

УДК: 004.94

Technoscape: мультиагентная модель эволюции сети городов, объединенных торгово-производственными связями

П. В. Куракин

Институт проблем управления им. В. А. Трапезникова Российской академии наук,
Россия, 117997, г. Москва, ул. Профсоюзная, д. 65

E-mail: pvkurakin@yandex.ru

Получено 29.11.2021, после доработки — 30.12.2021.

Принято к публикации 03.01.2022.

В работе предлагается многоагентная локально-нелокальная модель образования глобальной структуры городов с условным названием Technoscape. Technoscape можно в определенной степени считать также моделью возникновения глобальной экономики. Текущий вариант модели рассматривает очень простые способы поведения и взаимодействия агентов, при этом модель демонстрирует весьма интересные пространственно-временные паттерны.

Под локальностью и нелокальностью понимаются пространственные характеристики способа взаимодействия агентов друг с другом и с географическим пространством, на котором разворачивается эволюция системы. Под агентом понимается условный ремесленник, семья или промышленно-торговая фирма, причем не делается разницы между производством и торговлей. Агенты размещены на ограниченном двумерном пространстве, разбитом на квадратные ячейки, и перемещаются по нему. Модель демонстрирует процессы высокой концентрации агентов в выделенных ячейках, что трактуется как образование «городов». Происходит постоянный процесс как возникновения, так и исчезновения городов. Агенты живут «вечно», не мутируют и не эволюционируют, хотя это перспективное направление развития модели.

Система Technoscape демонстрирует качественно новый вид самоорганизации. Частично эта самоорганизация напоминает поведение модели сегрегации по Томасу Шеллингу, однако эволюционные правила Technoscape существенно иные. В модели Шеллинга существуют лавины, но без добавления новых агентов в системе существуют простые равновесия, в то время как в Technoscape не существует даже строгих равновесий, в лучшем случае квазиравновесные, медленно изменяющиеся состояния.

Нетривиальный результат в модели Technoscape, также контрастирующий с моделью сегрегации Шеллинга, состоит в том, что агенты проявляют склонность к концентрации в больших городах даже при полном игнорировании локальных связей.

При этом, хотя агенты и стремятся в большие города, размер города не является гарантией стабильности. По ходу эволюции системы происходит постоянное «переманивание» жителей в другие города такого же класса.

Ключевые слова: многоагентные системы, самоорганизация, сложные системы, экономическая география, формирование городов, глобальная экономика, экономика высоких технологий

UDC: 004.94

Technoscape: multi-agent model for evolution of network of cities, joined by production and trade links

P. V. Kurakin

V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences, Russian Academy of Sciences,
65, Profsoyuznaya st., Moscow, 117997, Russia

E-mail: pvkurakin@yandex.ru

Received 29.11.2021, after completion — 30.12.2021.

Accepted for publication 03.01.2022.

The paper presents agent-based model for city formation named Technoscape which is both local and non-local. Technoscape can, to a certain degree, be also assumed as a model for emergence of global economy. The current version of the model implements very simple way of agents' behavior and interaction, still the model provides rather interesting spatio-temporal patterns.

Locality and non-locality mean here the spatial features of the way the agents interact with each other and with geographical space upon which the evolution takes place. Technoscape agent is some conventional artisan, family, or a producing and trading firm, while there is no difference between production and trade. Agents are located upon and move through bounded two-dimensional space divided into square cells. The model demonstrates processes of agents' concentration in a small set of cells, which is interpreted as «city» formation. Agents are immortal, they don't mutate and evolve, though this is interesting perspective for the evolution of the model itself.

Technoscape provides some distinctively new type of self-organization. Partially, this type of self-organization resembles the behavior of segregation model by Thomas Schelling, still that model has evolution rules substantially different from Technoscape. In Schelling model there exist avalanches still simple equilibria exist if no new agents are added to the game board, while in Technoscape no such equilibria exist. At best, we can observe quasi-equilibrium, slowly changing global states.

One non-trivial phenomenon Technoscape exhibits, which also contrasts to Schelling segregation model, is the ability of agents to concentrate in local cells (interpreted as cities) even explicitly and totally ignoring local interactions, using non-local interactions only.

At the same time, while the agents tend to concentrate in large one-cell cities, large scale of such cities does not guarantee them from decay: there always exists a process of «enticement» of agents and their flow to new cities.

Keywords: multi-agent systems, self-organization, complex systems, economical geography, city formation, global economy, high-tech economy

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2022, vol. 14, no. 1, pp. 163–178 (Russian).

1. Введение

Предлагаемое исследование ставит своей целью так называемое мягкое моделирование процесса формирования пространственной структуры размещения производства (неважно — промышленного или сельскохозяйственного). Под территорией может пониматься как область страны, целая страна, так и весь мир в целом. Производство представлено агентами — условными ремесленниками или фирмами, являющимися носителями различных технологических навыков.

Сразу можно отметить, что автор предполагает дальнейшую инкрементальную модернизацию модели — она это позволяет — аналогично классической работе С. Улама по численному моделированию скорости эволюции [Ulam, Schrandt, 1970], а также работе А. Ясутоми по моделированию самоорганизации и самораспаду средневековых денежных систем [Yasutomi, 1995] (последняя работа обсуждается ниже). В текущем состоянии модель представляет собой минимальный каркас для добавления новых правил.

Говоря максимально широко, автора интересует совместная эволюция технологий и глобальной экономики, с ее известной неоднородностью и неравномерным распределением «высоких технологий» и соответствующего уровня доходов населения. Ясно, что в такой формулировке это слишком широкая постановка задачи, хотя конечная цель именно такова, и данный вопрос сегодня исследуют не только с чисто экономической или исторической точки зрения, но и междисциплинарно, с привлечением физической географии, экологии, а также антропологии, психологии, когнитивной науки и физической термодинамики, например [Hornborg, 2001].

В описательном смысле также появляется все больше статистических исследований по размещению технологий и знаний в мире: «Атлас экономической сложности» [Hausmann et al., 2016].

Так или иначе, все больше исследователей пытаются понять, как именно технологии и производственные навыки экономических агентов взаимодействуют друг с другом на реальном географическом пространстве. Созданная модель продемонстрировала процессы концентрации агентов — носителей технологических навыков в распределенной системе связанных локаций, что позволяет условно говорить об этих локациях как о городах.

