

УДК 334.012.82(519.866)

С. В. Лобова¹, Е. В. Понькина¹, А. В. Боговиз²

¹ Алтайский государственный университет
пр. Ленина, 61, Барнаул, 656035, Россия

² Национальный исследовательский университет
«Высшая школа экономики»
ул. Мясницкая, 20, Москва, 101000, Россия

Email: barnaulhome@mail.ru, ponkinaelena77@mail.ru
aleksei.bogoviz@gmail.com

ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭКОНОМИЧЕСКИХ КЛАСТЕРОВ КАК СИСТЕМЫ ВЗАИМОСВЯЗАННЫХ ЦЕЛЕЙ УЧАСТНИКОВ *

Рассматривается определение экономического кластера как системы взаимосвязанных интересов участников. Сформулированы обобщенные модели экономического кластера как целеустремленной системы, на основе которых возможно формирование различных прикладных математических моделей кластерных структур.

Ключевые слова: экономический кластер, модель целеустремленной системы, теоретико-игровой подход, модель экономического кластера.

В последние годы термин «кластер» стал популярным: практически все перспективные проекты развития территорий (например, «Стратегий-2020», комплексных инвестиционных программ муниципалитетов) содержат разделы, посвященные этим образованиям. Их спектр чрезвычайно широк: от информационных технологий до сельского хозяйства, от использования солнечной энергии до туризма. Один из фундаментальных тезисов, который объясняет этот факт, сводится к следующему: кластеризация экономики является основой для создания новых форм объединения знаний, стимулирует возникновение новых научно-технических направлений и их коммерческих приложений, способствует снижению затрат и повышению качества соответствующих наукоемких услуг за счет эффекта синергии и унификации подходов в качестве, логистике, инжиниринге, информационных технологиях, а также косвенным образом поддерживает сферу образования, университетскую науку.

Следует признать, что мода на употребление термина «кластер» заслонила собой смысл этого феномена. Сегодня кластером именуют практически любое объединение предприятий, что породило некоторое количество мифов, связанных с необходимостью территориального распределения предприятий-участников кластера, отраслевой локализацией, наличием управляющей компании и пр. Подробное исследование различных подходов к раскрытию сущности понятия кластер, их типов и способов организации (см., например, [1–3]) позволяет говорить о кластере как механизме взаимодействия, позволяющем участникам сохранить статус юридического лица и при этом сотрудничать друг с другом с целью достижения экономического симбиоза и, как следствие, получения конкурентных преимуществ по сравнению с другими субъектами хозяйствования.

* Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 11-01-98009 «Исследование организационно-экономических отношений участников кластера региона с использованием инструментов экономико-математического моделирования».

Экономический кластер есть результат самоорганизации субъектов экономической деятельности, преследующих собственные цели и действующих в рамках индивидуальных интересов, стратегические интересы которых взаимосвязаны и реализуются эффективнее за счет взаимодействия в рамках экономического кластера. Именно в таком понимании экономический кластер дает его участникам преимущество, именуемое агломерационной экономией. Эффект агломерационной экономии формируется за счет:

1) снижения различного рода трансакционных и производственных издержек вследствие экономии на масштабах и логистике;

2) плотности экономических субъектов на конкретной территории, что повышает степень инновационности производства (основным фактором которой отчасти является циркулирование идей);

3) миграции распространения знаний;

4) возникновения технологических партнерств, когда несколько взаимодействующих компаний (пусть даже конкурентов) координируют НИОКР, разработку продуктов, базовых технологий, которые затем претворяются каждым предприятием в конкретные конечные продукты.

В основе образования любого кластера лежат устоявшиеся явные или латентные связи между предприятиями, приобретающими при формировании кластера статус участников, что определяет теоретическую значимость вопросов формализации процессов функционирования экономических кластеров, принципов их образования, существования и развития, принципов согласования решений и эффективного взаимодействия участников.

Математическое моделирование интегрированных образований, прежде всего, отвечает целям и задачам исследования. Поэтому если исследованию подлежат стратегические интересы участников, мотивы их поведения в различных условиях (неопределенность, наличие конфликта интересов, риски), то исследуемый объект представляется в виде целеустремленной системы, элементарной единицей формализации которой выступает оптимизационная модель. Целеустремленная система – это система управления, кибернетическая система, основной функцией которой является достижение посредством реализации определенного поведения либо программы управления одной, либо нескольких целей. Области исследования целеустремленных систем касаются ряда вопросов, в частности: разработки программ управления, приводящих к достижению цели с заданной точностью (целевое управление); выбора оптимальной программы управления, обеспечивающей наилучшее достижение цели (оптимальное управление).

