

АГЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

К. С. Чиркунов¹

Аннотация: Рассмотрена агентная система, имитирующая развитие экономики страны (строительство новых производств, повышение общего уровня доходов) на базе модели территориальной системы. Элементы модели представлены в виде автономных единиц, способных к взаимодействию друг с другом, — агентов.

Ключевые слова: агентные алгоритмы переговоров; территориальная система; моделирование; экономическое районирование

1 Введение

Для моделирования процессов формирования и развития территориальных образований изначально применялись методики «сверху вниз» с последующей корректировкой решений «снизу вверх», которые предполагали организацию вычислений с выделенным центром. Такой подход использовали А. Г. Аганбегян, К. А. Багриновский, А. Г. Гранберг (об этом упоминается в работе [1]). Новые подходы с использованием агентов (М. Вулдридж, Й. Шоэм, К. Литон-Браун и др.) позволяют описать территориальную систему как совокупность взаимодействующих между собой агентов [2, 3]. Решения на глобальном уровне (на уровне всей системы) возникают как результат локальных коопераций ее элементов.

Для чего нужно развивать новые подходы при уже неоднократно успешно зарекомендовавшем себя на практике существующем аппарате моделирования развития территориальных систем?

Ответ на этот вопрос можно найти, например, в работе известного американского философа науки Пола Фейерабенда [4]. По его мнению, ряд наиболее важных формальных свойств теории обнаруживается благодаря контрасту, а не анализу. Ученый, желающий более глубоко уяснить свои концепции, должен вводить новые.

Не вдаваясь, подобно Полу Фейерабенду, в крайний релятивизм, примем его утверждение о том, что всякая устоявшаяся методология — даже наиболее очевидная — имеет свои пределы. Отступим от нескольких догматов, которые были «провозглашены» в рамках традиционного моделирования территориальной системы нашей страны, и предпримем попытку смоделировать систему как совокупность взаимодействующих агентов при от-

сутствии вертикальных иерархических связей на верхнем уровне. При этом сохраним ряд изначально существовавших в этой области понятий.

В процессе построения агентной модели необходимо решить целый ряд задач: определить структуру агентов и их коммуникации, описать среду системы, составить алгоритмы кооперативных взаимодействий (в том числе алгоритм определения набора новых производств, алгоритм установления межрайонных, внешних товарно-материальных связей и т. д.), привести обоснования использованных решений. Все эти вопросы так или иначе должны быть затронуты в работе.

2 Территориальная система как совокупность агентов экономических районов

В данном разделе опишем общие базовые понятия и простую схему агентной модели территориальной системы.

2.1 Что такое агент?

В этом подразделе следовало бы дать четкую и ясную формулировку понятия «агент» и перейти к следующему. Однако не все так просто. Известно по меньшей мере шесть различных определений этого понятия в работах, посвященных агентному моделированию, из которых ни одно нельзя назвать общим, полным и ясным. Наиболее важным свойством агента можно считать автономность, иногда также отмечают обучаемость (способность к адаптации), но зачастую это свойство опускается. Агент действует в некоторой среде и обладает

¹Институт систем информатики им. А. П. Ершова СО РАН, cyril.chirkunov@computer.org

способностью получать информацию об объектах, которые в ней находятся. Будем считать, что среда является полностью наблюдаемой, т. е. агент может получить информацию обо всех объектах, которые в ней находятся (более формально составляющие среды будут описаны далее). Также агент может оказывать воздействие на среду и изменять ее состояние. Надо сказать, что среда в данной модели не является детерминированной для одного агента, т. е. изначально она не гарантирует только один исход после любого действия агента. Однако агенты могут договариваться друг с другом и, как следствие, обеспечивать детерминированность среды для определенного набора действий. В данной работе будем предполагать, что агенты действуют одновременно, а среда является динамичной и дискретной.

Отдельно выделяют характеристики интеллектуальных агентов (в некоторых работах — интеллектуальных в слабом смысле).

1. Реактивность — способность своевременно реагировать на воспринятые изменения среды.
2. Проактивность — способность проявлять инициативу для достижения своих целей.
3. Социальные навыки — способность к взаимодействию с другими агентами «ради дела».

Будем считать, что агенты предлагаемой модели обладают следующими характеристиками: они способны оперативно реагировать на изменения внешней конъюнктуры, могут выступать инициаторами переговоров с другими агентами и взаимодействовать с другими агентами ради общей и собственной выгоды.

