

УДК 621.771.014.2/ 665.765

## АГЕНТ-ОРИЕНТИРОВАННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЖОТРАСЛЕВОГО БАЛАНСА ЛЕОНТЬЕВА

**Шевчук Г.К.**

*ФГАОУ ВПО Уральский Федеральный Университет имени первого Президента России Б.Н.Ельцина», Екатеринбург, Россия (620002 Россия, г.Екатеринбург, ул. Мира, 19), e-mail: g\_stan@inbox.ru*

**Аннотация:** В ходе исследовательской работы были изучена модель межотраслевого баланса Леонтьева и программная среда для создания агент-ориентированных моделей NetLogo, а также было произведено сравнение состояния агент-ориентированной модели в ситуациях различного поведения объектов микроуровня. Было установлено, что показатели одного агента могут оказывать влияние на систему в целом.

Ключевые слова: агент-ориентированное моделирование, модель Леонтьева, NetLogo.

## THE AGENT-BASED MODELING OF INTERBRANCH BALANCE OF LEONTIEV

**Shevchuk G.K.**

*Ural Federal University named after first president of Russia B.N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia (620002 Russia, Ekaterinburg, Mira street, 19), e-mail: g\_stan@inbox.ru*

**Abstract:** In the course of research work were studied in a model of interbranch balance Leontiev and software environment for creating agent-based models NetLogo, and have compared the state of the agent-based model in situations of different micro-level behavior of objects. It has been found that the performance of the agent can influence the system as a whole.

Keywords: agent-based modeling, model Leontyev, NetLogo.

Исследование проблем зависимости изменений на макроуровне от процессов, происходящих на микроуровне, затрудняется необходимостью вручную рассчитывать и обрабатывать множество возможных вариантов поведения объектов микроуровня. Кроме того, для точного выявления устойчивых зависимостей требуются данные многократного прохождения процессов. Появление компьютеров открыло простор для изучения сложных систем, состоящих из множества объектов, взаимодействующих с внешней средой и между собой и обладающих некоторой интеллектуальностью. Агент-ориентированное моделирование (АОМ) – это подход, реализующий функции деятельности объектов на микроуровне путём моделирования функционирования системы на основе агентов, обладающих индивидуальностью, направленный на изучение взаимодействия объектов системы с целью установления зависимостей между микро- и макроуровнями. С развитием агент-ориентированного подхода в информационных технологиях появилась возможность имитировать и анализировать различные системы экономического,

социального и биологического характера, основанные на результатах индивидуального, неоднородного поведения объектов системы и их взаимодействия. В перечисленных системах присутствует математическая основа, которой они подчиняются [1].

Настоящая работа посвящена проблеме совмещения АОМ и математического моделирования систем.

АОМ должно опираться на модели математического программирования. Для исследования была выбрана модель межотраслевого баланса Леонтьева [2].

Статическая модель межотраслевого Леонтьева, называемая моделью «затраты-выпуск», позволяет рассчитать равновесное состояние между общими объёмами выпуска и теми долями объёма, которые возвращаются в производство. Вектор общих объёмов выпуска продукции  $\vec{X}$  имеет вид:

$$\vec{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (1)$$

Вектор конечного потребления  $\vec{Y}$  равен:

$$\vec{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n) \quad (2)$$

Матрица прямых затрат (коэффициентов продуктивности)  $A$  равна:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

Тогда уравнение баланса Леонтьева сводится к виду:

$$x_k = \sum_{j=1}^n a_{kj} * x_j + y_k, \quad (4)$$

В данном исследовании рассматривалась система, находящаяся в динамике. На каждом этапе агенты пытаются удовлетворить свои потребности согласно матрице  $A$ . Агенты обладают деньгами  $m_i$ , которые они используют для обмена. Количество получаемых денег пропорционально тому объёму продукции, который производит агент:

$$m_i = K \cdot x_i \quad (5)$$

В качестве средства для моделирования был выбран NetLogo. NetLogo [3] – агент-ориентированный язык программирования и интегрированная свободная среда разработки, первоначально разрабатывавшиеся для учебных целей. Данная среда удовлетворяет критериям оценки сред агент-ориентированного моделирования, представленным в работе Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms [4], а потому может рекомендоваться к использованию в исследованиях.

