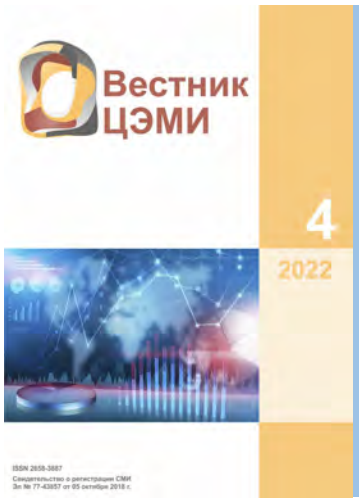

Вестник ЦЭМИ 2013-2022

ISSN 2079-8784

URL - http://ras.jes.su

Все права защищены

Выпуск 4 Том 5. 2022

Имитационное моделирование «цифрового региона»: концептуальный подход

Бекларян Гаянэ Левоновна
Старший научный сотрудник , Центральный экономико-математический институт РАН Москва, РФ, Нахимовский пр., 47

Аннотация

В статье представлен новый концептуальный подход к имитационному моделированию «цифрового региона». Изучены преимущества и недостатки использования дискретного и непрерывного пространства существования агентов. Приведена оценка вычислительной сложности соответствующих имитационных моделей. Обоснован переход к комбинированным моделям, использующим укрупненное сегментирование непрерывного пространства для выявления проблемных кластеров с последующим применением «аналогового» подхода для моделирования пространственной динамики взаимодействующих агентов.

Ключевые слова: цифровой регион, AnyLogic, FLAME GPU, региональная экономика, имитационное моделирование, агентное моделирование

Дата публикации: 30.12.2022

Ссылка для цитирования:

Бекларян Г. Л. Имитационное моделирование «цифрового региона»: концептуальный подход // Вестник ЦЭМИ – 2022. – Том 5. – Выпуск 4 [Электронный ресурс]. URL: https://cemi.jes.su/S265838870023308-1-1 (дата обращения: 30.12.2022). DOI: 10.33276/S265838870023308-1

1 **Введение**

2 В настоящее время развивается новое научное направление, относящееся, в частности, к имитационному моделированию систем «умный город» [25, 32] (smart city), «умный регион» (smart region) [37] и «цифровой регион» (digital region) [22].

3 Актуальность данного направления подтверждается и тем, что в октябре 2019 года Совет по развитию цифровой экономики при Совете Федерации предложил создать новый

федеральный проект – «Цифровой регион», реализация которого позднее была отложена из-за недостатка финансирования [28]. При этом в РФ уже несколько лет успешно реализуются проекты по созданию «умных городов» [29]. Большой интерес к разработке интеллектуальных систем поддержки принятия решений по пространственному развитию территорий отмечается в работах российских и зарубежных авторах [20, 21, 25, 31, 46].

4 Особенностью подобных систем является принятие во внимание различных аспектов, определяющих состояние и перспективы конкретного региона, в частности:

- *макроэкономические характеристики региона*, в том числе, валовой региональный продукт (ВРП), численность населения, производственные и инвестиционные характеристики и др. [8];
- *микроэкономические особенности региона,* определяющие возможности развития производственного сектора [10, 16, 18];
- *демографические и миграционные* характеристики региона [1, 2, 27], существенно влияющие на уровень социального комфорта, структуру занятости в регионе и экономику в целом [9];
- *экологические и эколого-экономические характеристики региона* [26, 41, 42], существенно влияющие на качество жизни и здоровье населения;
- *транспортная инфраструктура региона*, в том числе, обеспечивающая межрегиональные грузоперевозки [17, 44, 45] с учётом внутренних транспортных коммуникаций [11, 12], в том числе позволяющая использовать беспилотные транспортные средства [25, 38];
- *уровень социальной обеспеченности*, в частности, обеспеченность населения жильем, детскими садами, школами, больницами и т. д., существенно влияющий на продолжительность жизни и уровень рождаемости [16];
- *географические и климатические особенности региона,* которые необходимо учитывать при формировании стратегии его развития [22].

5 Таким образом, «цифровой регион» представляет собой сложную систему с множественными прямыми и обратными связями (рис. 1).

6

Рис. 1. Концептуальная схема системы-регион

7 Подобная система может быть исследована с использованием методов системной динамики [3, 5, 6, 7, 34, 37], позволяющих моделировать потоковые процессы с внутренними взаимосвязями (в том числе, обратными, лаговыми, нелинейными). Однако, при этом необходимо принимать во внимание индивидуальные системы принятия решений со стороны множественных агентов [4, 9, 11, 12], например, агентов-людей, агентов-предприятий, агентов – отраслей экономики, агентов –транспортных средств, агентов – вредных выбросов и зеленых насаждений и др. Подобные индивидуальные решения со стороны агентов существенно влияют на структуру потоков, например, структуру занятости [2]. Таким образом, централизованное («принудительное») управление системой «регион» в современной рыночной социально-экономической системе невозможно, и требуется построение интеллектуальной децентрализованной системы поддержки принятия решений, направленной на оптимизацию характеристик среды [9], создание новых рабочих мест [1, 2], развитие транспортной инфраструктуры [38, 39] и др., в которой агенты самостоятельно принимают решения.

