



ИПМ им.М.В.Келдыша РАН

К 95-летию С.П.Курдюмова

К 95-летию
со дня рождения
С.П. Курдюмова



Горизонты
математического моделирования
и теория самоорганизации

П.В. Куракин

**Пространственная самоорганизация
глобальной системы
торгово-промышленных фирм**

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Куракин П.В. Пространственная самоорганизация глобальной системы торгово-промышленных фирм // Горизонты математического моделирования и теория самоорганизации. К 95-летию со дня рождения С.П. Курдюмова. — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2024. — С. 154-163.

<https://doi.org/10.20948/k95-9>

<https://keldysh.ru/e-biblio/k95/9.pdf>

Пространственная самоорганизация глобальной системы торгово-промышленных фирм

П. В. Куракин

Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН

Аннотация. Предлагается вычислительная модель большого коллектива взаимодействующих агентов, напоминающих торгово-промышленные фирмы. Каждый такой агент (фирма) не разделяет производственную и торговую деятельность: то, что производится, сразу выставляется на продажу. При этом каждый агент владеет уникальным набором производственно-технологических навыков, то есть в совокупности производит уникальную продукцию. В то же время отдельные навыки и виды продукции частично перекрываются с навыками и видами продукции других агентов/фирм. Каждый агент/фирма стремится увеличить число своих коммерческих (производственно-торговых) связей. Связи устанавливаются между агентами напрямую на основе специфических парных совпадений указанных навыков: то, что производит один агент, одновременно необходимо какому-то другому агенту для его деятельности. Это является основой для установления коммерческой связи. Связи устанавливаются только между агентами, которые определенным образом «видят» друг друга в пределах рассматриваемой территории. Динамика системы приводит к изначально неочевидному эффекту пространственной концентрации агентов в выделенных локациях, которые можно рассматривать как «города». Долгосрочная эволюция системы приводит как к появлению новых городов, так и к их исчезновению, а также дрейфу по рассматриваемой территории. Созданная модель названа «Technoscape».

Ключевые слова: промышленно-торговые фирмы, пространственная самоорганизация, образование городов, Technoscape

Spatial self-organization of a global system of industrial-trading firms

P.V. Kurakin

RAS Trapeznikov Institute of Control Sciences

Abstract. I suppose a computational model for a large collective of interacting agents, where the agents resemble some industrial and trading firms. In fact, each agent or firm actually makes no difference between production and trad-

ing: anything produced is immediately ready for sale. Each agent possesses a unique set of technological skills for producing different goods. Meanwhile, some skills or products (we assume these practically the same) of different agents / firms do overlap. Next, each agent tries to increase the number of its commercial (that is, trading) links. Agents establish such links on the base of a specific pairwise coincidence of aforementioned technological skills: something, which some agent produces, turns to be necessary for another one. Each agent can “see” other agents in a specific way (both locally and remotely), so the links can be established only between agents which see each other within the considered territory. The dynamics of described system leads to un-obvious effect of spatial concentrations of agents in selected locations, which we treat as “cities”. The long-term dynamics leads to both emergence and disappearance of cities.

Keywords: industrial and trading firms, spatial self-organization, city formation, Technoscape

Система Technoscape: общее описание и механизм эволюции

Представим неких «искусственных» агентов, имитирующих промышленно-торговые фирмы, расположенные по всему миру. Искусственных в том же смысле, который вкладывают в понятие «искусственная жизнь» [1]. Другими словами, мы не стараемся получить в модели количественное совпадение с реальными процессами и/или предсказание реальных событий. Однако модель такого класса позволяет выделить «наиболее типичные» аттракторы изучаемой системы (жизни, экономики).

Каждый такой агент представляет собой совокупность k технологических навыков. Произвольный навык будем описывать парой целых чисел (a, b) . В текущей реализации модели используются диапазон $2 \leq k \leq 4$ и ненулевые значения a, b в диапазонах $-2 \leq a \leq 4$ и $-2 \leq b \leq 2$. Двуместные кортежи вида (a, b) выбраны в качестве модельного описания «технологий» как простейший, на взгляд автора, математический объект, обладающий *внутренней структурой* (что, разумеется, можно оспорить, но, скорее, это дело вкуса).

