлен большой набор функций, описывающих пороговые значения  $P(n)$  для вероятностных клеточных автоматов [6; 19]. Исследования показали, что для моделирования инноваций для однородной территории больше всего подходит функция, соответствующая простейшему нормальному закону с параметрами  $m = 0$ ,  $\sigma = 1$ . Это вполне согласуется с центральной предельной теоремой теории вероятностей: 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 [3]. Используем это правило для построения пороговых значений для модифицированного клеточного автомата (5):

$$P(n) = P\left(-3\sigma \leq X \leq -3\sigma + \frac{3}{4}\sigma n\right) = \Phi\left(-3 + \frac{3}{4}n\right) + \Phi(3), \quad (5)$$

где  $n$  — число клеток в состоянии  $S_1$  из окрестности текущей клетки (окрестность определяется в зависимости от типа клеточного автомата),  $\sigma$  — среднее квадратичное отклонение,  $\Phi(x)$  — функция Лапласа.

Чтобы учесть устаревание нововведения, увеличим пороговые значения на некоторый весовой коэффициент на каждом шаге работы автомата:

$$P_t(n) = P(n) + w(t), \quad w(t) = (P(n+1) - P(n)) \cdot \frac{C(t-1)}{M}, \quad (6)$$

где  $P_t(n)$  — пороговые значения клеточного автомата в момент времени  $t$  с учетом устаревания нововведений,  $C(t)$  — количество клеток, принявших инновации на шаге автомата  $t$ ,  $M$  — общее число потенциальных потребителей инновации,  $w(t)$  — весовой коэффициент в момент времени  $t$ .

Использование пороговых значений клеточного автомата вида (6) предполагает, что все клетки обладают одинаковыми характеристиками (однородная территория). В нашем случае это означает, что инновации по территории страны распространяются с одинаковой скоростью. Однако все регионы Российской Федерации имеют различную инновационную активность<sup>1</sup>. Следовательно, и скорость распространения инноваций различна для разных регионов. Кроме того, население по территории страны распределено неравномерно, даже в пределах одного региона плотность населения различ-

<sup>1</sup> Так, например, в 2013 г. по данным Росстата, показатель «Объем инновационных товаров, работ, услуг» в Москве составил 686 704,6 млн руб., а в Брянской области — всего 6654,9 млн руб.



на. Поэтому целесообразно, кроме моделирования диффузии инноваций для *однородной территории*, учесть возможность моделирования распространения инноваций и для *неоднородной территории*. Это можно сделать, применив более сложную функцию вероятности перехода, которая учитывает *неоднородность территории*, как по численности, так и по восприимчивости к инновациям.

Для модифицированного клеточного автомата, моделирующего диффузию инноваций на неоднородной территории, построим пороговую функцию, в которой учтем восприимчивость территории к инновациям (7):

$$P_{ij}^t(n) = \frac{x_{ij}}{\max_{[k,l] \in G(n)} x_{kl}} \cdot P_t(n), \quad (7)$$

где  $x_{ij}$  — значение показателя «Объем инновационных товаров, работ и услуг, млн руб.» для клетки автомата  $(i, j)$ ,  $P_{ij}^t(n)$  — пороговые значения клетки  $(i, j)$  в момент времени  $t$ ,  $(k, l)$  — координаты клеток окрестности текущей клетки,  $G(n)$  — множество клеток окрестности в состоянии  $S_1$ .

Также при построении клеточного автомата необходимо задать правила его поведения на границах сетки, в данном исследовании предлагается два режима работы автомата.

*Отсутствие границ*, то есть первая строка считается продолжением последней, а последняя — предшествующей первой (то же самое относится и к столбцам). Для этой модели считаем, что инновации свободно распространяются с одинаковой скоростью между регионами страны, выходят за границы Российской Федерации и возвращаются оттуда.

*Непроницаемые границы*, то есть на сетке автомата задаются границы Российской Федерации, считая при этом, что инновации не только не должны распространяться за пределы страны, но и при использовании комбинированного автомата случайные точки будут выбираться только в пределах рассматриваемой территории.

Таким образом, для моделирования диффузии инноваций на территории Российской Федерации построен вероятностный клеточный автомат, который реализует два различных типа автомата по способу выбора множества соседних клеток (классический и комбинированный). Этот автомат должен поддерживать несколько режимов работы: с учетом отсутствия или непроницаемости границ, однородности или неоднородности территории. Всего автомат реализует 8 режимов работы, позволяя моделировать различные виды диффузии инноваций.



## РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Описанный выше клеточный автомат реализован на сетке размером 45 на 80 (значения выбраны только для наглядности, допустимы произвольные размеры поля).

Тестирование автомата осуществлялось по следующей схеме: для каждого режима было проведено минимум 30 запусков автомата с одинаковой начальной точкой (г. Москва), в процессе которых формировались функции зависимости количества клеток  $F_k(t)$ , находящихся в состоянии  $S_1$  (приняли инновацию), от времени  $t$ . Затем для каждого режима строилась функция  $F(t)$  как среднее арифметическое значений  $F_k(t)$ .

В качестве аппроксимирующей кривой для функции  $F(t)$  использовалась следующая логистическая функция  $N(t)$ :

$$N(t) = \frac{M}{1 + \frac{M - N_0}{N_0} e^{-bMt}},$$

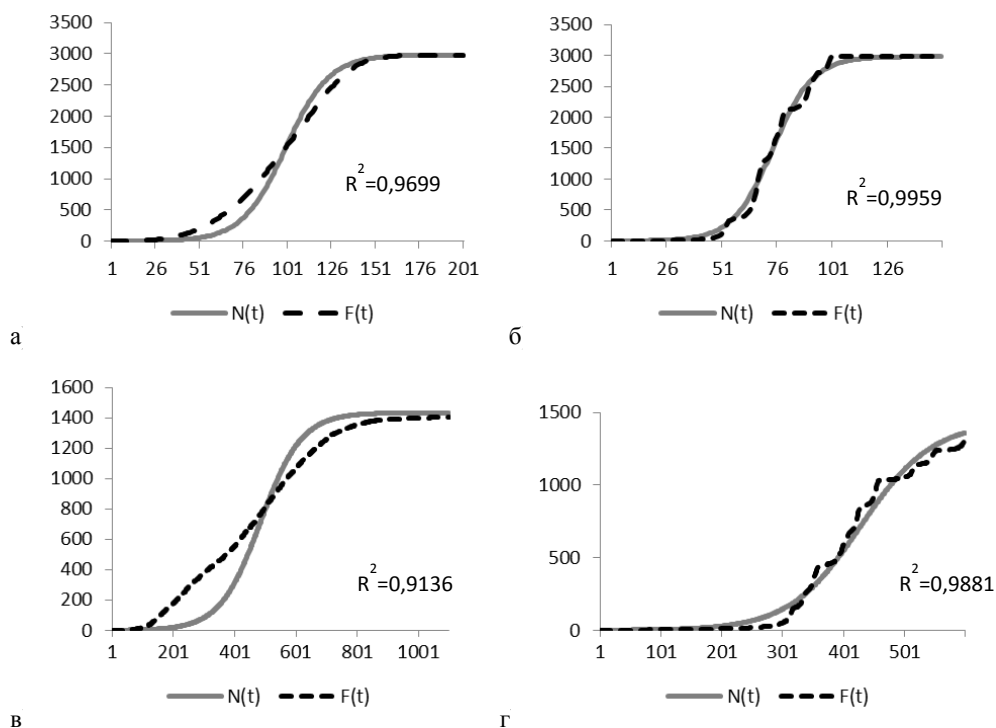
где  $N(t)$  — суммарное число агентов, принявших инновацию, в момент времени  $t$  (число клеток автомата в состоянии  $S_1$ ),  $M$  — общее число потенциальных потребителей инновации,  $N_0$  — количество инноваторов в начальный момент времени (число клеток в состоянии  $S_1$  в начальный момент времени),  $bM$  — скорость распространения инноваций.

Графики работы автомата в различных режимах приведены на рисунке. Выяснилось, что состояние клеточного автомата во всех режимах полностью стабилизируется за ограниченное количество ходов.

Модифицированный клеточный автомат был применен для моделирования распространения покрытия 4G сетями мобильной связи регионов России. Многочисленные эксперименты показали, что для моделирования распространения данного вида инноваций лучше всего подходит комбинированный автомат с учетом неоднородности территории и непроницаемости границ.

## АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для моделирования распространения инноваций, созданных в отдельно взятом городе и ориентированных на локальное внедрение, подходит вероятностный автомат. А для моделирования диффузии инноваций в пространстве подходит комбинированный автомат. Кроме того, некоторые виды инноваций сначала распространяются внутри одного города, а затем начинают внедряться в различных регионах страны (или же наоборот). Для моделирования таких инноваций можно использовать различные типы автоматов на различных этапах диффузии инноваций.



Модели диффузии инновации:  $N(t)$  — логистическая кривая,  $F(t)$  — кривая, полученная автоматом: а — вероятностный, однородная территория, проницаемые границы; б — комбинированный, однородная территория, проницаемые границы; в — вероятностный, неоднородная территория, непроницаемые границы; г — комбинированный, неоднородная территория, непроницаемые границы

В целом же проведенное исследование показывает целесообразность моделирования диффузии инноваций модифицированным клеточным автоматом. Весьма перспективным направлением исследований является моделирование клеточным автоматом макроэкономических процессов на основе моделирования поведения фирм и домашних хозяйств на микроуровне. Этот инструментарий может оказаться весьма полезным для преодоления существующей пропасти между эмпирическими данными и попытками теоретического обоснования протекания макроэкономических процессов и их прогнозирования на основе положений и предпосылок о поведении экономических субъектов на микроуровне. Модели клеточных автоматов позволяют изменить состояние миллионов клеток за предельно короткое время, что можно также использовать при моделировании процессов конкуренции и кооперации, учитывая социально-психологические факторы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Билаль Н.Е. Сулейман. Математическая модель подготовки и динамики научных кадров. // Вестник ТвГУ. Серия Прикладная математика. Вып. 1 (24). 2012. С. 155–163.
2. Бортник И.М., Сенченa Г.И., Михеева Н.Н., Здунов А.А., Кадочников П.А., Со-рокина А.В. Система оценки и мониторинга инновационного развития регионов Рос-сии // Инновации. 2012. № 9 (167). С. 48–61.
3. Гмурман В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика. 9-е изд. М.: Высшая школа, 2003. 479 с.
4. Дубина И.Н. Теоретико-игровые модели организации креативно-инновационной деятельности фирм / науч. ред. Н.М. Оскорбин. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2013. 178 с.
5. Занг В.-Б. Синергетическая экономика. Время и перемены в нелинейной эконо-мической теории. М.: Мир, 1999. 400 с.
6. Лобанов А.И. Модели клеточных автоматов // Компьютерные исследования и моделирование. 2010. Т. 2. № 3. С. 273–293.
7. Михеева Н.Н. Сравнительный анализ инновационных систем российских регионов // Пространственная экономика. 2014. № 4. С. 61–81. DOI: 10.14530/se.2014.4.061-081.
8. Московкин В.М., Билаль Н.Е. Сулейман, Голиков Н.А. Математическая модель взаимодействия результатов различных видов НИОКР // Научно-техническая ин-формация. Сер. 2. Информационные процессы и системы. 2011. № 2. С. 13–17.
9. Плотинский Ю.М. Модели социальных процессов. М.: Логос, 2001. 296 с.
10. Попков Ю.С. Макросистемные модели пространственной экономики. М.: КомКнига, 2008. 240 с.
11. Тоффоли Т., Марголюс Н. Машины клеточных автоматов. М.: Мир, 1991. 280 с.
12. Унтура Г.А., Есикова Т.Н., Зайцев И.Д., Морошкина О.Н. Проблемы и инстру-менты аналитики инновационного развития субъектов РФ // Вестник Новосибир-ского государственного университета. Серия: Социально-экономические науки. 2014. Т. 14. Вып. 1. С. 81–100.
13. Шмидт Ю.Д., Лободина О.Н. Статистическое исследование основных харак-теристик экономического пространства страны // Вестник Тихоокеанского государ-ственного экономического университета. 2013. № 1 (65). С. 22–35.
14. Castellano C., Fortunato S., Lorento V. Statistical Physics of Social Dynamics // Reviews of Modern Physics. 2009. Vol. 81. No. 2. Pp. 591–646. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.591.
15. Gilbert N. Agent-Based Models // SAGE. 2008. Vol. 153. 112 p. DOI: 10.4135/9781412983259.
16. Janszen F.H.A., Degenaars G.H. A Dynamic Analysis of the Relations between the Structure and the Process of National System of Innovation Using Computer Simulation: The Case of the Dutch Biotechnological Sector // Research Policy. 1998. Vol. 27. No. 1. Pp. 37–54. DOI: 10.1016/S0048-7333(98)00023-7.
17. Lee Y.-L. Dynamic Analysis of the National Innovation Systems Model: A Case Study of Taiwan's Integrated Circuit Industry. University of Manchester, 2003.
18. Lee Y.-L., Tunzelmann N. A Dynamic Analytic Approach to National Innovation Systems: The IC Industry in Taiwan // Research Policy. 2005. Vol. 34. No. 4. Pp. 425–440. DOI: 10.1016/j.respol.2005.01.009.
19. Kocsis G., Varga I. Agent Based Simulation of Spreading in Social-Systems of Temporarily Active Actors // Cellular Automata. 2014. Vol. 8751. Pp. 330–338. DOI: 10.1007/978-3-319-11520-7\_34.