Для расчёта по методу Леонтьева необходимо задать значения матрицы  $A$  и вектора  $\vec{Y}$ . Тогда по формуле можно будет вычислить оптимальное значение вектора  $\vec{X}$ . Прежде чем приступить к моделированию системы, необходимо установить существование корректного решения уравнения

$$\vec{X} - A\vec{X} = \vec{Y} \quad (6)$$

Существует несколько способов проверки модели на корректность.

Наиболее точным методом является нахождение нормы по собственным числам. Вводится параметр  $\lambda$ , после чего рассчитывается матрица  $\lambda * E - A$ . Тогда собственные числа будут являться корнями характеристического уравнения

$$\det(\lambda * E - A) = 0 \quad (7)$$

Если собственные числа меньше 1, то модель корректна, иначе, модель некорректна.

На практике более удобным в применении является следующий способ.

$$B = (E - A)^{-1} \quad (8)$$

Если матрица коэффициентов полных материальных затрат  $B > 0$ , значит матрица  $A$  – продуктивна, следовательно, модель корректна.

В ходе эксперимента были заданы матрица  $A$  и вектор  $\vec{Y}$  (Рисунок 12). Для большего соответствия реальному состоянию системы, были установлены различные значения коэффициентов затрат, что сделало матрицу несбалансированной, но таким образом, что при этом модель системы оставалась корректной. По уравнению (6) был найден вектор  $\vec{X}$ .

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
1	Матрица A (коэффициенты продуктивности)																						Y=	
2		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058		0,780	1500,000
3		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
4		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
5		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
6		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
7		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
8		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
9		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
10		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
11		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
12		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
13		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
14		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
15		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
16		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
17		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
18		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
19		0,058	0,056	0,054	0,052	0,050	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1500,000
20		0,020	0,022	0,024	0,026	0,028	0,030	0,032	0,034	0,036	0,038	0,040	0,042	0,044	0,046	0,048	0,050	0,052	0,054	0,056	0,058			1500,000
21		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,048	0,046	0,044	0,042	0,040	0,038	0,036	0,034	0,032	0,030	0,028	0,026	0,024	0,022	0,020			1300,000
22																								
23	Сумма по	0,722	0,724	0,726	0,728	0,730	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780	0,780			

Рисунок 12 – Матрица прямых затрат и вектор конечного потребления

Полученные данные были переданы в подготовленную модель Netlogo, после чего были смоделированы ситуации обмена между агентами (Рисунок 13).