Традиционные подходы математического моделирования целеустремленных систем интегрированных образований базируются на теории моделирования иерархических систем, теории игр, теории активных систем. В целом, можно выделить два класса моделей целеустремленных систем: одноагентные и многоагентные. Рассмотрим теоретические аспекты формализации процессов функционирования экономических кластеров как целеустремленных систем в виде одно- и многоагентных моделей. В качестве целей анализа выступают:

а) обоснование методологии математического моделирования экономических кластеров, использование которой соответствует основным принципам их функционирования;

б) формулировка обобщенной динамической модели экономического кластера как целеустремленной системы.

Одноагентные модели. В концептуальном плане одноагентная модель Z^1 интегрированного образования (как целеустремленная система) включает одну или несколько целевых функций вида

$$z = F(x) \rightarrow \operatorname{extr}_{x \in X} \quad (1)$$

и систему ограничений $X = \{x \in R_+^N : g_k(x) \geq 0, k = 1, \dots, K\}$, описывающих правила принятия решений, где X – множество допустимых (приемлемых) решений, $g_k(x) \geq 0$ – функции, описывающие правила принятия решений. Детализация указанной модели осуществляется путем уточнения условий функционирования элементов (локальных ограничений), внутренних свя-

зей между элементами системы (связующих ограничений) и зависимости целевых свойств¹ интегрированного образования от результатов функционирования элементов (целевая функция).

К моделям интегрированных образований вида (1) относится, например, классическая модель объединения предприятий, хорошо изученная в литературе [4]. Используются такие модели и для исследования оптимального функционирования экономических кластеров [5]. В целом модель (1) представляет макромодель оптимального функционирования экономического кластера без учета внутренних конкурентных условий, предполагающую наличие некоторой единой, главной цели, приоритетной для всех участников интегрированного образования.

Трудности исследования моделей систем типа (1) связаны с различными аспектами, в частности с проблемами нахождения оптимальных решений, сложностью учета многообразия факторов внешней среды и их влияния на результативность системы, неустойчивость оптимального решения.

Решением модели Z^1 является вектор $x^* \in X : F(x^*) \succ F(x), \forall x \in X$ ². Стремление учесть всесторонние условия и правила принятия решений приводят к одной из проблем, в частности переопределенности задачи (избыточности системы ограничений), в таком случае $X = \emptyset$ и оптимальное управление найти невозможно ввиду отсутствия допустимых вариантов. Дробление задачи (1) и учет внутренней, сложной структуры системы, многообразия управляемых переменных приводят к возрастанию размерности, что существенно затрудняет численное решение и приводит к необходимости декомпозиции (разбиения) задачи на ряд подзадач. Недостаточность системы ограничений может привести к неединственности оптимального решения.

Влияние факторов внешней среды $w \in W$ в моделях типа (1) учитывается на уровне параметров модели сценарно, т. е. модель $Z^1(w_0)$ формализована для некоторого фиксированного состояния факторов внешней среды $w_0 \in W$. Решение задачи (1) дает представление об оптимальном управлении $x^*(w_0) \in X$, при котором целевая функция $F(x^*)$ достигает экстремального значения. Реализация вычислительных экспериментов для различных вариантов состояния факторов внешней среды w_0, w_1, \dots, w_L и решение серии задач $Z^1(w_0), Z^1(w_1), \dots, Z^1(w_L)$ позволит исследовать чувствительность оптимального управления $x^*(w)$ к изменению факторов внешней среды, определить границы его устойчивости. Исследование данных аспектов аналитически не всегда возможно.

При построении модели типа (1) в некоторых условиях происходит нивелирование переменных согласования внутренних связей между элементами системы – y_{kn}^l (интенсивность использования связи формы l между элементами k и n). Аналогичная ситуация возникает при переходе от задачи распределенного управления к задаче централизованного управления. Часть переменных согласования, описывающих внутренние взаимосвязи между элементами системы (например, внутривозрастные цены), в результате преобразований сокращается и их значения не оказывают никакой роли на результат функционирования системы в целом, но являются значимыми и определяющими результат функционирования элемента (организации), что влияет на уровень его мотивации в достижении глобальной цели. Этот аспект важен при моделировании экономических кластеров.

Использование моделей Z^1 для исследования экономических кластеров является ограниченным. В качестве основных недостатков являются:

- наличие одной, единой (глобальной) цели;
- подчинение локальных целей единой централизованной цели, что, как показано выше, не характерно для экономических кластеров, поскольку каждая организация, входящая в кла-

¹ Под целевыми свойствами системы понимаются свойства, которые рассматриваются субъектом управления в качестве индикаторов достижения цели.