Агенты располагаются на квадратной решетке размером 40×40 ; в начальный момент модельного эволюционного времени агенты распределены по этой доске равномерно с плотностью 5 агентов на ячейку.

Эволюция системы состоит в том, что каждый агент стремится установить с другими агентами максимальное количество связей. *Одна* связь может быть установлена при соблюдении следующих условий:

- агенты должны «видеть» друг друга, при этом они могут находиться как в одной ячейке (тогда говорят о локальных связях), так и в разных ячейках (тогда говорят о нелокальных связях);
- связь устанавливается между отдельными «технологическими навыками» одного и второго агента при выполнении критерия $(a_1, b_1) = -(a_2, b_2)$, т.е. $a_1 = -a_2$ и $b_1 = -b_2$.

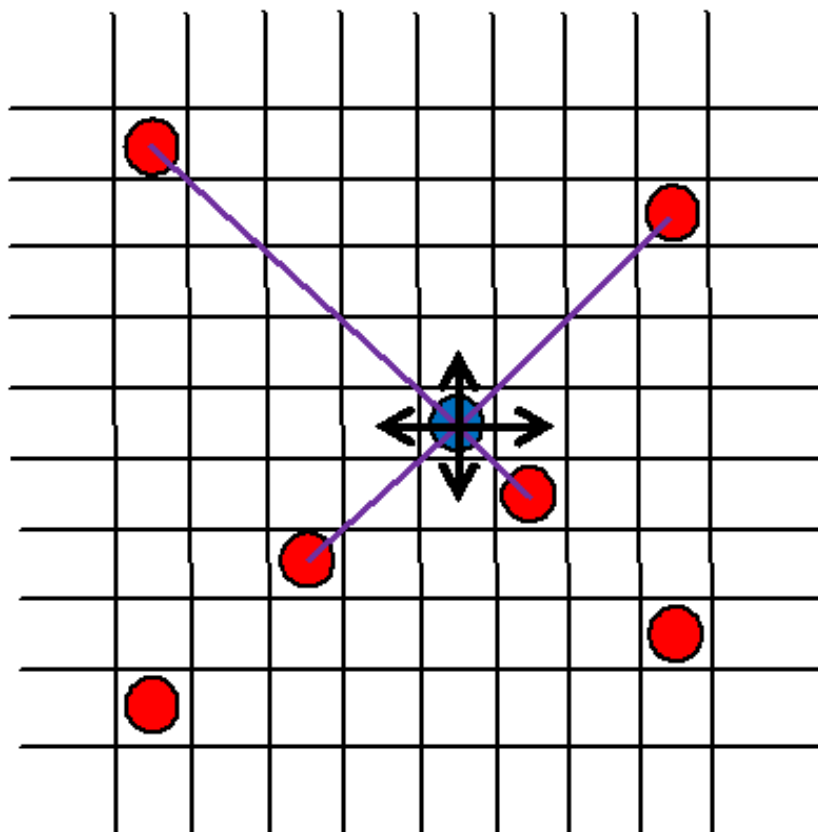


Рис. 1. Агент в центре «видит» других агентов и может перемещаться на одну ячейку в направлении стрелок

Связь (то есть, формально установленное соответствие), определенную подобным образом, можно интерпретировать как установление производственно-коммерческих отношений между двумя фирмами. При этом второе правило означает, что продукция или услуга, создаваемая одной фирмой, востребованы другой фирмой; иначе – каждый из «навыков» агента вида (a, b) можно рассматривать двояко – как выпускаемую продукцию или как поступающее извне сырье, расходные материалы или оборудование. Отсюда понятен знак «минус» в условии.

Для установления связи необходимо, в соответствии с первым правилом, чтобы агенты «видели» друг друга. Когда агенты находятся в одной и той же ячейке, то считается, что они заведомо видят друг друга. Нелокальная связь может быть установлена, если агенты находятся на одной диагонали, и при этом между ними на этой диагонали нет других агентов ни в каких ячейках (рис. 1).