8 Цель данной статьи – разработка подхода к имитационному моделированию системы «регион» на основе ранее предложенной концепции интеллектуальной многоуровневой системы поддержки принятия решений на уровне регионов [19], особенностью, которого является использование различных методов имитационного моделирования, в том числе, методов системной динамики, дискретно-событийного и агентного моделирования в рамках одной системы, а также принятие во внимание многослойных ресурсных характеристик региона: жилья, рабочих мест (дифференцированных по отраслям экономики), транспортных коммуникаций, объектов социальной инфраструктуры и др.

9 Концепция имитационного моделирования «цифрового региона»

10 Общая методология разработки имитационных моделей «цифрового региона» основана на создании многоуровневого программно-методического комплекса, обеспечивающего поддержку принятия решений на региональном уровне [19].

11 Вместе с тем, в [19] рассматривается только один аспект, относящийся преимущественно к моделированию социально-экономических характеристик региона, например, ВРП, численности населения, объема выпуска, структуры занятости и др. Разработанные имитационные модели описаны в работах [1, 2, 16, 18] и используются в составе модельного комплекса. Однако, состояние региона и динамика его развития, во многом зависят от его внутренних особенностей, например, возможностей транспортной инфраструктуры (развитости дорожной сети), плотности населения, обеспеченности социальными объектами (детскими садами, школами и др.), характеристиками экосистем (наличием зеленых насаждений, отсутствием источников вредных выбросов вблизи от жилых районов, количеством средств личного автотранспорта и др.). Важным преимуществом имитационного [3] и, в частности, агентного моделирования (ABM) [4, 9, 11, 12, 14, 20, 41, 42] является возможность поиска эффективных индивидуальных решений, например, ответов на вопросы – в каких городских локациях должны быть посажены деревья и разбиты парки, чтобы обеспечить естественный барьер от вредных выбросов; где должны быть открыты поликлиники, детские сады и школы, чтобы обеспечить их равномерную нагрузку и доступность соответствующих услуг; как должна быть организована уличная дорожная сеть, чтобы минимизировать пробки и аварии.

12 На рис. 2 показана 3D-схема построения агент-ориентированной имитационной модели «цифрового региона», в которой выделены, слои, содержащие ресурсы: рабочие места, зоны жилой застройки, области, экосервисные зоны (парки, скверы), важнейшие транспортные коммуникации, объекты социальной инфраструктуры.

13

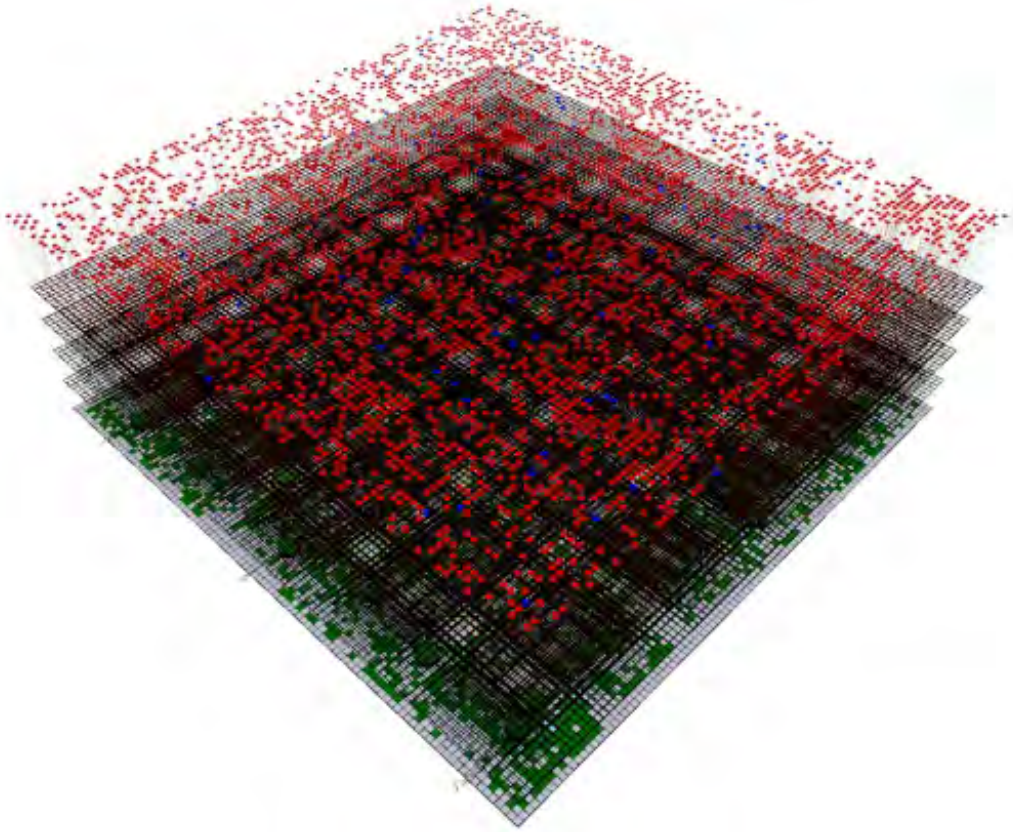

Рис. 2. 3D-схема построения агент-ориентированной имитационной модели «цифрового региона»