Похожая по назначению модель существует давно: это теория «центральных мест» Кристаллера [Christaller, 1933]. Эта модель рассматривает пространственную структуру поселений, она фактически постулирует эту структуру, а также имеющуюся иерархию поселений по размерам. Де факто, хотя это не выделялось Кристаллером и последователями, его модель учитывает связи «средней дальности»: связь поселений со своим ближним окружением.

Модель Кристаллера уже *в неявной форме* содержала пространственное распределение технологий. Но автор в качестве конкретной отправной точки выбрал модель образования первых «городов» по Джейн Джекобс, теоретика градостроительства [Jacobs, 1969]. В (вербальной) модели Джекобс технологии и пространственные связи их носителей присутствуют в явном виде.

В этой книге Джекобс впервые, насколько известно автору, высказала предположение, что первые крупные поселения, которые уместно назвать городами, возникли, вопреки устоявшимся стереотипам, задолго до аграрной (неолитической) революции. Эти поселения представляли собой логистические узлы на торговых путях между кочевыми племенами охотников и собирателей. Именно в этих поселениях, согласно Джекобс, в ходе практики хранения семян растений и содержания *перегоняемых* животных, появились первые технологии земледелия и скотоводства. И только впоследствии люди, ставшие специалистами в этих областях, смогли уйти из торговых «городов» и основать специализированные поселения — «деревни», — занимающиеся сугубо сельскохозяйственной деятельностью. Так возникла пространственная дифференциация расселения специалистов разных профилей.

Джекобс строила свои предположения на довольно странных на первый взгляд данных, полученных при изучении одного из древнейших известных городов Чатал-Гуюк (7400 лет до н. э.). В этом поселении, открытом в 1930-х гг., вопреки общепринятым представлениям и теориям, слишком небольшое число материальных артефактов говорило о наличии сельского хозяйства (как в самом городе, так и окрестностях). Большинство артефактов говорило о преобладании охотничьих и собирательских занятий обитателей города [Balzer, 1998].

Открыватель Чатал-Гуюка Джеймс Меллаарт интерпретировал эти факты как свидетельство некой специфической именно для этого города связи с охотниками и собирателями. По мнению большинства историков и археологов, само понятие «город» уже должно предполагать наличие развитого сельского хозяйства и атрофию охотничьих промыслов.

В настоящее время гипотезу Джекобс уже можно рассматривать как доказанную по крайней мере для какого-то класса первых городских поселений. Так, считается доказанным, что Иерихон возник задолго до проникновения сельского хозяйства в эту местность [Bunch, Hellemans, 2004].

Более непосредственными предшественниками и вдохновителями системы Technoscape автор считает две популярные вычислительные модели:

- модель сегрегации Томаса Шеллинга [Shelling 1969, 1978],
- модель Sugarscape Джошуа Эпштейна и Роберта Экстелла [Epstein, Axtell, 1996].

В модели Шеллинга агенты двух разных видов случайным образом распределяются по «кварталам» на прямоугольной решетке (как в клеточных автоматах, но здесь не клеточный автомат, это принципиально). Каждый агент из своей клетки-квартиры видит 8 соседних клеток и находящихся в них других агентов. Агент оценивает свое окружение и принимает решение о своей локации по следующим правилам:

- если у агента всего один сосед, он решает съехать из этого квартала, только если его сосед принадлежит другому виду, иначе агент остается на месте;
- если у агента два соседа, то агент останется на месте, если хотя бы один сосед — одного с ним вида, иначе агент съедет из текущего квартала;
- агент с числом соседей от 3 до 5 останется на месте, если у него по крайней мере 2 соседа — одного с ним класса;
- агенту с числом соседей от 6 до 8 требуется минимум 3 соседа его класса.

На каждом вычислительном шаге случайно выбирается и обрабатывается один агент. В этой модели Т. Шеллинга близка к асинхронным клеточным автоматам. Тем не менее это не клеточный автомат: если агент выбирает переезд из своей текущей локации, то место для переезда выбирается случайно, и оно может быть удалено от текущей локации сколь угодно далеко.

В описанных выше правилах конкретные численные значения были специально подобраны Шеллингом, чтобы добиться некоторого «сложного» поведения, с многочисленными неустойчивыми состояниями и лавинообразными переходами из таких состояний в более устойчивые конфигурации.

Модель Sugarscape, как подчеркивают ее авторы, выделяет следующие особенности реального мира экономической географии:

- имеется понятие географического пространства, в том смысле, что агенты могут двигаться на север, юг, запад, восток;

- имеется некоторый ресурс, существующий в каждой клетке, который можно трактовать как источник энергии, — «сахар» в терминах авторов;
- местность является дифференцированной: есть «долины» и «горы», есть «плодородные» и «пустынные» земли.

Каждый агент в среде Sugarscape:

- имеет свое видение окружающего пространства на несколько клеток вокруг;
- он имеет свой метаболизм — потребляет тот «сахар», который находится в одной клетке с ним;
- может принимать решение о перемещении в ближайшие клетки.

Система Sugarscape демонстрирует интересную пространственно-временную эволюцию, в которой происходят имущественная дифференциация и пространственная сегрегация агентов, а также дифференциация по продолжительности жизни.

В целом автор считает себя продолжателем традиций «искусственной жизни» [Langton, 1997] и «искусственной экономики» [Batten, 2000; Beinhocker, 2006] — ключевых подходов в мягком моделировании самых сложных природных и социальных систем. Модели Шеллинга и Эпштейна – Экстелла как раз относятся к классу «искусственной экономики».

2. Правила эволюции

В системе Technoscape пространство представляет собой квадрат из 40×40 ячеек, и в каждой ячейке может находиться произвольное количество агентов. В отличие от модели Sugarscape в нашей модели нет ресурса, распределенного по игровому полю. Общим с системой Sugarscape является то, что агенты перемещаются локально, а не глобально, как в модели сегрегации Т. Шеллинга.

Каждый агент является носителем некоторых технологических навыков и пытается максимизировать количество связей с другими агентами, причем его партнеры могут находиться как в той же ячейке, что и сам агент, так и в удаленных ячейках. Связи устанавливаются на основе технологических навыков: агенты, устанавливающие связь, должны иметь «комплиментарные» навыки (см. далее).

В начальный момент времени агенты равномерно распределены по «игровому полю», хотя имеет смысл провести вычислительные эксперименты с какими-то специальными распределениями. На данном этапе развития модели агенты живут вечно, хотя крайне интересно рассмотреть смертных агентов.