Повторим: цель каждого агента – максимизация числа связей. Для достижения этого агенты могут перемещаться по описанной решетке; перемещение возможно на одну клетку ходом ладьи за один элементарный шаг эволюционного времени.

Элементарный шаг эволюции состоит в том, что на решетке случайно выбирается один агент. Агент подсчитывает количество *всех* связей, доступных ему в данном положении на решетке. В зависимости от настроек модели могут учитываться только нелокальные, либо только локальные, либо локальные и нелокальные связи одновременно. Представленные в данной работе результаты относятся к режиму «только нелокальные связи» – это самый интересный режим.

После этого агент изучает возможность переместиться в одном из четырех направлений ходом ладьи на одну клетку. В каждой из этих клеток агент тоже вычисляет полное количество всех возможных связей. Если в лучшем из этих положений число связей больше, чем в текущей позиции, то агент туда *заведомо* перемещается. Однако перемещение в лучшую из указанных 4-х прилегающих ячеек возможно и в том случае, если в этой ячейке число связей ниже, чем в текущей ячейке. Это происходит с некоторой небольшой вероятностью p . Это параметр называется *вероятностью хода «на понижение»*.

Число элементарных эволюционных шагов, равное числу агентов (в актуальных запусках модели оно равно $N = 40 \times 40 \times 5 = 8000$), названо *эпохой*. Содержательные изменения состояния системы происходят на масштабах порядка сотен эпох.

Всей системе в целом автор предпочел дать название Technoscape. Этот выбор объяснен в следующем разделе.

Предшественники: аналогии и отличия

Конструкция предложенной модели разработана автором полностью самостоятельно. Тем не менее, оказалось, что полученная система объединила свойства двух различных довольно известных моделей социально-экономической динамики на квадратных решетках. Это модель Sugarscape искусственного общества Джошуа Эпштейна и Роберта Экстелла [2] и модель внутригородской сегрегации Томаса Шеллинга [3].

В модели Sugarscape Эпштейна–Экстелла по территории квадратной решетки распределен некий ресурс – «сахар» (отсюда название модели). Агенты блуждают по решетке в поисках этого ресурса. Без сахара агенты умирают. Поедание сахара позволяет им продолжить существование. Агенты имеют конечную продолжительность жизни, которая определяется тем, насколько хорошо они питаются. Сахар похож на растительность в том смысле, что он воспроизводится, несмотря на то, что агенты его непрерывно потребляют. Начальное распределение «сахара» по пространству может быть произвольным. Как однородным, так и неоднородным. Агенты претерпевают совместную эволюцию, в результате которой устанавливается некоторое распределение агентов как по уровню «доходов», так и по продолжительности жизни. Агенты Эпштейна–Экстелла воспри-

нимают окружающую обстановку и перемещаются только локально, в пределах близлежащих клеток. То есть, модель Sugarscape чисто локальная.

Построенная модель названа Technoscape, отчасти для того, чтобы подчеркнуть родство с системой Sugarscape, хотя здесь и не было сознательного копирования и наследования. При этом первый корень в названии подчеркивает технологическую компоненту социальной эволюции, в противовес ресурсной.

В модели сегрегации Т. Шеллинга агенты воспринимают обстановку тоже локально. Они подсчитывают количество «своих» и «чужих» соседей в ближайших кварталах. В соответствии с этим они принимают решение. Остаться жить в текущем квартале или переехать. Однако в результате решения о переезде они могут переместиться сколь угодно далеко в пределах «города», т.е. заданной прямоугольной решетки. Итак, модель Т. Шеллинга – комбинированная, локально-нелокальная.

В системе Technoscape агенты взаимодействуют друг с другом и с пространством новым и парадоксальным, на первый взгляд, способом. Агенты «видят» произвольно далеко – «ходом слона», т.е. по диагоналям, а вот перемещаться, наоборот, могут только локально – «ходом ладьи» на одну клетку (рис. 1).

Однако такой способ наблюдать пространство и перемещаться в нем можно интерпретировать очень просто, если рассматривать агентов как торговцев на дальние расстояния. В каждом положении на карте торговец имеет удаленных партнеров (исторический пример: торговые города–республики Южной Италии, торговавшие с Византией и арабами), но менять свое положение он может только локально, малыми шагами.