14 На рис. 2 можно увидеть пространственную структуру агент-ориентированной модели «цифрового региона», которая состоит из следующих слоев:

- нижний слой ячеек – рабочие места, дифференцируемые по отраслям экономики;
- второй слой ячеек – географически распределенные зоны жилой застройки;
- третий слой ячеек – объекты социальной инфраструктуры, т. е. детские сады, школы, больницы и др.;
- четвертый слой ячеек – зоны экосистемных сервисов, т. е. парки, скверы, зеленые насаждения, пруды, фонтаны и пр.;
- пятый слой ячеек – транспортная инфраструктура, т.е. уличная дорожная сеть, парковки, заправки и пр. (пятый слой ячеек).

15 Самый верхний слой 3D-модели (синие и красные ячейки на рис. 2) содержит агентов – коренных жителей и мигрантов, взаимодействующих друг с другом и внешней средой. Пространственная локация подобных агентов проецируется на ресурсные слои, расположенные ниже, что, в частности, позволяет оценивать обеспеченность агента собственным жильем, рабочим местом, удаленность (доступность) объектов социальной инфраструктуры и др.

16 Представленная выше концепция ранее в [31] была реализована для первого типа ресурсов – рабочих мест, за которые конкурируют агенты – мигранты и коренные жители. Однако, предлагаемая ресурсно-ориентированная схема может быть расширена за счёт добавления новых слоев и моделирования пространственной динамики (перемещения ансамбля агентов) с учётом взаимодействия с агентами – объектами соответствующего слоя.

17 В качестве примера, на рис. 3 показана проекция пятого слоя – транспортной инфраструктуры, на которой красными и синими квадратами обозначены агенты (коренные жители и мигранты соответственно). Подобные агенты могут перемещаться со скоростью автомобильного движения по дорогам, соответствующим схеме имеющейся уличной дорожной сети (УДС). В данном примере, используются простая радиально-кольцевая схема

УДС, но возможны и другие конфигурации (например, прямоугольная, прямоугольно-диагональная, многосвязные, многоуровневые и др.).