Состояние каждого агента можно разделить на статическую и динамическую части. Динамическая часть (начать лучше с нее) характеризуется числом связей с другими агентами, которые агент устанавливает и проверяет на каждом ходе.

Кроме агентов на собственной ячейке, каждый агент (их можно считать некими ремесленниками, торговцами или фирмами) «видит» других агентов сколь угодно вдаль (рис. 1) по диагоналям, то есть ходом шахматного слона.

Такому необычному на первый взгляд способу взаимодействия агента с пространством можно дать вполне осмысленную экономическую интерпретацию, если рассматривать агентов как торговцев (торговые фирмы). Торговец может менять свою постоянную локацию только локально, перемещаясь между соседними клетками. В то же время такой агент может иметь дальние деловые связи, что вполне соответствует не только современному понятию глобализации,

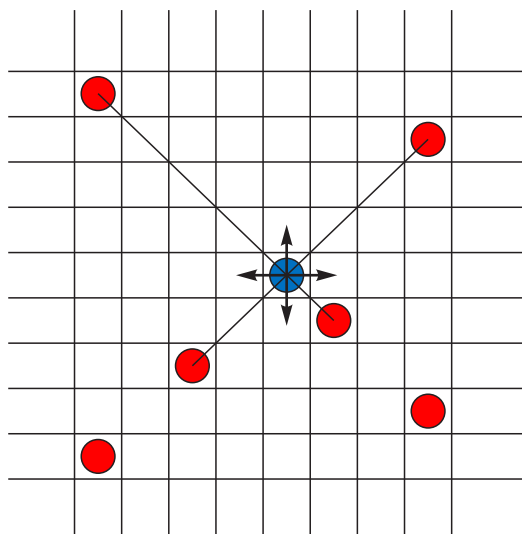


Рис. 1. Область сканирования агента и его возможные шаги

но и историческому развитию торговых связей. Здесь можно упомянуть не только Великий шелковый путь и торговые республики Венеции и Флоренции, но также Киев, как логистический узел в системе торговли раннего Средневековья («Путь из варяг в греки»), и Москву, которая при Иване Калите стала ключевым узлом в русской торговле мехами с Западной Европой.

Если говорить о статической части состояния агента, то каждый агент имеет некоторые технологические навыки, которые описываются его «картой». Далее мы будем употреблять термин «технологический профиль агента». Агент может устанавливать связи с другими агентами именно на основе собственного технологического профиля и профиля возможного партнера. Технологический профиль агента — аналог хромосомы в генетических алгоритмах. В текущей версии модели этот профиль не меняется в ходе эволюции.

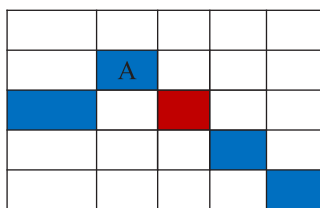


Рис. 2а. Карта «лягушка»

В текущей версии модели карты агентов составлены на основе японской настольной игры «Онитама». Существует несколько наборов карт «Онитама», в нашей модели используется всего 32 разных карты. На рис. 2а и рис. 2б в качестве примера приведены карты «лягушка» и «журавль».

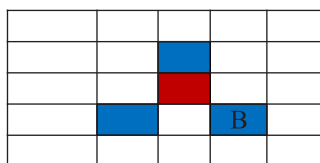


Рис. 2б. Карта «журавль»

Каждую клетку одной игровой карты «Онитама» можно рассматривать как один «ген» в хромосоме агента. Этот ген описывается двумя числами: смещения по горизонтали и вертикали от центральной клетки карты.

Каждый агент может устанавливать связи с другими агентами, если он «видит» этих агентов (удаленно либо локально), а также если в рассматриваемой паре агентов их карты позволяют установить связь.

Связь может быть установлена, если в двух картах есть парные друг другу клетки (исключая центральную). Клетки считаются парными, если они описываются противоположными смещениями вдоль сторон карты относительно центральной клетки:

$$(a, b) \leftrightarrow (-a, -b).$$

Например, клетки **A** на рис. 2а и **B** на рис. 2б являются комплиментарными в указанном смысле. Данное условие можно проинтерпретировать так, что некая продукция (навык) одного агента является комплиментарной к продукции (навыку) другого агента.

Каждый агент, когда алгоритм вычислений выбирает его для совершения хода, «сканирует» пространство из своей текущей позиции и оценивает количество связей, которые он устанавливает. При этом в модели предусмотрена возможность отдельно подсчитывать количество локальных связей (в этой же клетке) и удаленных связей. Можно выбрать опции «только локальные связи», «только удаленные связи», «все связи».

После этого агент рассматривает все возможности переместиться на одну клетку ходом ладьи и оценивает количество связей в каждой из этих позиций. Если лучшая из 4 соседних ячеек дает увеличение количества связей по сравнению с текущей позицией, то агент перемещается в эту ячейку. Иначе агент, наиболее вероятно, решает остаться на месте, но с небольшой вероятностью p , заданной как глобальный параметр модели, агент делает ход «на понижение»: выбирает соседнюю клетку с наибольшим числом связей. Это сделано по аналогии с симулированным отжигом [Kirkpatrick, Gelatt, Vecchi, 1983].

В текущей версии модели рассматривается «игровое поле» размером 40×40 ячеек. В начальный момент на каждой ячейке находится 5 агентов, карта каждого агента выбирается случайным образом и при этом поворачивается на случайный угол, пропорциональный $\pi/2$. Далее карты (технологический профиль) каждого агента остаются неизменными. После начальной инициализации игрового пространства и агентов запускается эволюция. На каждом шаге эволюции для совершения одного шага случайным образом с равной вероятностью выбирается один агент.

Поскольку на каждом вычислительном шаге ход делает, как указано выше, только один агент, имеет смысл ввести понятие «эпоха» — это число элементарных шагов, равное полному числу агентов на поле.

3. Общие результаты моделирования

Можно сразу отметить, что на данный момент наибольший интерес, по ряду причин, представляют результаты моделирования в режиме учета только нелокальных (дальних) связей, хотя результаты эволюции на основе локальных связей также представлены ниже.