Основные результаты моделирования

Первый и главный результат компьютерной эволюции системы Technoscape состоит в образовании «городов» – мест устойчивой (долгоживущей) концентрации агентов. Этот эффект можно наблюдать на рис. 2. Обратим внимание, что этот эффект наблюдается в режиме «только нелокальные связи». Это в самом деле удивительное и контринтуитивное явление, так как агенты накапливаются в ячейках, где «их никто не ждет» – нет никаких «локальных» причин стремиться в такую ячейку, локальные связи не учитываются.

На рис. 2 приведены распределения *плотности агентов* (размер кружочка пропорционален числу агентов в ячейке) для эволюции со значением вероятности хода на понижение $p = 0,02$ сразу для нескольких этапов эволюции: 500, 1000, 1500, 2000, 2500 эпох.

Данные для нескольких эпох отображены на одной и той же решетке, но разными цветами: цвета эпох меняется от красного к синему, причем сначала нанесены данные более поздних эпох (синие), более ранние эпохи (красные) нанесены позже.

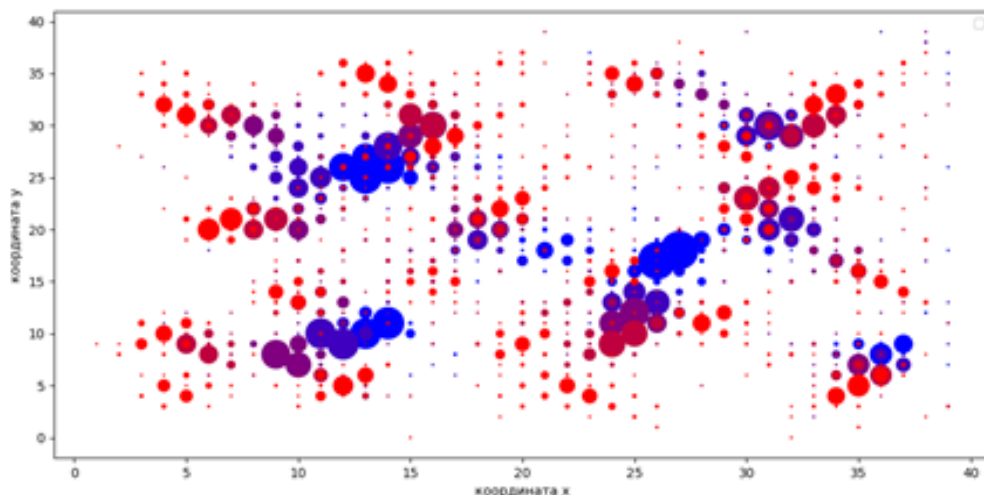


Рис. 2. Образование и исчезновение городов в системе Technoscape

Нанесение на рисунок плотности агентов сразу для нескольких эпох на решетке позволяет увидеть *второй* важный эффект, возникающий в эволюции системы. «Города», то есть места концентрации, не только возникают, но и исчезают, и этот процесс идет непрерывно. При этом большие города могут появляться в результате как постепенной эволюции из малых городов (с медленным накоплением агентов), так и очень быстро.

Близкий, еще более форсированный вариант быстрого возникновения крупного города можно наблюдать в области (27, 20) – там большой город возник явно за последние 500 эпох на подходе к отметке 2500.

Например, про «агломерацию городов» с координатами в районе примерно (13, 25) можно утверждать, что они возникли из малых городов, но неожиданно быстро. Видны красные «зародыши» на уровне 500 эпох, виден конечный результат – крупные синие города к моменту 2500 эпох, но не наблюдается «промежуточных» малиновых городов. То есть, малые «красные» города долго существовали без роста, после чего в районе 2000 эпох началось их быстрое развитие.

С другой стороны, все красные «города» на рис. 2 погибли. В целом, видно, что количество крупных городов со временем падает, но их населенность возрастает. Динамику распределения городов по их размерам можно видеть на рис. 3.