18

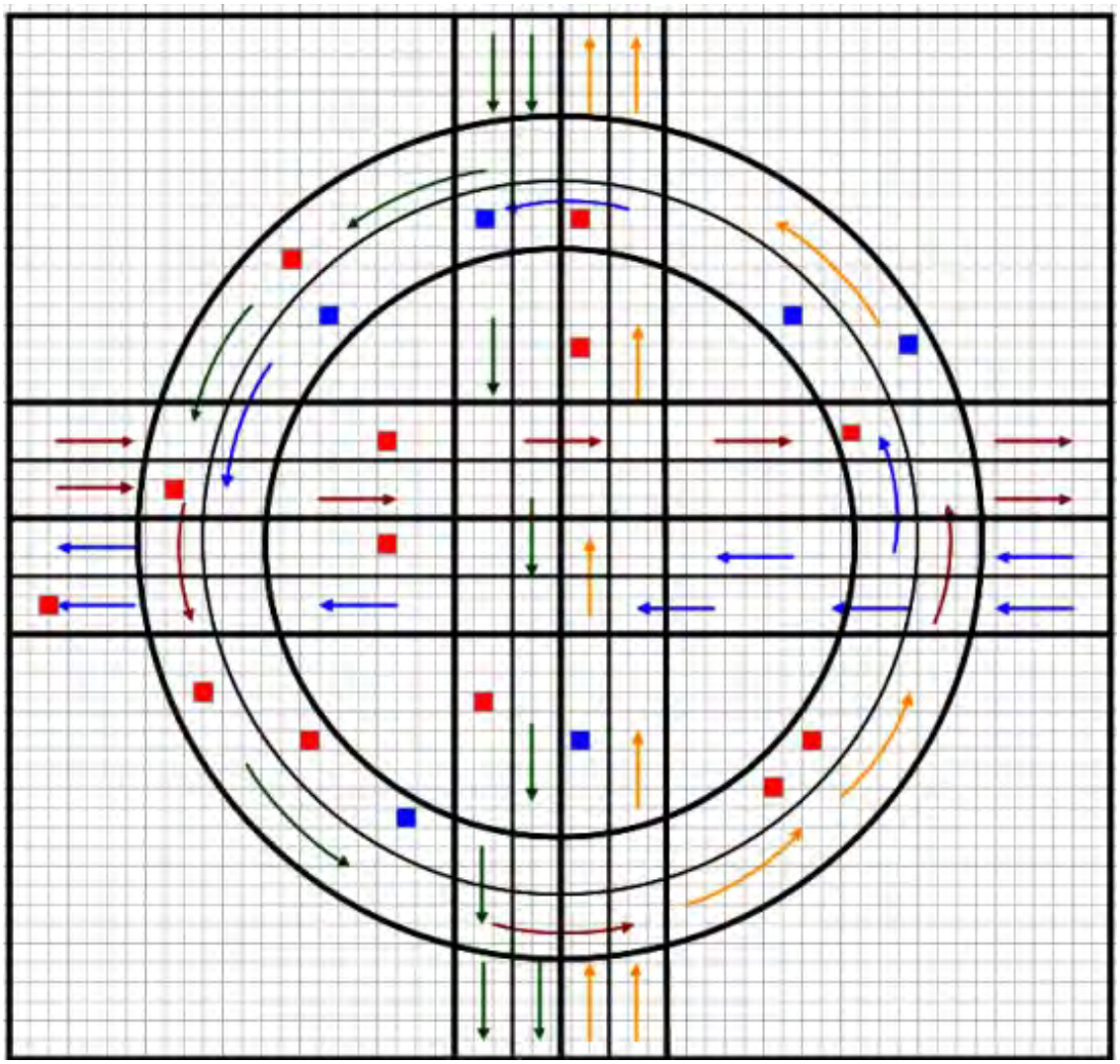

Рис. 3. Пример проекции слоя, содержащего транспортную инфраструктуру

19 Таким образом, агенты, находящиеся в УДС, перемещаются по правилам, определяемым ее конфигурацией. Агенты, находящиеся вне УДС, перемещаются по другим правилам, в зависимости от того, где они расположены. Так, например, если рассматривается некоторый объект социальной инфраструктуры, то подобные правила могут быть заданы с использованием методов дискретно-событийного моделирования [3, 30], позволяющих определить последовательность перемещения агентов от одного центра обслуживания к другому.

20 Среди систем, поддерживающих методы агентного имитационного моделирования, следует выделить AnyLogic и FLAME GPU (возможности их применения см. [3, 12, 23]).

21 На рис. 4 показан пример – фрагмент имитационной модели AnyLogic, в которой агенты-пассажиры перемещаются внутри аэропорта. Подобная модель подробно описана в работе [24].

22

Рис. 4. Фрагмент стандартной имитационной модели аэропорта в AnyLogic

23 Правила перемещения агентов-пассажиров в условном аэропорту задаются с помощью взаимосвязанных элементов пешеходной библиотеки AnyLogic (рис. 5).

24

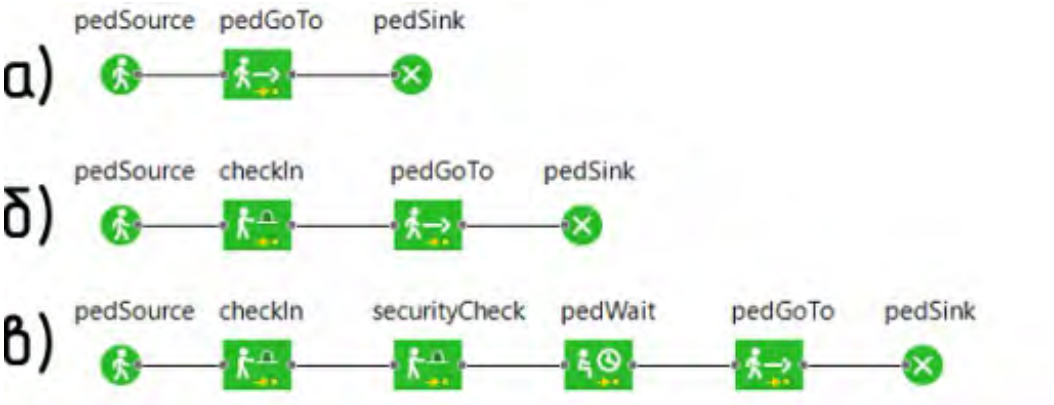

Рис. 5. Варианты реализации дискретно-событийной модели движения пешеходов в аэропорту: а) – мгновенное движению агентов к выходу; б) – движение к выходу сразу после регистрации; в) – движение к выходу после регистрации, прохождения зоны таможенного контроля и безопасности, и нахождения в зоне ожидания посадки на рейс

25 При этом, траектория движения агентов зависит от внутренней и внешней конфигурации аэропорта (т. е. пути перемещения ограничены стенами и препятствиями, которые необходимо обходить).

26 В системах класса «цифровой регион» нет необходимости в одновременном моделировании пространственной динамики всех агентов. Достаточно выделить социально-значимые кластеры региона и исследовать именно их (например, аэропорты, вокзалы, крупные больницы, округа и микрорайоны, федеральные трассы, центральные магистрали и т. д.). Кроме того, размерность имитационной модели может быть существенно увеличена (до 1 млн агентов и более), если использовать технологии суперкомпьютерного моделирования типа FLAME GPU [18, 33], а также перейти к непрерывному пространству размещения агентов (рис. 6).