Каждый агент имеет функцию полезности, которая в численном выражении показывает, насколько хорошо «живется» агенту в системе. Агент прилагает все усилия, чтобы повысить ее значение, но при этом старается увеличить и полезность общественную, которая задается как сумма значений функции полезности всех агентов. В качестве значений функции полезности будет выступать доход, получаемый агентом в системе.

Популяция взаимодействующих агентов совместно со средой образует *многоагентную систему* (МАС).

2.2 Схема модели

Теперь покажем, каким образом можно представить территориальную систему в виде МАС.

На рис. 1 показана простая схема такой модели. Агенты, представляющие экономические районы (агенты ЭР), потребляют ресурсы, которые

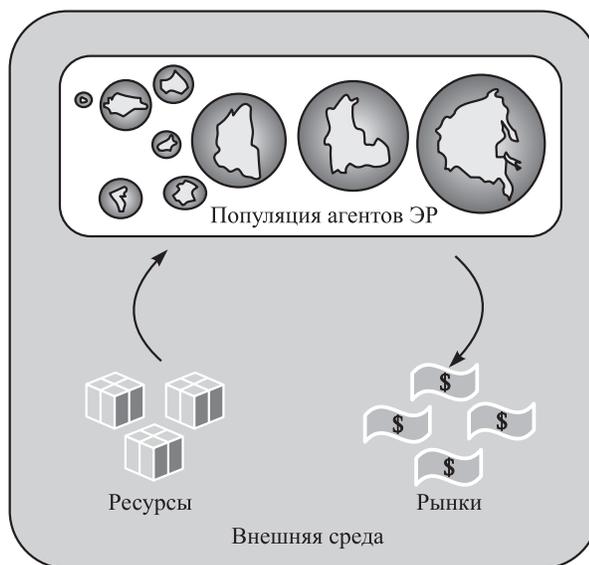


Рис. 1 Взаимодействие популяции агентов ЭР и внешней среды

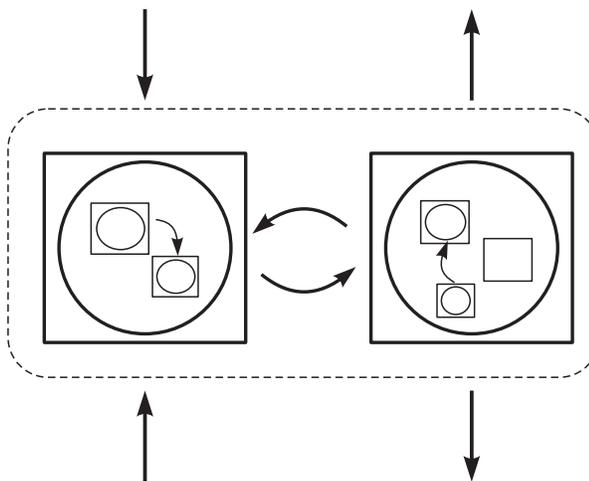


Рис. 2 Схема устройства модели территориальной системы

предоставляет им внешняя среда (т.е. территориальная система поглощает импортную продукцию), и, в свою очередь, генерируют товарную массу для внешней среды (т. е. система экспортирует на внешние рынки произведенную на своей территории продукцию).

На схеме, приведенной на рис. 2, территориальная система описывается посредством активных сущностей (агентов) и пассивных сущностей

(объектов). Агенты обозначаются кругами, объекты, которые они могут использовать, изображены в виде окружающих их квадратов. Агенты верхнего уровня иерархии (большие кружки) содержат в себе популяцию агентов и объекты нижнего уровня (маленькие кружки и квадраты). Пунктиром обозначена граница популяции агентов. Как и на рис. 1, стрелками показаны материально-товарные связи. Однако здесь уже видно, что агенты взаимодействуют и друг с другом: помимо внешних связей (жирные линии со стрелками), направленных либо наружу, либо внутрь популяции, появились и внутренние (линии со стрелками средней толщины и тонкие). Большими квадратами обозначены ареалы районов, малыми — площадки для размещения территориально-производственных комплексов (ТПК). Большие круги — агенты ЭР, генерирующие товарный поток в рамках своей межрайонной специализации и поглощающие материалы и продукцию, необходимую для производства и других хозяйственных нужд.