Третий возможный интересный эффект в эволюции связан с гипотезой, требующей дополнительного расследования. Этот эффект можно условно назвать *осцилляторной перекачкой населения* из менее крупных городов в более крупные. Судя по всему, он довольно часто наблюдается для малых городов, например, для пары диапазонов (1, 2) и (2, 4). На рис. 4 видно, что на фазе роста городов диапазона (1, 2) (зеленая линия) происходит падение числа городов диапазона (2, 4) (красная линия), и наоборот.

Менее четкая, однако похожая картина наблюдается для пар диапазонов (2, 4) и (4, 8), а также (4, 8) и (32, 64) (фиолетовая линия).

Можно предложить следующую правдоподобную модель механизма «перекачки». Мы работаем только с дальними связями, поэтому по мере того, как «город» растет, становится всё более выгодно покинуть его, чтобы оказаться на удалении от этого города. Такой «предатель» может «увидеть» сразу много своих бывших «земляков». Проверка этой рабочей гипотезы требует дальнейших вычислительных экспериментов.

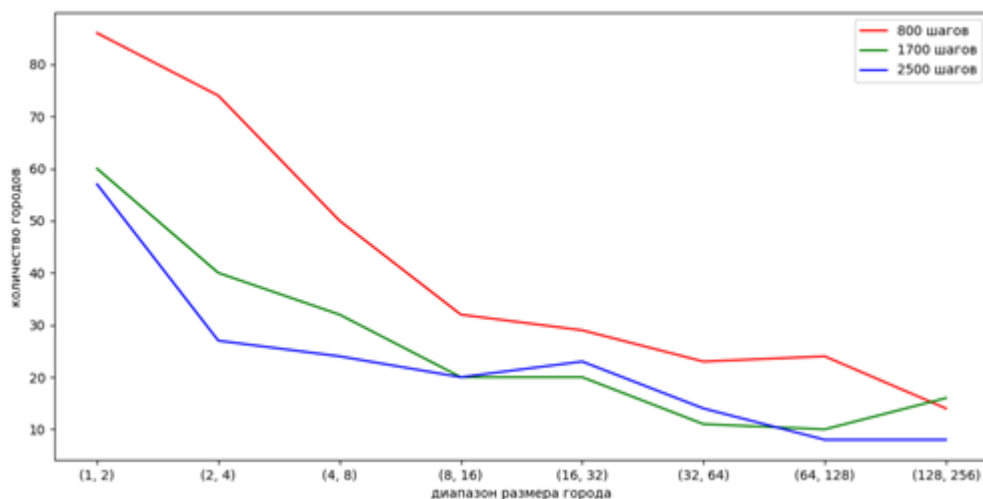


Рис. 3. Динамика распределения городов по их населенности в системе Technoscape

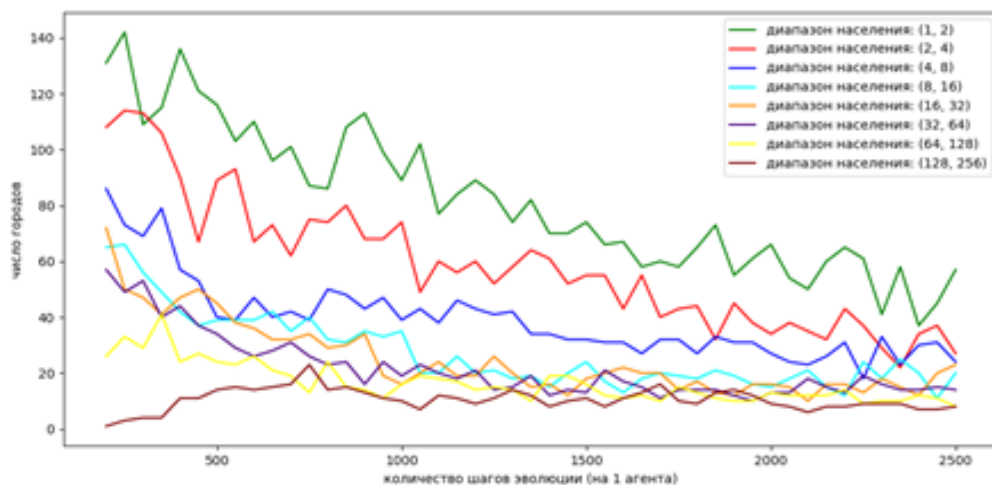


Рис. 4. Эффект осцилляторной перекачки населения

Устойчивость траекторий эволюции

При исследовании системы Technoscape также изучалась устойчивость траекторий. При достижении 500 эпох картина распределения агентов на решетке «замораживается». Создается 5 копий этого поля, после чего для каждого из них запускается эволюция до достижения 2500 эпох. После этого фиксируется расхождение траекторий.