27

Рис. 6. Моделирование поведения агентов в непрерывном пространстве

28 **Оценка вычислительной сложности имитационных моделей**

29 В непрерывном пространстве (рис. 6), у каждого агента имеется собственная геолокация (координаты в системе WSG 84). При этом, для сложных объектов геолокация задается центром и радиусом личного пространства агента, понятие которого было введено в моделях поведения толпы Акопова-Бекларяна [4, 15, 32, 33, 43]. Также понятие личного пространства агентов используется при моделировании интеллектуальных транспортных систем (ИТС) [11, 12, 38, 39]. Подобный подход позволяет минимизировать вероятность непосредственных столкновений между агентами, которые способны уменьшать и увеличивать радиус своего личного пространства в зависимости от ситуации (например, существенно сжимать личное пространство при высокой плотности агентов в ближайшем окружении, и резко увеличивать в состоянии паники). В случае с дискретным пространством размерности $n \times n$ вычислительная сложность имитационной модели f_1 , как правило, квадратично зависит от количества агентов и линейно от включаемых (независимых) слоев, содержащих ресурсы:

30 $$f_1(t,a,n) = \Theta\left(t \bullet n \bullet a^2\right), \qquad (1)$$

31 где $t \in T$ – модельное время, $|T|$ – все моменты модельного времени; $a \in A$ – количество взаимодействующих агентов, $|A|$ – общее количество агентов, $n \in N$ – количество учитываемых ресурсных слоев, $|N|$ – общее количество слоев, содержащих ресурсы. При этом скорость расчетов может быть увеличена за счёт ограничения размерности оцениваемого пространства вокруг агента, принимающего индивидуальные решения (например, только соседними ячейками).

32 В отличие от моделей класса ограниченного соседства [9], относящихся к типу клеточных автоматов, в моделях с непрерывным пространством размещения агентов нет необходимости в оценке состояния всех ячеек дискретной сетки. Имитационная модель с непрерывным пространством размещения агентов может иметь меньшую вычислительную сложность f_2 , если радиус взаимодействия агентов ограничен (т. е. агенты взаимодействуют локально):

33 $$f_2(t,a,n) = \Theta\left(t \bullet n \bullet \sum_{a=1}^{a} m_a\right), \qquad (2)$$

34 $$m_a = \begin{cases} 1, & \text{если } d(a,\tilde{a}) \le R, \\ 0, & \text{если } d(a,\tilde{a}) > R, \end{cases} \qquad (3)$$

35 где R – фиксированный радиус коммуникации между взаимодействующими агентами, $d(a,\tilde{a})$, a, $\tilde{a} \in A$ – расстояние между a -ми агентами и их $\tilde{a}$ -ми соседями.

36 С увеличением площади региона и уменьшением плотности населения потребуется увеличение радиуса взаимодействия агентов R , что может привести к существенном увеличению вычислительной сложности. Для преодоления соответствующих трудностей, целесообразно масштабировать модельное пространство региона относительно его фактической площади. Также можно масштабировать размер популяции агентов-индивидуумов относительно их фактической численности. Однако, точность вычислений при этом снижается, а реалистичность ухудшается, так как малоразмерная популяция эволюционирует медленнее из-за меньшего внутреннего разнообразия, схожих паттернов поведения ее индивидуумов и слабой конкурентной среды.

37 Несмотря на привлекательность «аналогового» подхода к моделированию динамики агентов в непрерывном пространстве (использующего, как правило, дифференциальные уравнения с переменной структурой [4, 32, 41]), он имеет ряд ограничений, обусловленных, в основном, недостаточной квантизацией ресурсных слоев, сложностью моделирования их самостоятельного эволюционного развития и др. Поэтому, представляется целесообразным использование гибридного формата, предполагающего разделение непрерывного пространства региона на укрупненные сегменты с дальнейшим применением «аналоговых» моделей на уровне целевых областей и обобщением полученных результатов на уровне соответствующих кластеров (рис. 7).