² Знак « \succ » отражает отношение предпочтения.

стер, обладает автономностью, независимостью в принятии решений и, следовательно, максимизирует вектор собственных интересов, а не интересов центра;

- нивелирование некоторых внутренних переменных согласования решений между элементами, что приводит к недостаточности информации о реализуемости и внутренней согласованности оптимального плана на элементарном уровне строения кластера.

Таким образом, модели класса Z^1 не в полной мере учитывают свободу и независимость выбора решений организациями, входящими в интегрированное образование, а их применение требует дополнительных исследований и уточнение решения с учетом индивидуальных интересов ЛПР организаций-элементов кластера. Данного недостатка лишен теоретико-игровой подход к моделированию интеграционных процессов социально-экономических систем.

Многоагентные модели. Теоретико-игровая модель интегрированного образования Z^2 представляет собой систему одно- либо многокритериальных оптимизационных моделей вида

$$z_i = F_i(x) \rightarrow \text{extr}_{x_i \in X_i}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (2)$$

которая, по сути, является игрой I лиц:

$$\Gamma = \langle X_1, \dots, X_I, F_1(x), \dots, F_I(x) \rangle. \quad (2')$$

В постановке (2) функция $F_i(x)$ отражает цель функционирования i -го участника и прямо или косвенно зависит от деятельности других участников x_{-i} .

Решение задачи (2) $x^* \in \prod_{i=1}^I X_i$ называется *равновесным*, если каждый из участников обеспечивает

максимальное удовлетворение интересов $F_i(x^*) \succ F_i(x_i, x_{-i}^*)$, $\forall x_i \in X_i$, $i = 1, \dots, I$, при определенных правилах их взаимодействия. Равновесное решение в задаче (2) зависит от «правил игры» (например, последовательности принятия решений, различия в приоритетах достижения цели, присутствия лидера, возможностей использования угроз, сговора и пр.). В связи с этим исследованию подлежат различные ситуации равновесия по Нэшу, в стратегиях $\Gamma 1$ и $\Gamma 2$, равновесие на основе угроз, Парето-оптимальное равновесие, равновесие в условиях кооперации и т. д. Существуют приемы, позволяющие привести модель вида Z^1 к виду Z^2 посредством декомпозиции глобальной задачи на ряд подзадач и задачу согласования интересов. В то же время при некоторых условиях (например, аналогичности принципов достижения целей участников) модель Z^2 может быть обобщена до модели Z^1 без существенных потерь информации и искажений.

Проблемы изучения моделей Z^2 в теоретическом плане заключаются в исследовании условий существования, единственности и устойчивости различных равновесных ситуаций, а в практическом плане численного нахождения решений, интерпретации ситуаций равновесия, а также алгоритмов (способов) согласования интересов участников, приводящих к равновесному состоянию. Недостатком данных моделей является то, что при возрастании количества участников сложность численного нахождения решения и его исследования существенно возрастает. Классические многоагентные модели обобщаются, как правило, до двух, трех лиц, принимающих решения, что приводит к существенной потере информации, «сглаживанию» нюансов и возможных проблем, возникающих в процессе взаимодействия множества участников определенной группы. Так, типичный экономический кластер включает предприятия-лидеры, предприятия малые (развивающиеся) и средние, одно либо несколько научно-производственных предприятий, которые в свою очередь тоже могут подлежать градации, центр кластерного развития. Агрегирование интересов и целей функционирования малых, средних и крупных предприятий в виде одной модели приведет к потере информации об эффективности их функционирования, не отражает условий внутренней конкуренции как движущей силы их индивидуального развития. Аналогично и с инновационными предприятиями. Отражение систем сбытовых каналов, посреднических организаций, участвующих в процессе реализации продукции, приводит к еще большему увеличению размерности модели. Поэтому модель экономического кластера как целеустремленной системы является многоагентной, теоретико-игровой моделью, при этом количество агентов (ЛПР)

должно быть оптимальным, т. е. обеспечивать достаточно детальное отражение интересов участников, внутреннюю конкуренцию между ними и кооперацию. Исследование много-агентных моделей Z^2 с числом ЛПР более трех осуществляется численно, для этого используются специализированные алгоритмы.

Рассмотрим формализацию принципов функционирования экономического кластера как системы взаимосвязанных целей его участников на основе теоретико-игрового подхода, основываясь на динамическом подходе моделирования систем.