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.

Обычно для исследования устойчивости мы должны взять 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.

Моделирование показало, что имеет место «разбегание траекторий», которое заметно отличается от известных до сих пор модельных динамических систем, как регулярных, так и хаотических. Кратко, разбегание существует, но за достаточно продолжительный отрезок эволюционного времени это разбегание стабилизируется, причем не для всех, а только для части траекторий. В некоторый момент разбегание возобновляется, но при этом некоторая часть траекторий остается «склеенной».

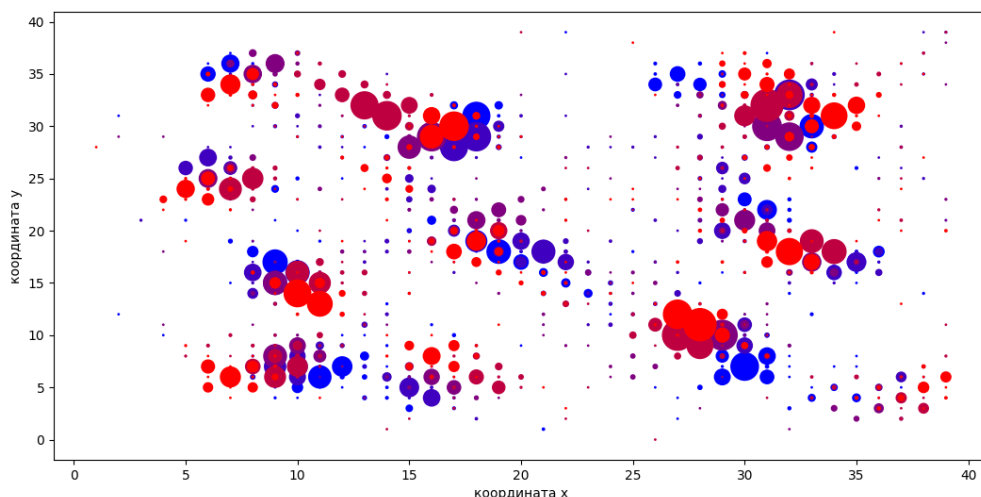


Рис. 5. Разбегание эволюционных траекторий, 5 версий истории, 1500 эпох

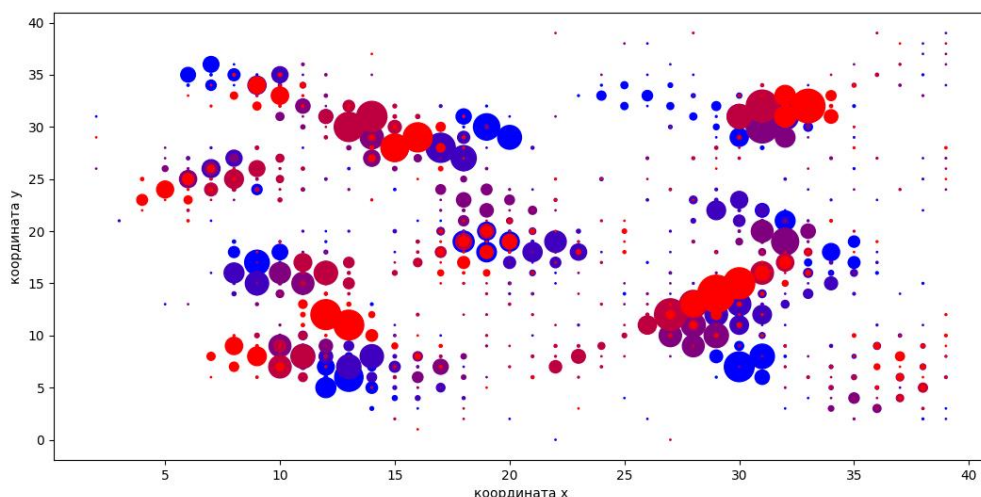


Рис. 6. Разбегание эволюционных траекторий, 5 версий истории, 2000 эпох

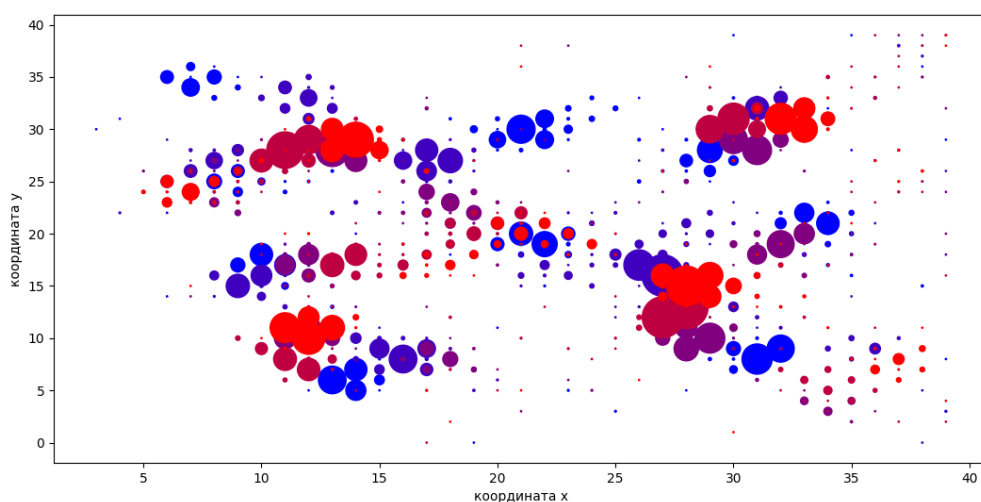


Рис. 7. Разбегание эволюционных траекторий, 5 версий истории, 2500 эпох

Для иллюстрации сказанного можно взглянуть на рис. 5, 6 и 7, где приведены нанесенные совместно результаты эволюции 5 разных «поток» (версий эволюции) с одинаковыми начальными условиями для 1500, 2000 и 2500 эпох. Каждому потоку (то есть – 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.

Выводы

С нашей точки зрения, система Technoscape демонстрирует качественно новый, ранее не рассматриваемый тип самоорганизации в про-