38

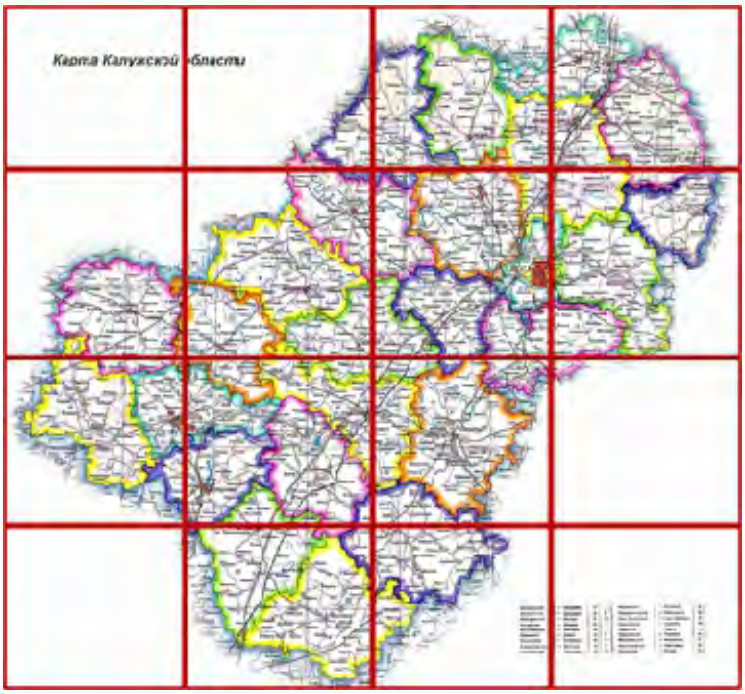

Рис. 7. Пример квантизации регионального пространства

39 Выявление проблемных (целевых) сегментов в подобной цифровой модели региона, может быть выполнено с использованием методов кластеризации [43], а их дальнейшая модельная эволюция реализуема с помощью генетических оптимизационных алгоритмов [7, 13, 35, 36, 40]. Подобные эвристические алгоритмы позволяют, в частности, сформировать оптимальное управление для территориального социально-экономического развития, вычислить наилучшие локации для строительства нового жилья, организации новых транспортных маршрутов, создания парков, открытия предприятий и др. на уровне конкретных взаимосвязанных сегментов (рис. 7).

40 **Заключение**

41 В данной статье представлен концептуальный подход к имитационному моделированию «цифрового региона» и выполнена (на теоретическом уровне) оценка вычислительной сложности имитационных моделей, использующих дискретное (по аналогии с конечными автоматами) и непрерывное пространства (по типу картографических слоев) размещения агентов. Несмотря на большую вычислительную сложность многослойных дискретных моделей (рис. 2), они обладают определенными преимуществами, в частности, возможностью управлять эволюцией среды на микроскопическом уровне отдельных ресурсов (например, зданий, объектов транспортной инфраструктуры и т. д.).

42 Вместе с тем, предлагается создание менее ресурсоемких комбинированных моделей, в которых вначале выполняется укрупненное сегментирование регионального пространства, определение целевых сегментов-кластеров, к которым в дальнейшем целесообразно применять «аналоговый» агент-ориентированный подход (например, для моделирования движения автомобильного транспорта, распространения вредных выбросов и т. д.). В дальнейшем, возможно обобщение полученных результатов на уровне соответствующих кластеров.

43 Дальнейшие исследования будут направлены на применение разработанного подхода для моделирования характеристик системы-регион с использованием реальных данных.

Библиография:

1. Агентное моделирование популяционной динамики двух взаимодействующих сообществ: мигрантов и коренных жителей / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Экономика и математические методы. – 2020. – Том 56, № 2. – с. 5-19.

2. Агентное моделирование социально-экономических последствий миграции при государственном регулировании занятости / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Экономика и математические методы. – 2022. – Том 58, № 1. – с. 113-130.

3. Акопов, А. С. Имитационное моделирование: учебник и практикум для академического бакалавриата / А. С. Акопов ; Серия: Бакалавр. Академический курс. – Москва : Издательство Юрайт, 2018. – 389 с.

4. Акопов, А. С. Агентная модель поведения толпы при чрезвычайных ситуациях / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян // Автоматика и телемеханика. – 2015. – № 10. – с. 131-143.

5. Акопов, А. С. Системно-динамическое моделирование стратегии банковской группы / А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2012. – № 2 (20) – с. 10-19.

6. Акопов, А. С. К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Ч1. Математическое обеспечение системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании / А. С. Акопов // Проблемы управления. – 2010. – № 6. – с. 12-18.

7. Акопов, А. С. К вопросу проектирования интеллектуальных систем управления сложными организационными структурами. Ч. 2. Программная реализация системы управления инвестиционной деятельностью вертикально-интегрированной нефтяной компании / А. С. Акопов // Проблемы управления. – 2011. – № 1. – с. 47-54.

8. Акопов, А. С. Сравнительный анализ производственных и инвестиционных характеристик отраслей ТЭК по регионам РФ / А. С. Акопов, Г. Л. Бекларян // Экономическая наука современной России. –2004. – № 1. – с. 121-128.

9. Акопов, А. С. Мультисекторная модель ограниченного соседства: сегрегация агентов и оптимизация характеристик среды / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян, А. Л. Бекларян // Математическое моделирование. – 2021. – Т. 33, № 11. – с. 95-114.

10. Акопов, А. С. Анализ эффективности регулирующей политики государства с помощью региональной модели CGE поведения естественных монополий (на примере электроэнергетики) / А. С. Акопов, Г. Л. Бекларян // Экономическая наука современной России. – 2005. – Т. 4, № 31. – с. 130-139.

11. Акопов, А. С. Многоагентная система управления наземными беспилотными транспортными средствами / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян, Н. К. Хачатрян [и др.] // Информационные технологии. – 2020. – Т. 26, № 6. – с. 342-353.

12. Акопов, А. С. Моделирование движения ансамбля наземных беспилотных транспортных средств с использованием FLAME GPU / А. С. Акопов, Л. А. Бекларян, А. Л. Бекларян [и др.] // Информационные технологии. – 2021. – Т. 27, № 7. – с. 369-379.