На рис. 3а представлены результаты эволюции модели Technoscape со следующими начисленными параметрами:

- размер поля: 40×40 ;
- начальная плотность агентов: 5 (на ячейку);
- вероятность хода на понижение: 0,02;

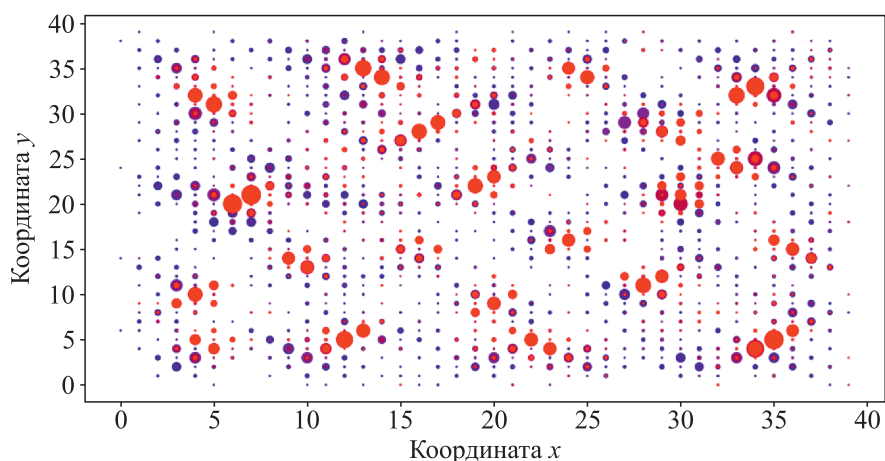


Рис. 3а. Пять эпох эволюции: 100, 200, 300, 400, 500 шагов на агента

- локальные связи: выключено;
- дальние связи: включено;
- число шагов: 500.

На рисунке приведены три временных среза (эпохи) эволюции: 100, 300 и 500 шагов. Видно, что на карте возникают локализованные «города» на фоне пустого пространства. Цвет кружочков соответствует эпохе (меняется от синего к красному), а размер пропорционален населенности города.

На рис. 3б приведены результаты эволюции за 2500 шагов с теми же настроечными параметрами. Разными цветами (но теперь от красного к синему) отображаются эпохи 500, 1000, 1500, 2000, 2500 шагов.

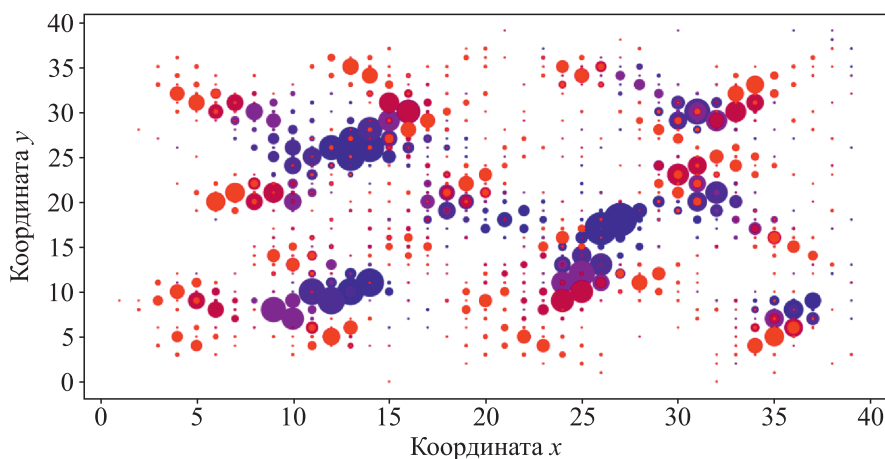


Рис. 3б. Пять эпох эволюции: 500, 1000, 1500, 2000, 2500 шагов на агента

Типовая картина расселения агентов при учете только локальных связей будет приведена ниже.

Видно, что в случае использования только дальних связей размер «городов» увеличивается, в то время как число городов уменьшается. Видно, что даже относительно крупные города могут исчезать.

Кроме этого, можно наблюдать очень интересное явление. На рис. 3б сначала отрисованы более поздние эпохи (синие), а затем более ранние (таков алгоритм построения графика). Можно видеть, что самые крупные города на поздних стадиях эволюции либо очень быстро (за 500 шагов из 2500 или еще быстрее) выросли из «старых», но маленьких городов, которые очень долго не росли, либо вовсе возникли на «ровном месте».

В связи с исчезновением процветающих до этого городов, уместно вспомнить работу [Yasutomi, 1995]. В этой работе Ясутоми поставил интересную, важную и принципиально новую задачу в мире сложных систем: все ищут механизмы самоорганизации, но никто не пытается понять, каковы должны быть *единые правила эволюции*, которые давали бы одновременно как самоорганизацию («рождение»), так и самодезорганизацию («смерть»). Ясутоми получил такие эволюционные правила для «искусственных» денежных систем средневекового Китая.

Technoscape демонстрирует именно такой тип динамики, и его уместно отнести к *сложному*. При этом в модели Ясутоми достаточно сложно описывается состояние агента и еще более сложны правила обновления этого состояния и поведения агента. Состояние агента включают переменную *view*, описывающую знания о рынке других агентов, как их видит данный агент, по всем имеющимся на рынке товарам. Именно из этой рефлексии и возникают «деньги» — товар, который готовы принимать большинство участников рынка как универсальное платежное средство.

В системе Technoscape состояние агента тоже не очень простое, но более просто очерченное — есть просто технологический профиль. Правила же поведения агента значительно проще, и в конечном счете все сводится просто к вычислению скаляра (числа связей) и принятия решения о перемещении.

Признаки сложного поведения обсуждаются также в разделе «Устойчивость траекторий по Ляпунову».

На рис. 4а даны распределения (по результатам вычислительного эксперимента) городов по размерам для трех эпох: 800, 1700 и 2500 шагов. Численность городов (число агентов в ячейке) разделена на диапазоны (1, 2), (2, 4), (4, 8), (8, 16), (16, 32), (32, 64), (64, 128), (128, 256). Город попадает в диапазон (a, b), если количество агентов в данном городе (ячейке) $a \leq N < b$.