Иными словами, если агент ЭР₁ нуждается в какой-либо продукции из межрайонных отраслевых специализаций ЭР₂, то он «договаривается» с агентом ЭР₂ и между ними устанавливается товарно-материальная связь. Маленькие кружки показывают агентов ТПК, отношения между которыми устанавливаются по такому же принципу, как и между агентами ЭР, но только внутри их родителя. Детальное рассмотрение агентов ТПК выходит за рамки данной работы.

Можно заметить, что некоторые квадраты-площадки являются вакантными. Это значит, что на данном месте еще не размещен ТПК. Территориально-производственные комплексы могут динамически формироваться внутри незанятых площадок в ходе процесса симуляции.

При описании модели использовалось представление о территориально-производственном комплексе, которое содержится в работах Н. Н. Колосовского.

Определение 1. *Территориально-производственный комплекс — совокупность расположенных рядом друг с другом взаимосвязанных производств.*

Понятие было введено в экономическую географию в 1940-х гг. В исходном определении речь шла о взаимосвязанных и взаимообусловленных производствах, от размещения которых на определенной территории достигается дополнительный экономический эффект за счет использования общей инфраструктуры, кадровой базы, мощностей и т. д.

Определение 2. *Экономический район — это территориально связанные части единого народного хозяйства страны с различной специализацией, постоян-*

ным обменом производимых товаров и другими экономическими отношениями.

Более детально о модели территориальной системы будет рассказано в следующем разделе.

3 Математическое и алгоритмическое описание задачи развития территориальной системы

Введем динамическое (т. е. меняющееся в ходе исполнения) множество товарных рынков M , которое будет иметь следующую структуру:

$$M = M^{\text{EX}} \cup M^{\text{NR}} \cup M^{\text{I}},$$

где M^{EX} — множество товарных рынков за пределами территории страны, внешние рынки; M^{NR} — множество межрайонных товарных рынков, описывающее потребности районов в тех или иных видах продукции, ресурсов и т. д.; M^{I} — множество внутренних районных товарных рынков, описывающее потребности, которые могут быть удовлетворены только в рамках района.

Элемент $m \in M$ имеет следующую структуру: $m = \langle pr, d \rangle$, где $pr \in PR$ — это товар из множества возможных товаров, $d \in C$ ($C \in \mathcal{R}$) — денежная величина объема рынка.

Обозначим через TS множество территориальных систем:

$$TS = \{ts | ts — территориальная система\}.$$

Введем множество ER экономических районов, которое формально можно задать так: $ER = \{er | er — экономический район\}$.

Будем считать, что все территориально-производственные комплексы являются элементами одного и того же множества TPC .

Далее опишем функцию развития территориальной системы.

Функция U действует на множестве TPC , и ее аргументы и значения — элементы этого множества: $U : TPC \rightarrow TPC$.

Доход, получаемый системой, будем обозначать через R , где R — это функция, определенная на множестве территориальных систем TS и отображающая его на множество действительных чисел \mathcal{R} . В качестве аргумента функции выступает производственная территориальная система, а ее значением служит действительное число.

Определение 3. U — программа развития для $ts \in TS$, если $R(U(ts)) > R(ts)$.

Определение 4. Будем говорить, что U^* — оптимальная программа развития для $ts \in TS$ среди всех программ развития U для $ts \in TS$, если $R(U^*(ts)) \leq R(U(ts))$ для любой такой U .

Территориальную систему $ts \in TS$ представим в виде структуры $ts = \langle ER_0, L_{TS}, env \rangle$.

Итак, территориальная система описывается при помощи входящих в нее экономических районов ($ER_0 \subseteq ER$), связей между ними (которые задаются через функцию $L_{TS} : ER \times ER \rightarrow M^{NR}$, действующую на пару экономических районов и отображающую ее на подмножество множества межрайонных товарных рынков) и структурой внешней среды.

Структура внешней среды $env \in ENV$ (где ENV — множество всех сред) специфицируется как $env = \{S^{EX}, M^{EX}\}$, где S^{EX} — множество внешних ресурсов (товарных, сырьевых и т.д.), M^{EX} — множество внешних рынков.

Далее определим структуру самого экономического района.

Элемент $er \in ER$ можно представить в виде $er = \langle TPC_0, SQ, L_{TPC_0} \rangle$, где $TPC_0 \subset TPC$ — множество территориально-производственных комплексов, SQ — множество площадок, на которых можно разместить ТПК, L_{TPC_0} — это функция материально-товарных связей между ТПК, $L_{TPC_0} : TPC_0 \times TPC_0 \rightarrow M^I$. Она отображает два ТПК на некоторое подмножество множества внутрирайонных рынков.