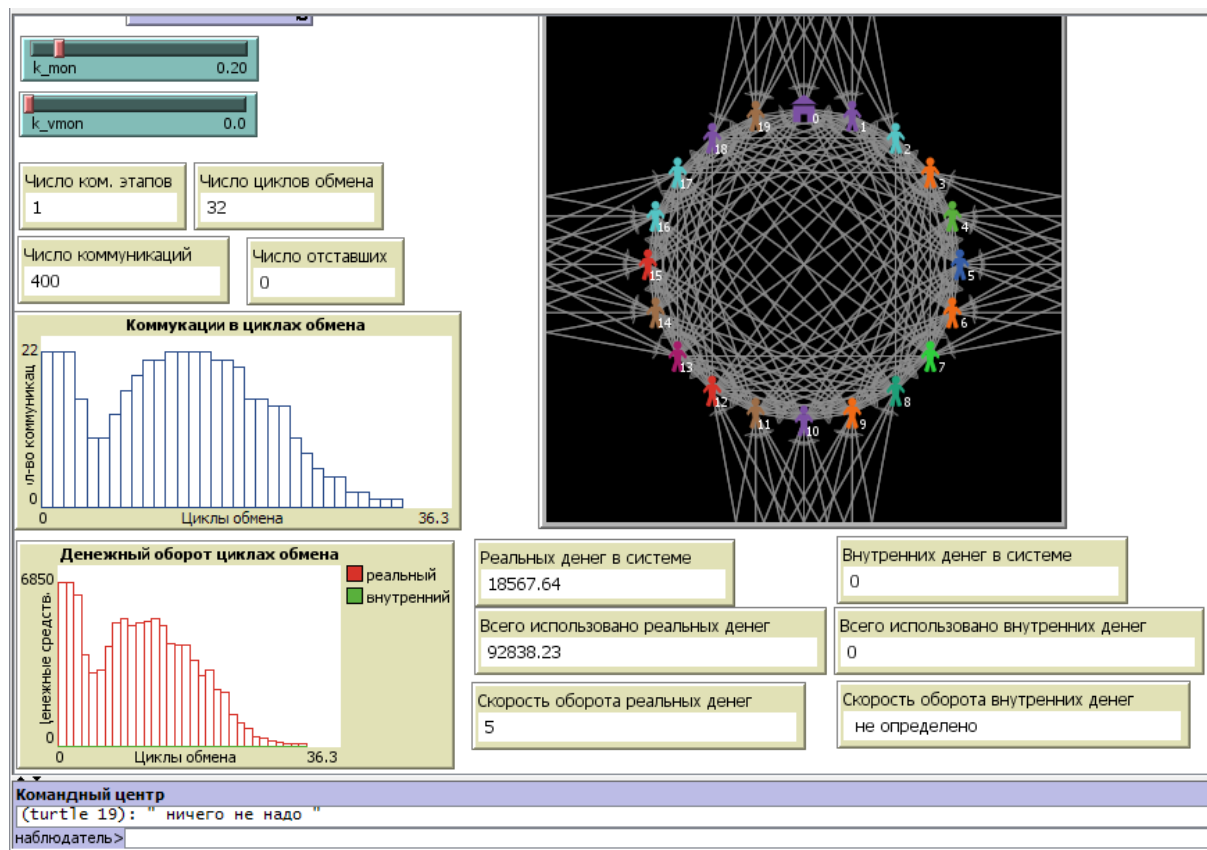


Рисунок 13 – Модель Netlogo

Из-за того, что матрица прямых затрат – несбалансированная, часть агентов испытывает трудности с закупкой продукции для производства, что в дальнейшем сказывается на остальных участниках, вызывая задержки в циклах обмена. Рассмотрим, как изменится ситуация, в зависимости от действий агентов.

Были изучены 5 различных алгоритмов поведения агентов, условно названных «стратегиями обмена» [5]:

- в первой «списковой» стратегии все агенты действуют в соответствии со списком, по которому они упорядочены в системе, при этом объем очередного обмена максимально возможный;
- во второй «максимальной» каждый из агентов пытается в первую очередь обеспечить свои максимальные потребности, объем очередного обмена максимально возможный;
- в третьей «равномерной» стратегии агент пытается одновременно вступить в контакт со всеми агентами, в товарах которых нуждается, объемы обмена с каждым из контрагентов одинаковые и определяются количеством денег, которые есть у агента, инициировавшего обмен;
- в четвертой «последовательной» стратегии агент пытается вступить в контакт со следующим за ним по списку агентом, если обмен невозможен, то движется дальше по списку, объем обмена максимально возможный;

– в пятой стратегии, стратегии «окрестности», агент пытается взаимодействовать с соседними по списку агентами, в случае невозможности обменов, расширяя эту окрестность, объем обмена максимально возможный.

Произведённое моделирование позволило наглядно увидеть результаты функционирования системы при различном поведении агентов (Рисунок 14).

Третья стратегия (равномерная) является оптимальной, когда необходимо начать производство в сжатые сроки, однако дорогая в реализации. С каждым платежом связаны транзакционные издержки, а так как в данной стратегии за каждый цикл обмена агент совершает не один обмен, а несколько, то возрастают расходы.

Четвёртая стратегия (последовательная) показывает наименьшую зависимость от обеспеченности деньгами среди оставшихся стратегий и не приводит к существенным задержкам коммуникационного процесса, поэтому является предпочтительной.

Смешанные стратегии не продемонстрировали эффективных результатов, а в ряде случаев продемонстрировали более серьёзные задержки коммуникационного процесса, чем их базовые варианты.