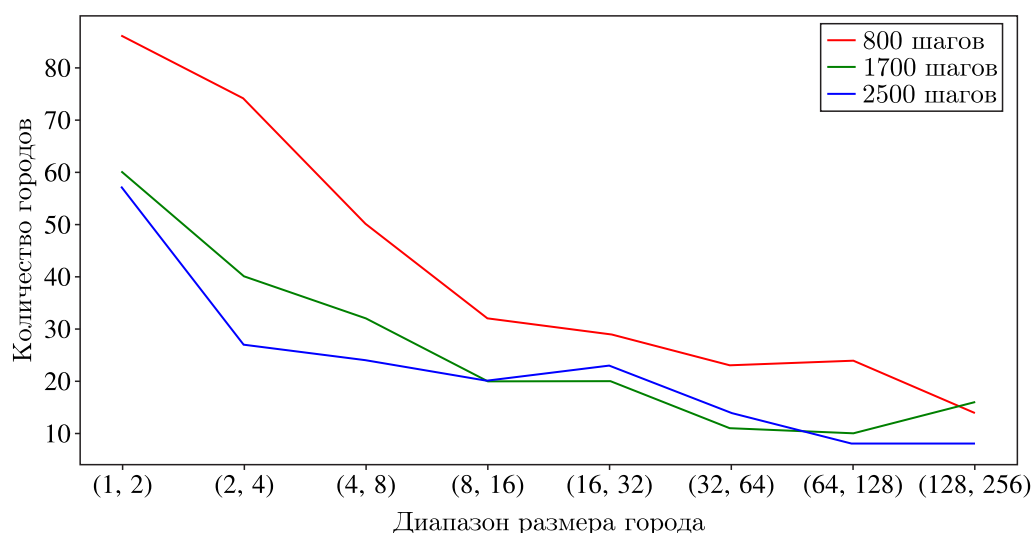


Рис. 4а. Распределение городов по размерам (дальние связи, вероятность шага на понижение $p = 0,02$)

На рис. 4б дано распределение, по результатам вычислительного эксперимента, городов по размерам в более детальной зависимости от числа шагов эволюции (в среднем на одного агента).

Интерес представляют характерные колебания, накладывающиеся на средний тренд почти для всех диапазонов. Примерный период этих колебаний — $T \cong 150 \div 200$ шагов эволюции (в среднем на одного агента). Чем выше население города в том или ином диапазоне, тем менее выражены колебания; тем не менее колебания видны даже для самых высоких диапазонов. Можно наблюдать, что каждый всплеск для данного диапазона соответствует провалу для следующего за ним по возрастанию диапазона. Автор полагает, что это свидетельствует о механике образования больших городов: более мелкие города периодически «рассыпаются», с тем чтобы агенты собрались в новые, более крупные города.

Это предположение хорошо согласуется с визуальным представлением пространственно-временной эволюции системы Technoscape на рис. 3б и комментарием к нему. Эта гипотеза заслуживает более детального изучения эволюции и построения некоторой модели или интерпретации данного явления.

В частности, хотелось бы понять происхождение периода колебаний T . Во всех экспериментах, описанных в настоящей публикации, начальная плотность агентов одна и та же и составляет $d = 5$ агентов на ячейку. На данном этапе исследований в качестве простейшей вариации проведены вычислительные эксперименты для $d = 3$ и $d = 7$. Зависимости периода T от плотности d не обнаружено, во всяком случае в этом небольшом интервале. Более детальное исследование требует дальнейшей работы.

Если период T не зависит от плотности d , то крайне интересно понять, чем же этот период определяется.

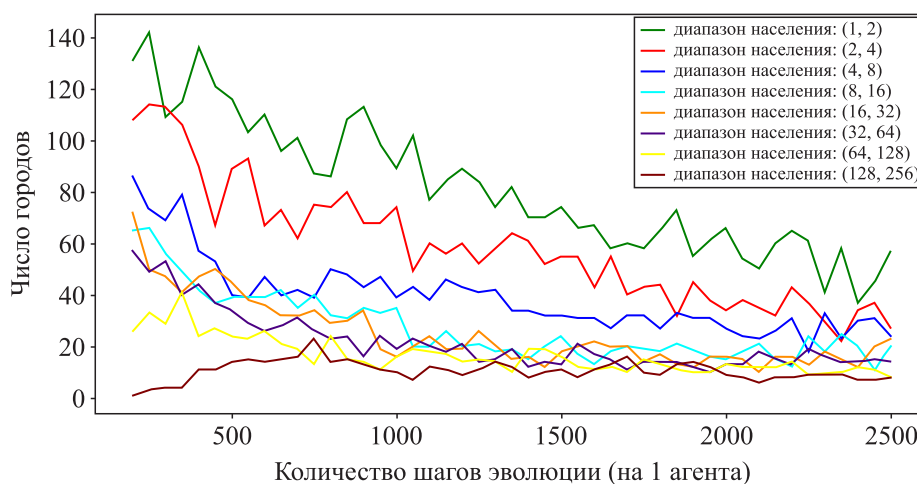


Рис. 4б. Распределение городов по размерам (дальние связи, вероятность шага на понижение $p = 0,02$)

На рис. 5 приведено (полное) число связей в «городе» в зависимости от размера «города». Эта зависимость интересна в связи с известной зависимостью числа патентов в городе от размера города: сейчас считается [West, 2017], что это линейная зависимость. Мы видим рост связей города более сильный, чем линейный, но возникает вопрос о том, как трактовать наши «связи» и как они соотносятся с инновационной активностью города. Этот вопрос требует дальнейшего исследования.

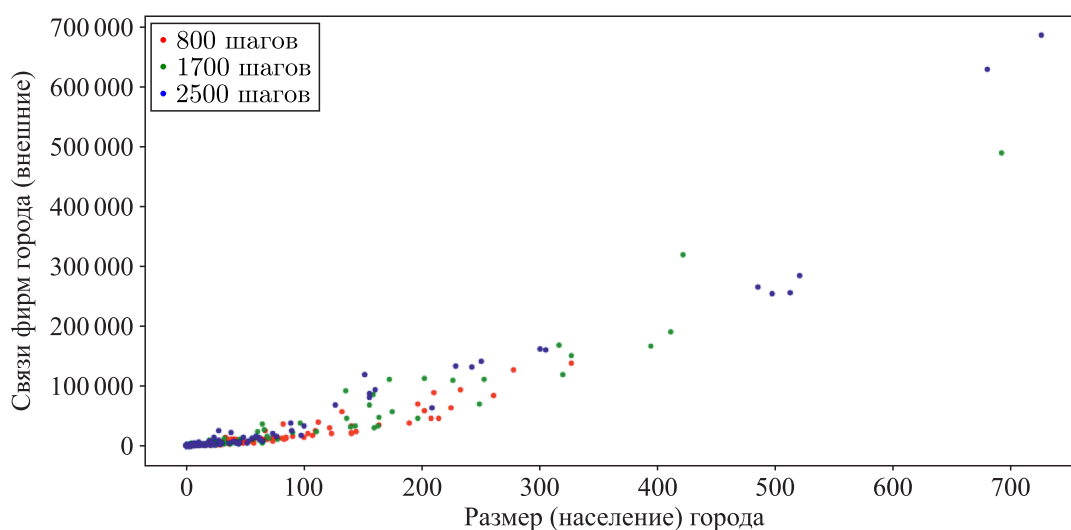


Рис. 5. Зависимость числа всех связей фирм города от размера города; 2500 шагов, дальние связи

4. Устойчивость траекторий по Ляпунову

В ходе исследования системы Technoscape был проведен следующий вычислительный эксперимент. При достижении 500 шагов «игровое поле» замораживается. Создается 5 копий этого поля, после чего для каждого из них запускается эволюция до достижения 2500 шагов. После чего фиксируется расхождение траекторий.