Теперь рассмотрим, что в себя включает элемент $sq \in SQ$. Он имеет структуру $sq = \langle G, NR, NP \rangle$, где участок двумерного пространства $G \subset \mathcal{R}^2$ задает локацию площадки, $NR \subseteq S^I$ (S^I — множество внутрирайонных ресурсов) обозначает имеющиеся на площадке множество природных ресурсов, $NP \subseteq LP^I$ (LP^I — внутрирайонные трудовые ресурсы) обозначает имеющиеся на площадке трудовые ресурсы.

Опишем теперь активные сущности системы — агентов.

Агенты экономических районов. Такие агенты имеют собственное внутреннее состояние, состоящее из элемента $er \in ER_0$, могут взаимодействовать как друг с другом, так и со средой, в которую помещена система. Внешнее состояние агента описывается набором производственных специализаций экономического района в виде $\langle f_1, \dots, f_n \rangle$, где f_i является элементом множества производственных специализаций $f_i \in F$, $i \in \{1, \dots, n\}$. В рамках данной модели предполагается, что производственные специализации ЭР образуются за счет внешних специализаций ТПК, находящихся на территории ЭР.

В модели также используются агенты ТПК, но их описание выходит за рамки данной работы.

Будем считать, что любая производственная специализация f соответствует некоторому элементу из множества товаров $pr \in PR$.

3.1 Переговоры о специализации

В процессе функционирования территориальной системы агенты экономических районов договариваются друг с другом о наборе специализаций системы. Каждый агент ЭР способен предложить только какой-то ограниченный спектр специализаций, в то время как все множество имеющихся в системе специализаций может быть шире. Более того, каждый район может делать лишь частичный вклад в конкретную специализацию системы. Например, один экономический район er_1 производит 60%, а другой экономический район er_2 производит 40% от всего объема продукции pr , поставляемой на внешний рынок. Однако для этого случая трудоемкость реализации переговоров даже для десяти районов и нескольких десятков специализаций является весьма впечатляющей, поэтому в данной работе будем исходить из предположения, что каждый экономический район в рамках специализации производит 100% требуемого товара.

Алгоритм ведения переговоров между агентами состоит из двух шагов:

- (1) генерация предложений;
- (2) выбор единственного предложения из уже имеющихся.

В зависимости от выбранного метода реализации шаги могут повторяться по нескольку раз. Например, это может произойти, когда агенты на каждой итерации алгоритма получают новую дополнительную информацию, которая влияет на состав генерируемых ими предложений.

Представим сделку λ между агентами ЭР в следующем виде:

$$\lambda = \left\{ \underbrace{f_1^1, \dots, f_{n_1}^1}_{\text{набор специализаций } er_1}, \dots, \underbrace{f_1^{|ER_0|}, \dots, f_{n_{|ER_0|}}^{|ER_0|}}_{\text{набор специализаций } er_2} \right\},$$

где f_j^i — производственная специализация er_i из набора, предлагаемого агентом экономического района er_i .

Каждый экономический район может иметь несколько возможных наборов собственных специализаций

$$\left\{ \begin{array}{l} \{f_{1,1}, \dots, f_{1,n_{j_1}}\}, \\ \{f_{2,1}, \dots, f_{2,n_{j_2}}\}, \\ \dots, \\ \{f_{m,1}, \dots, f_{m,n_{j_m}}\}, \\ \{ \} \end{array} \right\}.$$

Заметим, что это множество содержит в качестве элемента также и пустое множество.

Все множество сделок Λ описывается декартовым произведением множеств возможных наборов собственных специализаций экономических районов $er \in ER_0$:

$$\Lambda = \left\{ \begin{array}{l} \{f_{1,1}^1, \dots, f_{1,n_{j_1,1}}^1\}, \\ \{f_{2,1}^1, \dots, f_{2,n_{j_2,1}}^1\}, \\ \dots \\ \{f_{m_1,1}^1, \dots, f_{m_1,n_{j_1,m_1}}^1\}, \end{array} \right\} \times \dots$$

$$\dots \times \left\{ \begin{array}{l} \{f_{1,1}^{ER}, \dots, f_{1,n_{j_1,1}}^{ER}\} \\ \{f_{2,1}^{ER}, \dots, f_{2,n_{j_2,1}}^{ER}\} \\ \dots \\ \{f_{m_{ER},1}^{ER}, \dots, f_{m_{ER},n_{j_{ER},m_{ER}}}^{ER}\} \end{array} \right\}$$

Теперь попытаемся оценить трудоемкость построения такого множества. Это важно ввиду следующего. Предположим, имеется некоторое множество сделок и необходимо выбрать такую из них, при которой территориальная система получит наибольший доход среди всех остальных сделок.