13. Акопов, А. С. Разработка параллельных генетических алгоритмов вещественного кодирования для систем поддержки принятия решений социально-экономического и экологического планирования // А. С. Акопов, А. Л. Бекларян, М. Тхакур [и др.] // Бизнес-информатика. – 2019. – Т. 13, № 1. – с. 33-44.

14. Бахтизин, А. Р. Агент-ориентированные модели экономики / А. Р. Бахтизин. – Москва: Экономика, 2008. – 279 с.

15. Бекларян, А. Л. Моделирование поведения толпы на основе интеллектуальной динамики взаимодействующих агентов / А. Л. Бекларян, А. С. Акопов // Бизнес-информатика. – 2015. – № 1 (31). – с. 69-77.

16. Бекларян, Г. Л. Имитационная модель региона в применении к анализу экономики Красноярского края / Г. Л. Бекларян // Экономика и математические методы. – 2019. – Т. 55, № 3. – с. 47-61.

17. Бекларян, Г. Л. Агентное моделирование межрегиональных железнодорожных грузоперевозок / Г. Л. Бекларян, А. С. Акопов // Аудит и финансовый анализ. –2019. – № 1. – с. 39-54.

18. Бекларян, Г. Л. Система поддержки принятия решений для устойчивого экономического развития Дальневосточного федерального округа / Г. Л. Бекларян // Бизнес-информатика. – 2018. – Т 4, № 46. – с. 66-75.

19. Бекларян, Г. Л. Интеллектуальная многоуровневая система поддержки принятия решений на уровне регионов: концептуальный подход / Г. Л. Бекларян // Вестник ЦЭМИ РАН. – 2022. – Т. 5, Выпуск 2. URL: https://cemi.jes.su/s265838870020946-3-1/ (дата обращения: 20.09.2022).

20. Боуш, Г. Д. Агентное моделирование процессов кластерообразования в региональных экономических системах / Г. Д. Боуш, О. М. Куликова, И. К. Шелков // Экономика региона. – 2016. – Т. 12, № 1. – с. 64-77.

21. Глебова, И. С. Возможности реализации концепции "умного города": практика российских городов / И. С. Глебова, Я. С. Ясницкая // Экономика и предпринимательство. – 2014. – № 1-3 (42). – с. 232-235.

22. Имитационное моделирование системы "умный город": концепция, методы и примеры / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Национальные интересы: приоритеты и безопасность. – 2019. – Т. 15, № 2 – с. 200-224.

23. Моделирование миграционных и демографических процессов с использованием FLAME GPU / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Бизнес-информатика. – 2022. – Т. 16, № 1. – с. 7-21.

24. Разработка программной платформы для крупномасштабного агент-ориентированного моделирования сложных социальных систем / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Программная инженерия. – 2019. – Т. 10, № 4. – с. 167-177.

25. Сизов, Ю. И. Развитие среднего города на основе концепта: от "умного дома к умному городу" / Ю. И. Сизов, Л. Н. Медведева // Научные труды Вольного экономического общества России. 2019. Т. 218. № 4. С. 573-580.

26. Система поддержки принятия решений для рационального озеленения города на примере г. Ереван, Республика Армения / А. С. Акопов, А. Л. Бекларян, А. К. Сагателян [и др.] // Программная инженерия. – 2019. – Т. 10, № 2. – с. 87-96.

27. Укрупненная агент-ориентированная имитационная модель миграционных потоков стран Европейского Союза / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Экономика и математические методы. – 2019. – том 55, № 1. – с. 3-15.

28. Федеральный проект «Цифровой регион» // CNews. – 27 апреля 2021. – URL : https://www.cnews.ru/news/top/2021-04-27_zapusk_federalnogo_proekta (дата обращения: 08.11.2022).

29. Федеральный проект «Умный город» // Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации : официальный сайт. – 2014-2022. – URL : https://minstroyrf.gov.ru/trades/gorodskaya-sreda/proekt-tsifrovizatsii-gorodskogo-khozyaystva-umnyy-gorod/ (дата обращения: 08.11.2022).

30. Цифровой завод: методы дискретно-событийного моделирования и оптимизации производственных характеристик / В. Л. Макаров, А. Р. Бахтизин, Г. Л. Бекларян [и др.] // Бизнес-информатика. – 2021. – Т. 15, № 2. –с. 7-20.

31. Adil, S. H. 3D smart city simulator / S. H. Adil, A.A. Aziz, T. Akber, M. Ebrahim, S. S. A. Ali, K. Raza // 2017 IEEE 3rd International Symposium in Robotics and Manufacturing Automation. – ROMA, 2017. – pp. 1-5.

32. Akopov, A. S., Simulation of human crowd behavior in extreme situations / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – 2012. – Vol. 79, No. 1. – pp. 121-138.