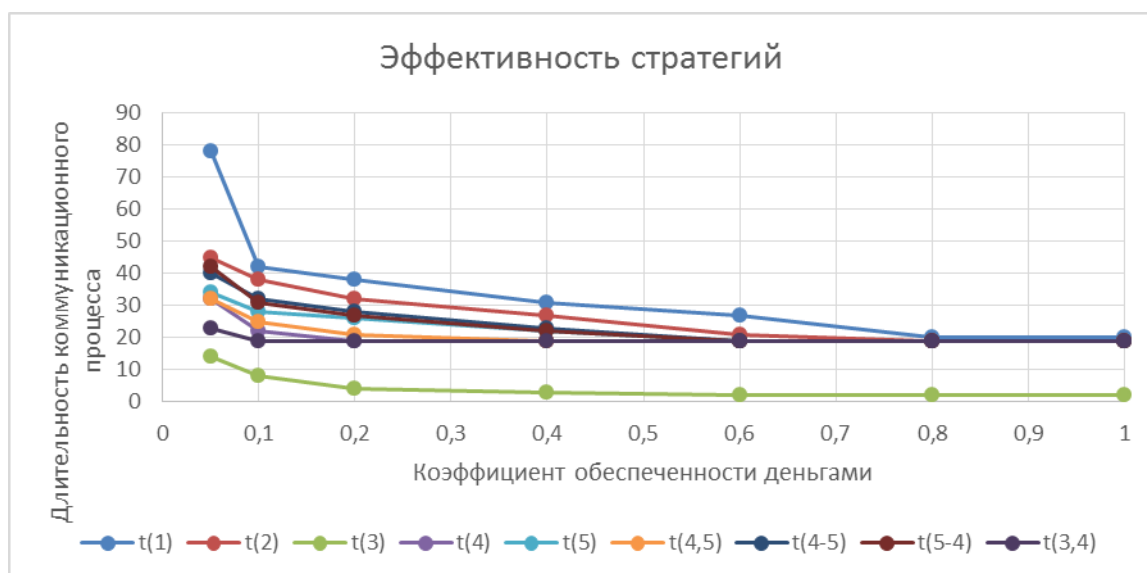


Рисунок 14 - Сравнение стратегий агентов

Сочетая агент-ориентированный подход и модель Леонтьева, можно проводить исследования различных экономических и социальных систем, ранее мало возможные из-за трудностей работы с агентами. Математическое моделирование позволяет установить правила функционирования системы, а агент-ориентированное – рассмотреть процесс взаимодействия агентов системы в динамике. В ходе работы была установлена зависимость макроуровня от микроуровня на примере того, что показатели одного агента могут оказывать влияние на систему в целом.

### Список литературы

1. Интрилигатор М. Математические методы оптимизации и экономическая теория: Пер. с англ./ Г.И. Жуковский, Ф.Я. Кельмана — М.: Айрис-пресс, 2002. — 576 с
2. Леонтьев В.В. Экономические эссе. Теории, исследования, факты и политика: Пер. с англ. / В.В. Леонтьев. — М.: Политиздат, 1990. — 415 с

3. *NetLogo Home Page*. [Электронный ресурс]. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата обращения 24.10.2015)
4. Cynthia Nikolai and Gregory Madey Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms. - *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 12, no. 2, 2009
5. Берг Д.Б., Зверева О.М. Особенности коммуникаций между функционально сопряжёнными агентами производственной сети. – Вестник СибГУТИ №1, 2015

#### **References**

1. Intriligator M. *Mathematical methods of optimization and economic theory*: Trans. from English. / GI Zhukovsky, FY Kelman – М.: Iris Press, 2002. - 576
2. VV Leontiev *Economic essays. Theory, research, facts and policy*: Per. from English. / VV Leontiev. – М.: Politizdat, 1990. – 415
3. *NetLogo Home Page*. [Electronic resource]. URL: <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (date of treatment 10/24/2015)
4. Cynthia Nikolai and Gregory Madey Tools of the Trade: A Survey of Various Agent Based Modeling Platforms. – *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* vol. 12, no. February 2, 2009
5. D.B. Berg, O.M. Zvereva Features of communications between functually conjugated agents of the production network. – *Bulletin of SibSUTI*, 2015