Так как элементы множества не упорядочены, задача выбора сделки (задача поиска в неупорядоченном массиве) в худшем случае будет иметь трудоемкость, пропорциональную числу элементов этого множества.

В данной работе будем исходить из предположения, что один экономический район производит товаров в рамках своей специализации вполне достаточно, чтобы полностью покрыть потребность в них на внешнем рынке, а также считаем, что число новых возможных специализаций для района и размер предлагаемого набора специализаций для развития невелики: 3 и 2 соответственно. Также учитываем то, что состав специализаций района может иметь переменную длину от 0 до 2 (т.е. множество предложений может содержать пустое множество). Однако полное число возможных специализаций для территориальной системы может быть и больше. Число экономических районов равно 12 (в соответствии с делением, принятым в [5]). При таких допущениях подсчитаем максимальное число сделок:

$$(C_3^2 + C_3^1 + 1)^{12} = 13841287201 \approx 1,4 \cdot 10^{10}.$$

Замечание: можно уменьшить размер получаемого множества путем введения ограничения на набор

специализаций для системы, т.е. он не должен содержать повторяющихся позиций, так как одинаковые специализации приводят к конкуренции, что, в свою очередь, влечет снижение доходов агентов и, следовательно, всей системы.

Алгоритм 1. Выбор набора специализаций территориальной системы.

1. Выбирается агент, принимающий предложения от других агентов, — посредник. Например, это может быть агент, соответствующий экономическому району с номером 1.

Замечание: экономические районы можно упорядочить по названиям в лексикографическом порядке, а затем присвоить им порядковые номера.

2. Агенты ЭР формируют наборы возможных специализаций и посылают их агенту-посреднику.
3. Агент-посредник на основе полученной информации формирует множество сделок и выбирает ту, которая принесет наибольший доход территориальной системе, с помощью функции R .
4. Окончательная сделка рассылается агентом-посредником всем остальным агентам.
5. Агенты из полученного сообщения извлекают свое множество специализаций.

Примечание 1. Можно преобразовать данный алгоритм в полностью децентрализованный, если обязать агентов рассылать свои предложения друг другу. Каждый агент, зная функцию R , может самостоятельно сформировать множество сделок и выбрать среди них наиболее полезную для популяции, после чего определить свой состав производственных специализаций. Можно утверждать, что все агенты получают в итоге одну и ту же сделку, если задать дополнительное условие: в случае, если доход от разных сделок одинаковый, то предпочтение отдается той, которая лексикографически меньше всех других.

Примечание 2. Для получения приемлемой сделки также можно использовать *монотонный протокол уступок и стратегию Жозена*, описанные в книге Вулдриджа, посвященной многоагентному моделированию [2]. Такое решение не гарантирует достижения глобального максимума на множестве сделок, однако с помощью него возможно заключение Парето-оптимальных сделок.

3.2 Функции развития и алгоритм выбора специализаций района

Теперь перейдем к вопросу формирования предложений в рамках экономического района $er \in ER$.

Будем считать, что каждый экономический район $er \in ER$ уже имеет некоторую совокупность отраслей специализации $\{f_1, \dots, f_n\}$, которая формируется за счет входящих в его состав ТПК.

Введем семейство функций $CH : 2^F \rightarrow 2^F$ (где F , как уже упоминалось, является множеством производств по специализациям):

- 1) CH_0 — пустая функция, которая отображает аргумент сам на себя;
- 2) CH_1 — функция, которая «ликвидирует» производства с отрицательной прибылью. Предположим, что имеется совокупность производственных отраслей экономического района $er \in ER_0$ представленная в виде $\{f_1, f_2\}$, причем f_2 является убыточной. Тогда $CH_1(\{f_1, f_2\}) = \{f_1\}$. Если убыточным окажется и производство f_1 , то значением функции станет пустое множество.
- 3) CH_2 — функция, отвечающая за применение новых технологий. Она не изменяет размер множества отраслей специализации экономического района $er \in ER$, однако способствует повышению доходности отрасли. Пусть имеются новые технологии для f_1 . Тогда $CH_2(\{f_1, f_2\}) = \{f'_1, f_2\}$.
- 4) CH_3 — функция, отвечающая за открытие новой производственной специализации или освоение нового ресурса. Пусть $\{f_1\}$ — имеющийся набор специализаций для экономического района $er \in ER$ и появилась возможность открытия новой специализации f_2 . Тогда $\{f_1, f_2\}$ будет принадлежать к множеству области значений данной функции. Заметим, что вариантов открытия новой производственной специализации может быть несколько, соответственно, для одного аргумента может быть несколько значений функции. В данной работе будем рассматривать только случай, когда функция либо не определена (как для данного аргумента, так и вообще), либо имеет единственное значение. В нашем случае $CH_3(\{f_1\}) = \{f_1, f_2\}$.