Пусть $z_n^0(t)$ – целевое свойство организации n ($n \in NK(t)$), входящей в экономический кластер, характеризующее эффективность ее функционирования в момент времени t . Наиболее часто в качестве такого свойства выступает уровень прибыли от производства и реализации продукции, выполнения работ или оказания услуг. В соответствии с принципами рационального ведения экономической деятельности любая организация, входящая в экономический кластер, как целеустремленная система, стремится достичь предела эффективности:

$$z_n^0(t) = f_n(x_n(t), y_n(t), w_n(t), z_n(t-1), zk_p(t-1)) \rightarrow \begin{matrix} extr \\ x_n \in X_n(t) \\ y_n \in Y_n(t) \end{matrix}, t = 1, \dots, T; \quad (3)$$

$$n \in NK(t).$$

Рассмотрим основные компоненты модели:

1) $x_n(t)$ – вектор управленческих воздействий организации n , входящей в кластер $x_n(t) = (x_{An}(t), x_{Vn}(t))$, являющийся элементом множества $X_n(t)$;

2) $X_n(t)$ – множество допустимых решений ($X_n(t) = X_{An}(t) \times X_{Vn}(t)$), включающее $X_{An}(t)$ – множество вариантов выходных управленческих воздействий организации n на решение общих внутрикластерных вопросов и развитие кластера в целом

$$X_{An}(t) = \{x_{An}(t) \in R^{A_n} : G_{Aj}(x_{An}(t)) = 1; j = 1, \dots, J_n\},$$

а $X_{Vn}(t)$ – множество принятия решений по управлению организацией n , учитывающее то, что решения, направленные на решение $x_{An}(t)$, влияют на правила принятия решений на уровне организации n

$$X_{Vn}(t) = \{x_n(t) \in R^{I_n} : G_{nj}(x_n(t), x_{An}(t)) = 1, x_{An}(t) \in X_{An}(t), j = 1, \dots, J_n\};$$

функции $G_{nj}(x_n(t), x_{An}(t))$ и $G_{Aj}(x_{An}(t))$ – описывают правила принятия решений;

3) $y_n(t)$ – матрица интенсивностей использования внутрикластерных связей организации n , являющаяся элементом множества вариантов $Y_n(t)$:

$$Y_n(t) = \{y_n(t) \in R_+^{M(NK(t)) \times L} : G_d(y_n(t)) = 1, d = 1, \dots, D_n\};$$

4) $w_n(t)$ – вектор факторов внешней среды, обуславливающих результаты деятельности организации n ;

5) $z_n(t-1)$ – результат функционирования организации в предшествующий период;

6) $zk_p(t-1)$ – вектор целостных свойств экономического кластера, обуславливающих результат функционирования его участников, данная компонента модели отражает совокупность преимуществ, которые получает предприятие за счет вхождения в кластер и его развития;

7) $NK(t)$ – множество организаций, входящих в некоторый экономический кластер, $M(NK(t))$ – мощность множества, отражающая количество организаций в кластере.

Система моделей (3) описывает принципы функционирования организаций в условиях конкуренции с учетом взаимообусловленности результатов функционирования друг друга. При этом для каждого t вектор факторов внешней среды $w_n(t)$ определен либо сценарно, либо посредством прогноза.

Равновесным решением игры $M(NK(t))$ лиц, описываемой системой моделей (3), являются пары $(x^*(t), y^*(t))$, описывающие оптимальные стратегии, включая переменные индивидуального управления $x^*(t) = (x_1^*(t), \dots, x_{M(NK(t))}^*(t))$ и переменные согласования интересов $y^*(t) = (y_1^*(t), \dots, y_{M(NK(t))}^*(t))$, при которых участники экономического кластера в максимальной степени удовлетворяют индивидуальные интересы.

Однако экономический кластер характеризуется наличием некоторых единых интересов участников, причем общие интересы всегда конкурируют с частными.

В условиях вхождения организации в экономический кластер посредством варьирования управленческих воздействий, направленных на развитие кластера в целом $x_A(t) = (x_{A1}(t), \dots, x_{AM(NK(t))}(t))$, оптимизации подлежат некоторые целевые свойства кластера $zk^1(t)$:

$$zk^1(t) = F^1(x_A(t), z(t), w(t), zk(t-1)) \rightarrow \underset{x_A(t) \in \prod_{n \in NK(t)} X_{An}(t)}{\text{extr}}, \quad (4)$$

где $z(t)$ вектор результатов функционирования организаций, входящих в кластер $z(t) = (z_1(t), \dots, z_{M(NK(t))}(t))$.