Напомним, что одинаковые начальные условия не означают одинакового протекания дальнейшей эволюции, по двум причинам:

- 1) на каждом шаге моделирования случайно, с равной вероятностью, выбирается агент для совершения шага;
- 2) каждый агент может с вероятностью p совершить шаг «на понижение», что эмулирует случайный риск агентов.

Номинально для исследования устойчивости по Ляпунову мы должны брать малое отклонение от траектории и изучить ее дальнейшее поведение. В нашем случае нет необходимости искусственно создавать малое отклонение в силу указанных стохастических свойств поведения агентов. Достаточно просто заново запустить эволюцию с теми же начальными данными в выбранный момент времени.

На рис. 6 приведены нанесенные совместно результаты эволюции пяти разных «поточков» (версий эволюции) с одинаковыми начальными условиями для 1500, 2000 и 2500 шагов (в среднем на агента). Каждому потоку (версии эволюции) соответствует свой цвет, всего 5 цветов от чистого синего для 1-го потока до чистого красного для 5-го потока, с промежуточными тональностями для 2-го, 3-го и 4-го потоков.

Качественно ситуацию можно описать следующим образом. Во-первых, видно, что 5 траекторий с одинаковыми начальными условиями, конечно, расходятся. Однако описать количественно характер этого разбегания не так просто.

Например, в районе ячейки игрового поля с примерными координатами (17, 30) на эпохе 1500 шагов наблюдается соседство крупных красных, синих и бордовых городов. Это соседство сохраняется для эпохи 2000 шагов, но к эпохе 2500 шагов это соседство разрушается: красные и бордовые города вместе сильно сдвигаются от синих.

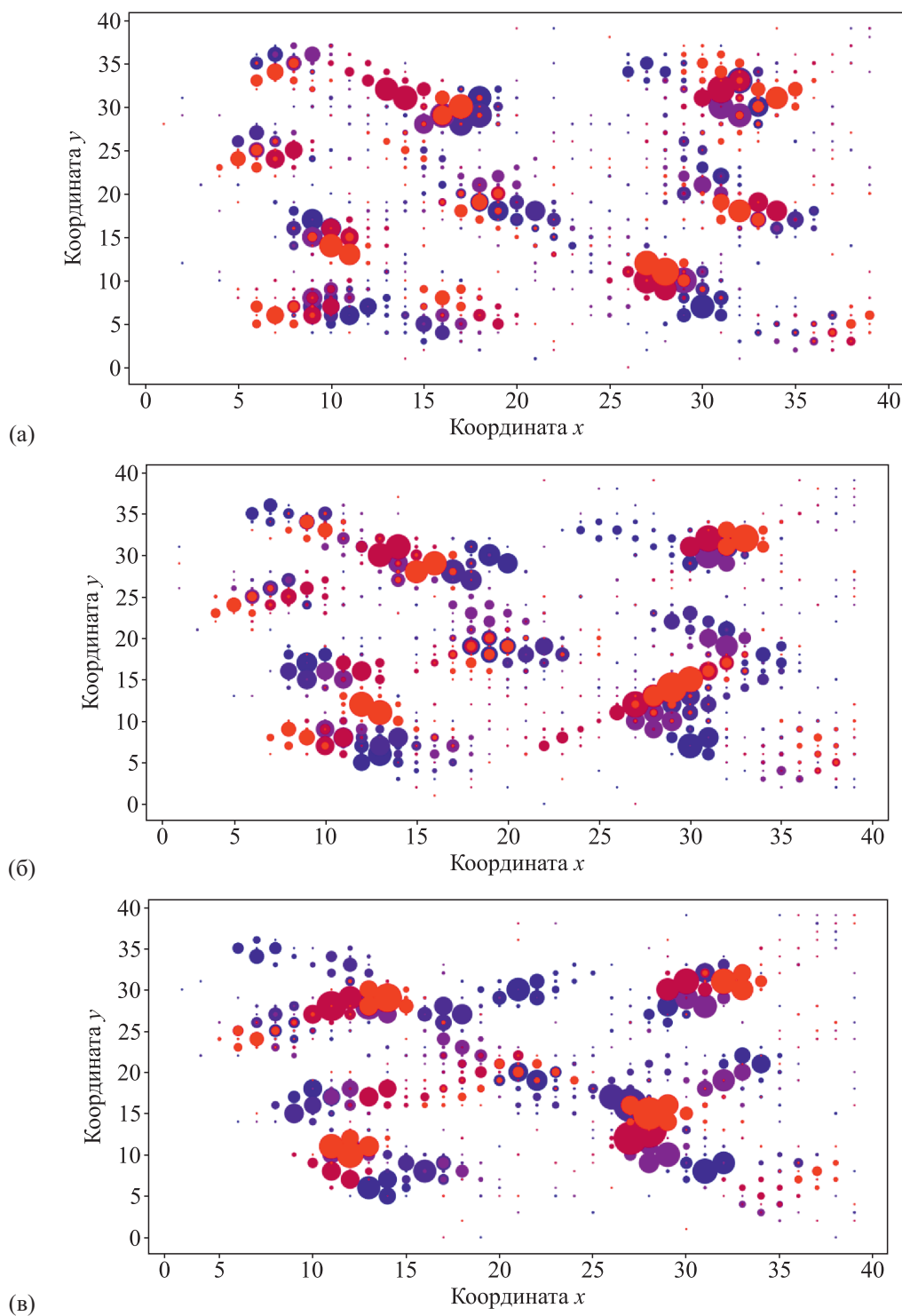


Рис. 6. Разбегание траекторий по Ляпунову, дальние связи, 5 версий истории: (а) 1500 шагов; (б) 2000 шагов; (в) 2500 шагов

То есть мы наблюдаем разбегание траекторий, но на некоторый достаточно продолжительный отрезок эволюционного времени это разбегание стабилизируется. В некоторый момент разбегание возобновляется, но при этом некоторая часть траекторий остается «склеенной»: красные и бардовые совместно удаляются от синих.