33. Akopov, A. S. Cluster-based optimization of an evacuation process using a parallel bi-objective real-coded genetic algorithm // A. S. Akopov, A. L. Beklaryan, L. A. Beklaryan // Cybernetics and Information Technologies. – 2020. – Vol. 20, No. 3. – pp. 45-63.

34. Akopov, A. S. Modelling the dynamics of the “Smarter Region” / A. S. Akopov, G. L. Beklaryan // in: Proceedings of 2014 IEEE Conference on Computational Intelligence for Financial Engineering & Economics. – L. : IEEE, 2014. – pp. 203-209.

35. Akopov, A. S. A Multi-agent Genetic Algorithm for Multi-objective Optimization / A. S.

Akopov, M. A. Hevencev // in: Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), Manchester, UK, 2014. – pp. 1391-1395.

36. Akopov, A. S. Parallel genetic algorithm with fading selection / A. S. Akopov // International Journal of Computer Applications in Technology. – 2014. – Vol. 49, No. 3/4. – pp. 325-331.

37. Akopov, A. S. Designing of integrated system-dynamics models for an oil company / A. S. Akopov // International Journal of Computer Applications in Technology. – 2012. – Vol. 45, No. 4. – pp. 220-230.

38. Akopov, A. S., Improvement of Maneuverability Within a Multiagent Fuzzy Transportation System With the Use of Parallel Biobjective Real-Coded Genetic Algorithm / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan, M. Thakur // IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems. – 2022. – Vol. 23, No. 8. – pp. 12648-12664.

39. Akopov, A. S. Simulation-Based Optimisation for Autonomous Transportation Systems Using a Parallel Real-Coded Genetic Algorithm with Scalable Nonuniform Mutation / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan, A. L. Beklaryan // Cybernetics and Information Technologies. – 2021. – Vol. 21, No. 3. – pp. 127-144.

40. Akopov, A. S. Parallel multi-agent real-coded genetic algorithm for large-scale black-box single-objective optimisation / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan, M. Thakur, D. B. Verma // Knowledge-Based Systems. – 2019. – Vol. 174. – pp. 103-122.

41. Akopov, A. S. Agent-based modelling of interactions between air pollutants and greenery using a case study of Yerevan, Armenia / A. S. Akopov, L. A Beklaryan, A. K. Saghatelyan // Environmental Modelling and Software. – 2019. –Vol. 116. –pp. 7-25.

42. Akopov, A. S. Agent-based modelling for ecological economics: A case study of the Republic of Armenia / A. S. Akopov, L. A. Beklaryan, A. K. Saghatelyan // Ecological Modelling. – 2017. – Vol. 346. – pp. 99-118.

43. Beklaryan, A. L. Simulation of Agent-rescuer Behaviour in Emergency Based on Modified Fuzzy Clustering // A. L. Beklaryan, A. S. Akopov // in: AAMAS'16: Proceedings of the 2016 International Conference on Autonomous Agents & Multiagent Systems. Richland: International Foundation for Autonomous Agents and Multiagent Systems, – 2016. – pp. 1275-1276.

44. Khachatryan, N. K. About quasi-solutions of traveling wave type in models for organizing cargo transportation / N. K. Khachatryan, A. S. Akopov, F. A. Belousov // Business Informatics. – 2018. – Vol. 1, № 43. – pp. 61-70.

45. Khachatryan, N. K. Model for organizing cargo transportation with an initial station of departure and a final station of cargo distribution / N. K. Khachatryan, A. S. Akopov // Business Informatics. 2017. – Vol. 1, № 39. – pp. 25-35.

46. Yang, J. Simulation of landscape spatial layout evolution in rural-urban fringe areas: a case study of Ganjingzi District / J. Yang, A. Guo, Y. Li, Y. Zhang, X. Li // GIScience and Remote Sensing. 2019. – Vol. 56, No. 3. – pp. 388-405.

Simulation modelling of the ‘digital region’: conceptual approach

Gayane Beklaryan
Senior Research Scholar, Central Economics and Mathematics Institute, Russian Academy of Sciences
Russia
Moscow, Russian Federation, Nakhimovskii pr., 47

Abstract

The article presents a new conceptual approach to simulation modelling of the ‘digital region’. The advantages and disadvantages of using the discrete and continuous space of agents’ environment are studied. An estimate of the computational complexity of the corresponding simulation models is given. The transition towards combined models using enlarged segmentation of continuous space to identify problematic clusters with the subsequent applying the ‘analog’ approach to modelling the spatial dynamics of interacting agents is justified.

Keywords: digital region, AnyLogic, FLAME GPU, regional economy, simulation modelling, agent-based modelling

Publication date: 30.12.2022

Citation link:

Beklaryan G. Simulation modelling of the ‘digital region’: conceptual approach // Vestnik CEMI – 2022. – V. 5. – Issue 4 [Electronic resource]. URL: https://cemi.jes.su/S265838870023308-1-1 (circulation date: 30.12.2022). DOI: 10.33276/S265838870023308-1

Код пользователя: 16978; Дата выгрузки: 30.12.2022; URL - http://ras.jes.su/cemi/s265838870023308-1-1 Все права защищены.