Замечание: Функции CH_1, CH_2, CH_3 заданы лишь частично, т.е. они определены не на всем множестве 2^F . Доопределим их функцией CH_0 , которая определена на всем множестве 2^F .

Теперь опишем простой алгоритм принятия решения о применении той или иной функции из

семейства CH (он используется агентами ЭР для формирования наборов специализаций при проведении переговоров). Для этого введем дополнительную функцию дохода экономического района для заданного набора специализаций (которая определяется аналогично функции дохода для территориальных систем). Функция $R : ER \times F \rightarrow \mathcal{R}$ преобразует экономический район с заданным набором отраслей в величину дохода, который будет иметь район с такими производствами.

Алгоритм 2. Выбор программы развития района.

Входные данные: er и $\{f_1, \dots, f_n\}$ (экономический район er с набором специализаций).

Последовательно применяем функции CH_0, CH_1, CH_2, CH_3 к одному и тому же набору $\{f_1, \dots, f_n\}$ и среди результатов выбираем те, при которых функция R принимает наибольшее значение.

Выходные данные: результаты в виде $\{f_1^*, \dots, f_n^*\}$ (набор специализаций, оптимальный по доходу на множестве результатов применения функций из семейства CH от аргумента $\{f_1, \dots, f_n\}$ для района er).

Очевидно, $R(er, \{f_1, \dots, f_n\}) \leq R(er, \{f_1^*, \dots, f_n^*\})$.

Замечание 1. В силу того что функций всего четыре, можно использовать все получившиеся результаты (а не только оптимальные) для дальнейшего выбора набора специализаций территориальной системы. Это увеличивает пространство возможных решений на уровне системы.

(Правильнее будет сказать, что число классов функций заданного вида равно четырем, однако в данной работе считается, что каждый из классов содержит только один элемент.)

Применение функции CH_3 на внутрирайонном уровне может приводить к тому, что в er возникнет потребность в определенном товаре, что может привести к появлению межрайонного рынка $m \in M^{NR}$ так же, как и к увеличению числа внешних связей территориальной системы.

4 Заключение

В работе описан один из возможных подходов к моделированию развития территориальных систем. Были освещены далеко не все аспекты, а лишь самые ключевые моменты: представление территориальной системы с помощью взаимодействующих агентов, выбор программы развития экономического района, формирование набора специализаций территориальной системы путем переговоров. В написании статьи очень помогли

работы М. К. Бандмана, М. Вулдриджа, Ф. Котлера, Н. Н. Колосовского и др. [1, 2, 6, 7].

В дальнейшем планируется подробно остановиться на алгоритмах модернизации и формирования ТПК в пределах экономического района в рамках описанной формальной модели.

Литература

1. Бандман М. К., Бурматова О. П., Воробьева В. В. Моделирование формирования территориально-производственных комплексов. — Новосибирск: Наука, 1976.
2. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. — New York: John Wiley & Sons, 2002.
3. Shoham Y., Leyton-Brown K. Multiagent systems: Algorithmic, game-theoretic, and logical foundations. — Cambridge University Press, 2009.
4. Фейерабенд П. Против метода. Очерк анархистской теории познания / Пер. с англ. А. Л. Никифорова. — М.: АСТ, 2007.
5. Общероссийский классификатор экономических регионов ОК 024-95 (ОКЭР). Утвержден постановлением Госстандарта РФ от 27 декабря 1995 г. № 640, в ред. изменения № 1, ноябрь 1998 г., с изм. и доп. № 2/99, № 3/2000, № 4/2001, № 5/2001.
6. Котлер Ф. Маркетинг менеджмент. — СПб.: Питер, 2001.
7. Колосовский Н. Н. Теория экономического районирования. — М.: Мысль, 1969.