На взгляд автора, такая динамика в чем-то перекликается с описанной выше ситуацией в рамках одного потока, когда стабильный в течение длительного времени город внезапно «разбегается» либо, наоборот, стабильно бывший малонаселенным город вдруг резко разрастается.

При этом совершенно четко прослеживается крупномасштабная устойчивость как минимум четырех крупных агломераций городов, расположенных на главных диагоналях квадрата игрового поля. Можно говорить и о других агломерациях, но они чуть менее четко выражены.

Выработка адекватного математического аппарата для описания динамики такого типа, на наш взгляд, еще дело будущего. Сейчас можно утверждать, что имеет место сложная динамика (см. раздел «Выводы»).

В случае использования только локальных связей разбегания траекторий не происходит после достижения примерно 300 шагов (на агента), когда возникает стабильное распределение по большому числу малонаселенных городов.

5. Влияние фактора риска на поведение агентов

Интересно было установить, насколько существенным в эволюционных правилах является возможность — с малой вероятностью (было выбрано значение $p = 0,02$, пока оно не варьировалось) — совершать шаги на понижение выгоды (как при симулированном отжиге).

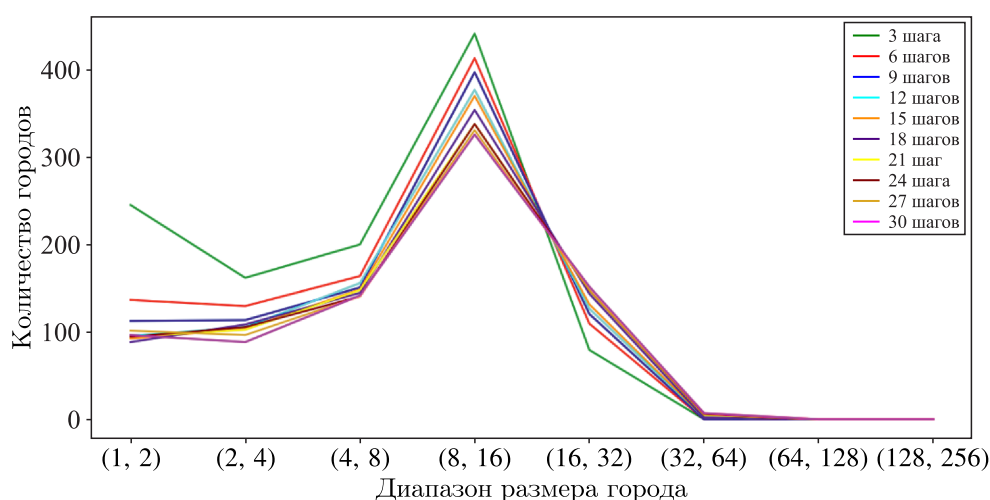


Рис. 7а. Распределение городов по размерам (дальние связи, вероятность шагов на понижение $p = 0,0$)

На рис. 7а и 7б приведена в разных представлениях эволюция распределения городов по размерам для 30 шагов (в среднем на агента) и для 300 шагов. Видно, что распределение очень быстро — в пределах 100 первых шагов — стабилизируется, и никакой существенной динамики далее не происходит.

Полученные данные можно проинтерпретировать следующим образом. Видно, что уже на самых первых трех шагах появляются города с населением в диапазоне от 8 до 16. Теоретически, для этого достаточно всего несколько первых эпох эволюции. Но покидать эти малые города у агентов уже нет никаких причин, и картина расселения надолго стабилизируется.

Отсюда можно сделать вывод, что шаги «на понижение» играют исключительно важную роль в появлении сложного поведения системы. В частности, автор полагает, что необходимо исследовать влияние вероятности «шага на понижение» на период описанных выше колебаний распределения городов по размерам.

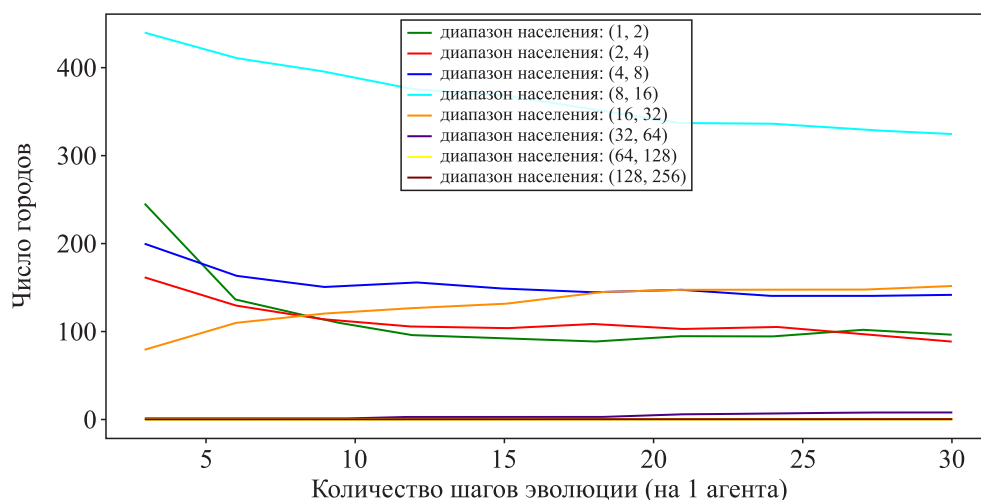


Рис. 76. Распределение городов по размерам (дальние связи, вероятность шагов на понижение $p = 0,0$)

6. Выводы

1. Автор полагает, что в целом обнаружен новый тип *самоорганизации в сложных системах*, сочетающий элементы локальных и нелокальных взаимодействий. Самоорганизация состоит в том, что агенты – носители технологических навыков концентрируются в узлах сети «городов», будучи изначально равномерно распределенными по пространству. При этом центры концентрации не остаются стабильными, а претерпевают сложную коэволюцию.

Наиболее известная модель такого типа — модель сегрегации Шеллинга — близка к описанной, но в некотором смысле противоположна по исполнению. В модели Шеллинга агент «видит» только ближайших соседей, но может перемещаться глобально — в любой квартал города. В предложенной модели всё наоборот: агент «видит» далеко, а перемещается только локально, причем это имеет свой наглядный экономический смысл.