Таким образом, кластер как система взаимосвязанных целей представляет игру $M(NK(t)) + 1$ лиц вида

$$\Gamma(t) = \left\langle NK(t), \{X_n(t), Y_n(t), z_n^0(t)\}_{n \in NK(t)}, zk^1(t) \right\rangle, \quad t = 1, \dots, T. \quad (5)$$

В постановке (3)–(5) частные цели участников конкурируют с общими кластерными целями, при этом индивидуальный результат функционирования организации $z_n^0(t)$ зависит от текущего состояния кластера $zk_p(t-1)$ и управленческих воздействий $x_{An}(t)$, направленных на его целостное развитие, от значения которых зависят принципы выбора индивидуальных программ управления. Так, например, финансирование общих кластерных программ ограничивает объем средств, направленных на развитие частного производства.

Сложность исследования модели экономического кластера (3)–(5) заключается в ее динамичности, поскольку отклик на управленческое воздействие может проявиться не мгновенно, как результат функционирования на момент t , а с запаздыванием в течение некоторого периода времени. В связи с этим возможны следующие модификации модели.

1. Стратегического планирования:

$$\Gamma(T) = \left\langle \left\{ NK(t), \{X_n(t), Y_n(t)\}_{n \in NK(t)} \right\}_{t=1}^T, \{z_n^0(T)\}_{n \in NK(T)}, zk^1(T) \right\rangle,$$

где $z_n^0(T)$, $zk^1(T)$ отражают стратегические (долгосрочные) индивидуальные и общие цели участников кластера; T – период планирования. Решением динамической задачи будет являться стратегия (план) на каждый период, обеспечивающая наилучшее достижение цели в перспективе (по всей траектории), уточнение которого возможно посредством применения методов целевого управления.

2. Тактического планирования:

$$\Gamma(t) = \left\langle NK(t), \{X_n(t), Y_n(t), z_n^0(t)\}_{n \in NK(t)}, zk^1(t) \right\rangle, \quad t = 1, \dots, T,$$

представляет планирование и согласование деятельности участников на каждый период t .

Рассмотренные модели экономического кластера как системы взаимосвязанных целей могут рассматриваться в качестве базовых для конструирования различных прикладных моделей как статического, так и динамического типа.

Практическое использование теоретико-игрового подхода к моделированию экономических кластеров как системы взаимосвязанных целей связано с решением ряда методологических проблем, в частности разработкой эффективных методов и алгоритмов решения дина-

мических, многошаговых игр, численного нахождения равновесных ситуаций в многоагентных моделях. В целом перспективы моделирования экономических кластеров на основе многоагентных моделей связаны с развитием методов имитационного моделирования, в частности мультиагентного подхода, в соответствии с которым каждый элемент модели – агент рассматривается как независимый в выборе, действующий в соответствии с заданными целями и системой внутрисистемных взаимосвязей.

Список литературы

1. Клейнер Г. Б., Качалов Р. М., Нагрудная Н. Б. Синтез стратегии кластера на основе системно-интеграционной теории // Отраслевые рынки. 2008. № 5–6 (18).
2. Лобова С. В. Вопросы теории региональных кластеров // Развитие регионального АПК в XXI веке: тенденции и перспективы: Материалы междунар. науч.-практ. конф. (Барнаул, 15 апреля 2011 г.) / ГНУ СибНИИЭСХ Россельхозакадемии. Барнаул: ООО «Спектр», 2011. С. 113–118.
3. Скиба А. Н. Кластеры: реализация системного принципа в пространственно-институциональной организации производства // Региональная экономика: теория и практика. 2011. № 10.
4. Мамченко О. П., Оскорбин Н. М. Моделирование иерархических систем. Барнаул: Изд-во Алт. ун-та, 2007.
5. Дышкант О. В. Кластерная модель организации крупного бизнеса как инструмент модернизации региональной экономики (на примере авиатранспортного комплекса Ростовской области): Автореф. дис. ... канд. экон. наук. Ростов н/Д., 2007.

Материал поступил в редколлегию 05.10.2011

S. V. Lobova, E. V. Ponkina, A. V. Bogoviz

PROBLEMS OF MATHEMATICAL MODELING OF ECONOMIC CLUSTERS AS SYSTEM OF INTERRELATED GOALS OF PARTICIPANTS

The paper considers definition of economic clusters as system of interrelated goals of participants. Formulated generalized model of economic cluster as a purposeful system, based on which the formation of different applied mathematical models of cluster structures.

Keywords: economic cluster model of purposeful systems, game-theoretic approach, the cluster model of economic.