20. *Malerba F.* Sectoral Systems: How and why innovation differs across sectors // *The Oxford Handbook of Innovation* / Fagerberg J., Mowery D. (eds.). New York: Oxford University Press, 2005. Pp. 380–406. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199286805.003.0014.

21. *Rogers E.M.* Diffusion of Innovations. 5<sup>th</sup> ed. New York: The Free Press, 2003. 576 p.

22. *Stamboulis Y.* Exploring the System Dynamics of Innovation Systems // *The 2008 International Conference of the System Dynamics Society* (July 20–24, 2008, Athens): Conference Proceedings. URL: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/papers/STAMB454.pdf> (дата обращения: 12.02.2015).

23. *Wolfram S.* A New Kind of Science. 2002. 1197 p. URL: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html> (дата обращения: 23.01.2015).

## SOME APPROACHES TO MODELING THE SPATIAL DIFFUSION OF INNOVATIONS

**Yu.D. Schmidt, O.N. Lobodina**

*Schmidt Yuriy Davidovich* – Doctor of Economics, Head of the Primorye research laboratory for Economics and global issues, Economic Research Institute FEB RAS, 153, Tikhookeanskaya Street, Khabarovsk, Russia, 680042. Head of Department of Business Informatics and Economic and Mathematical Methods, Far Eastern State University, 8, Sukhanova Street, Vladivostok, Russia, 690091. E-mail: syd@dvfu.ru.

*Lobodina Olga Nikolaevna* – Post-graduate student, Far Eastern State University, 8, Sukhanova Street, Vladivostok, Russia, 690091. E-mail: relloudder@gmail.com.

The study considers the problems of modeling diffusion of innovations in economic systems. The authors show the capabilities and limitations of the use of deterministic and probabilistic cellular automata in modeling the diffusion of innovations. To overcome limitations of the model of probabilistic cellular automaton the researchers propose the model's modification. The authors constructed a cellular automaton that implements two different behavior modes according to the selection method of a plurality of neighboring cells (classic and combined) and changing the cell's state. This automaton has several modes of operation: the absence or impermeable boundaries, homogeneity or heterogeneity of the territory.

**Keywords:** diffusion of innovations, modeling, cellular automata, modification, probabilistic and combined cellular automaton.

## REFERENCES

1. Bilal N.E. Suleiman. Mathematical Model of Training and Dynamics of Scientific Personal. *Vestnik Tverskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Prikladnaya Matematika – Herald of Tver State University. Series: Applied Mathematics*, 2012, no. 1 (24), pp. 155–163. (In Russian).

2. Bortnik I.M., Senchenya G.I., Mikheeva N.N., Zdunov A.A., Kadochnicov P.A., Sorokina A.V. A System of Measurement and Monitoring Innovative Activity in Russian Regions. *Innovatsii [Innovations]*, 2012, no. 9 (167), pp. 48–61. (In Russian).

3. Gmurman V.E. *Probability Theory and Mathematical Statistics. 9<sup>th</sup> ed.* Moscow, 2003, 479 p. (In Russian).

4. Dubina I.N. *Game-Theoretic Models of the Organization of Creative and Innovative Activity of Firms*. Edited by N.M. Oskorbin. Barnaul, 2013, 178 p. (In Russian).

The study was supported by the RFBR project No. 155653032.