странственно-распределенных системах. Новое состоит в том, что самоорганизация наблюдается локально (концентрация агентов в «городах»), в то время как локальное взаимодействие агентов отсутствует, а имеет место только нелокальное влияние.

Второе – яркое и качественно новое свойство данного вида самоорганизации – совершенно новый тип разбегания траекторий. Это свойство напоминает явление прерывистого равновесия в биологической эволюции [4]. Однако всё же здесь речь о другом. Можно также говорить о некоем прерывистом равновесии, но применительно не к одной выбранной траектории, а к пучку возможных траекторий.

В заключение необходимо отметить, что все описанные эффекты имеют место в приведенных количественных масштабах только при наличии шагов на понижение с характерным значением вероятности $p = 0,02$. Это напоминает роль аналогичных по смыслу «невыгодных» шагов в известном методе оптимизации «симулированного отжига» для задач высокой размерности [5].

Литература

1. *Langton C.G.* 1997. Artificial life: An overview. MIT Press, 1997.
2. *Epstein J.M., Axtell R.L.* Growing artificial societies: Social science from the bottom up. – Brookings Institution Press & MIT, 1996.
3. *Schelling T.S.* Models of segregation // American Economic Review, Papers and Proceedings. 1969, 59(2), 488-493.
4. *Prothero D.R.* Punctuated equilibrium at twenty: A paleontological perspective // Skeptic. 1992, 1(3), 38-47.
5. *Kirkpatrick S., Gelatt C.D., Vecchi M.P.* Optimization by Simulated Annealing // Science. 1983, 220(4598), 671-680.