Правила эволюции в предложенной системе лишь весьма схематично напоминают реальные правила поведения современных хайтек-фирм, но тенденция к постоянному смещению центров производства действительно подтверждается. С другой стороны, и автор это постоянно подчеркивает, модель допускает развитие и глубокую модификацию по целому ряду параметров.

Как отмечалось выше, система Technoscape находится в русле парадигмы «искусственной жизни/экономики», а это парадигма мягкого моделирования. Это значит, что можно говорить только об опосредованной связи с реальными системами. Говорить о верификации модели в буквальном смысле не приходится. Тем не менее польза моделей такого класса в том, что они помогают задать принципиально новые вопросы о реальных системах — такие, которые ранее просто не возникали.

В данном случае имеет смысл обратить внимание на то, что в системе Technoscape наблюдается сильное взаимодействие локальных и нелокальных переменных, и они, *судя по всему*, «перепутаны» — невозможно разделить переменные, как происходит во многих задачах математической физики. Локальная динамика (в виде коротких перемещений агентов, в том числе с малой вероятностью — шаги «на понижение») может оказывать критическое влияние на крупномасштабную (глобальную) структуру всей системы — эффект «переманивания». Важно отметить, что к этому приводят именно редкие (маловероятные) локальные шаги «на понижение».

Хотя крупномасштабная структура глобального расселения агентов меняется медленно, и ее влияние на быстрые локальные переменные очевидно, но, *судя по всему*, не выполняется

принцип подчинения Г. Хакена [Haken, 2004], который давно рассматривается почти как аксиома самоорганизации в сложных системах: здесь имеется не одностороннее, а двустороннее влияние быстрых и медленных переменных.

2. Динамика описанной системы, по крайней мере в режиме «только дальние связи», демонстрирует свойства *сложности*. Автору наиболее близко определение сложности, разработанное в теории клеточных автоматов в работах Кристофера Ленгтона. Согласно Ленгтону, сложная динамика есть упрощенно — некоторое сочетание колебательной, фиксированной и хаотической динамики. Ленгтон получил количественный критерий на параметр λ , получаемый из правил перехода клеточного автомата, по которому динамика такого клеточного автомата будет фиксированной, колебательной, хаотической или сложной [Lansing, 2003].

Система Technoscape демонстрирует сочетание колебательной динамики — но не конкретных агентов, а специально подобранных агрегатов (количества городов), с «хаосом» — если под этим понимать непредсказуемое разбегание траекторий.

На данный момент нами установлен простейший параметр, в данном случае — логический (учет или не учет агентом локальных или дальних связей), который управляет переключением между простой (фиксированная точка) и сложной динамикой.

Более детальное изучение переходов между разными типами динамики еще предстоит. На данный момент в модели всего два свободных параметра: число агентов на ячейку d и вероятность шага «на понижение». Сейчас почти всегда у нас $d = 5$ и почти всегда $p = 0,02$. Выше было описано, как в специальных случаях изучались выделенные отклонения от этих значений. Кроме этих двух, хотелось бы провести изучение зависимости динамики системы от следующих параметров:

- от начального распределения агентов по пространству;
- от продолжительности жизни агентов (сейчас они бессмертные);
- от распределения технологий по агентам (сейчас наборы технологий выбраны в некотором смысле наугад, см. конец § 2);
- от вероятности мутаций этих технологий (что сейчас также не рассматривается);
- от возможности рекомбинации технологических профилей разных агентов (как в генетических алгоритмах).

3. Мы полагаем, что развитие модели возможно по крайней мере в нескольких наиболее важных направлениях:

- совместное использование агентами локальных и дальних связей;
- ограничение дальних связей некоторыми выделенными, для каждого агента, направлениями диагоналей;
- учет конечной времени жизни агентов;
- эволюция агентов, понимаемая как изменение в модельном времени их технологических профилей;
- исследование возможности технологической дифференциации городов;
- изучение возможной иерархии «городов» — то, на чем делает акцент модель Кристаллера.

Список литературы (References)

- Balter M.* The First Cities: Why Settle Down? The Mystery of Communities // *Science*. — 1998. — No. 5393.
- Batten D. F.* Discovering Artificial Economy. — Westview press, 2000.
- Beinhocker E. D.* The Origin of Wealth. — Harvard Business School Press, 2006.
- Bunch B., Hellemans A.* The History Of Science And Technology. — Houghton Mifflin Company, 2004.
- Christaller W.* Die zentralen Orte in Sddeutschland. — Jena: Gustav Fisher, 1933.
- Epstein J. M., Axtell R. L.* Growing Artificial Societies: Social Science From the Bottom Up. — Brookings Institution Press & MIT, 1996.
- Haken H.* Synergetics: an introduction Nonequilibrium Phase Transitions and Self-Organization in Physics, Chemistry and Biology. — Springer, 2004.
- Hausmann R., Hidalgo C. A., Bustos A. S., Chung M. C. S., Jimenez J., Simoes A., Yildirim M. A.* The Atlas Of Economic Complexity. Mapping Paths To Prosperity. — 2016.
- Hornborg A.* The Power of The Machine. Global Inequalities in Economy, Technology and Environment. — Altamira Press, A Division of Rowman & Littlefield Publishers, Inc., 2001.
- Jacobs J.* The Economy of Cities. — 1969.
- Kirkpatrick S., Gelatt Jr. C. D., Vecchi M. P.* Optimization by Simulated Annealing // *Science*. — 1983. — Vol. 220, No. 4598.
- Langton C. G.* Artificial life: an Overview. — MIT Press, 1997.
- Schelling T. S.* Models of Segregation // *American Economic Review, Papers and Proceedings*. — 1969. — Vol. 59, No. 2. — P. 488–493.
- Schelling T. S.* Micromotives and Macrobehavior. — New York: W. W. Norton, 1978.
- Lansing J. S.* Complex Adaptive Systems // *Annual Review of Anthropology*. — 2003. — DOI: 10.1146/annurev.anthro.32.061002.093440
- Ulam S., Schrandt R.* Some Elementary Attempts at Numerical Modeling of Problems Concerning Rates of Evolutionary Processes. — Los Alamos preprint LA-4573-MS, December 1970.
- West G.* Scale: the universal laws of growth, innovation, sustainability, and the pace of life in organisms, cities, economies, and companies. — New York: Penguin Press, 2017.
- Yasutomi A.* The Emergence and Collapse of Money // *Physica D*. — 1995. — Vol. 82. — P. 180–194.