5. Zhang W.-B. *Synergetic Economics. Time and Change in Nonlinear Economics*. Moscow, 1999, 400 p. (In Russian).
6. Lobanov A.I. Model of Cellular Automata. *Kompyuternye Issledovaniya i Modelirovanie – Computer Research and Modeling*, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 273–293. (In Russian).
7. Mikheeva N.N. Comparative Analysis of Innovative Systems in the Russian Regions. *Prostranstvennaya Ekonomika = Spatial Economics*, 2014, no. 4, pp. 61–81. DOI: 10.14530/se.2014.4.061-081. (In Russian).
8. Moskovkin V.M., Bilal N.E. Suleiman, Golikov N.A. Mathematical Model of Interaction between the Results of Different Types of SREDW. *Automatic Documentation and Mathematical Linguistics*, 2011, no. 2, pp. 13–17. (In Russian).
9. Plotinskiy Yu.M. *Models of Social Processes*. Moscow, 2001, 296 p. (In Russian).
10. Popkov Yu.S. *Macrosystem Models of Spatial Economics*. Moscow, 2008, 240 p. (In Russian).
11. Toffoli T., Margolus N. *Cellular Automata Machines*. Moscow, 1991, 280 p. (In Russian).
12. Untura G.A., Esikova T.N., Zaytsev I.D., Moroshkina O.N. Problems and Research Tools Developed the Level of Innovative Development of Russian Regions. *Vestnik Novosibirskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Sotsialno-Ekonomicheskie Nauki* [Bulletin of the Novosibirsk State University. Series: Socio-Economic Sciences], 2014, vol. 14, no. 1, pp. 81–100. (In Russian).
13. Shmidt Y.D., Lobodina O.N. Statistic Research of Country Economics Zone Main Characteristics. *Vestnik Tikhookeanskogo Gosudarstvennogo Ekonomicheskogo Universiteta* [Bulletin of The Pacific State Economic University], 2013, no. 1 (65), pp. 22–35. (In Russian).
14. Castellano C., Fortunato S., Lorento V. Statistical Physics of Social Dynamics. *Reviews of Modern Physics*, 2009, vol. 81, no. 2, pp. 591–646. DOI: 10.1103/RevModPhys.81.591.
15. Gilbert N. Agent-Based Models. *SAGE*, 2008, vol. 153, 112 p. DOI: 10.4135/9781412983259.
16. Janszen F.H.A., Degenaaars G.H. A Dynamic Analysis of the Relations between the Structure and the Process of National System of Innovation Using Computer Simulation: The Case of the Dutch Biotechnological Sector. *Research Policy*, 1998, vol. 27, no. 1, pp. 37–54. DOI: 10.1016/S0048-7333(98)00023-7.
17. Lee Y.-L. *Dynamic Analysis of the National Innovation Systems Model: A Case Study of Taiwan's Integrated Circuit Industry*. University of Manchester, 2003.
18. Lee Y.-L., Tunzelmann N. A Dynamic Analytic Approach to National Innovation Systems: The IC Industry in Taiwan. *Research Policy*, 2005, vol. 34, no. 4, pp. 425–440. DOI: 10.1016/j.respol.2005.01.009.
19. Kocsis G., Varga I. Agent Based Simulation of Spreading in Social-Systems of Temporarily Active Actors. *Cellular Automata*, 2014, vol. 8751, pp. 330–338. DOI: 10.1007/978-3-319-11520-7\_34.
20. Malerba F. Sectoral Systems: How and why innovation differs across sectors. *The Oxford Handbook of Innovation*. Fagerberg J., Mowery D. (eds.). New York: Oxford University Press, 2005, pp. 380–406. DOI: 10.1093/oxfordhb/9780199286805.003.0014.
21. Rogers E.M. *Diffusion of Innovations*. 5<sup>th</sup> ed. New York: The Free Press, 2003, 576 p.
22. Stamboulis Y. Exploring the System Dynamics of Innovation Systems. *The 2008 International Conference of the System Dynamics Society (July 20–24, 2008, Athens): Conference Proceedings*. Available at: <http://www.systemdynamics.org/conferences/2008/proceed/papers/STAMB454.pdf>. (accessed 12 February 2015).
23. Wolfram S. *A New Kind of Science*, 2002, 1197 p. Available at: <http://www.wolframscience.com/nksonline/toc.html> (accessed 23 January 2015).