

УДК 519.7

АПРОБАЦИЯ МЕТОДА МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ИЕРАРХИЧЕСКОГО ПОДХОДА



А.П. Суходолов

Байкальский государственный университет
г. Иркутск, Российская Федерация
e-mail: science@bgu.ru

A.P. Sukhodolov

Baikal State University
Irkutsk, Russian Federation
e-mail: science@bgu.ru

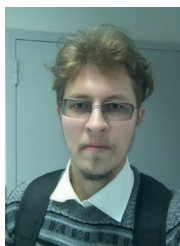


В.А. Маренко

*Институт математики им. С.Л. Соболева,
Сибирское отделение Российской академии наук*
г. Омск, Российская Федерация,
e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru

V.A. Marenko

*Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch
of the Russian Academy of Sciences*
Omsk, Russian Federation
e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru



В.Е. Ложников

*Омский государственный университет
им. Ф.М. Достоевского*
г. Омск, Российская Федерация
e-mail: vereskanthem@gmail.com

V.Ye. Lozhnikov

Dostoyevsky Omsk State University,
Omsk, Russian Federation
e-mail: vereskanthem@gmail.com

Аннотация. Цель работы — описание апробации нового метода моделирования объектов, разработанного с применением иерархического подхода на примере исследования характеристик экономической системы, сформированных по таксономическому принципу. Метод представляется совокупностью решений комплекса информационных задач, иерархия которых показана на примере показателей экономической системы конкурентоспособность, прибыль и лояльность клиентов. Приведены результаты имитационных экспериментов и процедур симплициального анализа. Установлена зависимость целевого фактора «конкурентоспособность» от управляющего фактора «прибыль». Результаты соответствуют теоретическим разработкам специалистов. Применение метода возможно для исследования объектов любой предметной области.

Ключевые слова: метод, иерархия, система, граф, симплициальный анализ, имитационный эксперимент, экономическая система, конкурентоспособность, прибыль, лояльность клиентов.

Информация о статье. Дата поступления: 2 апреля 2020 г.

Финансирование. Работа выполнена при поддержке программы фундаментальных научных исследований СО РАН № I.5.1., проект № 0314–2019–0020.

VALIDATION OF METHOD OF MODELLING OBJECTS USING HIERARCHICAL APPROACH

Annotation. The purpose of the work is to describe the validation of a new method of modelling objects, developed using a hierarchical approach, using the example of the study of characteristics of an economic system based on a taxonomic principle. The method is presented as a set of solutions to a set of information objectives, the hierarchy of which is illustrated by the indicators of the economic system of competitiveness, profit and client loyalty. The results of simulation experiments and simplicial analysis procedures are presented. The target factor «competitiveness» is dependent on the manager factor «profit». The results correspond to the theoretical developments of the experts. The method could be used to study objects of any subject area.

Keywords: method, hierarchy, system, graph, simplistic analysis, simulation experiment, economic system, competitiveness, profit, client loyalty.

Article info. Received 2 April, 2020.

Acknowledgements. The work was carried out with the support of the SO RAS I.5.1 Program of Fundamental Scientific Research, Project 0314–2019–0020.

Введение

Экономические системы являются сложными структурами, поэтому для исследования экономических проблем целесообразно использовать иерархический подход [1]. В теории многоуровневых иерархических систем предложены особые классы иерархических структур: слои, страты, эшелоны. Слои или уровни сложности служат для вертикальной декомпозиции объекта исследования. Концепция страт необходима для построения совокупности моделей, каждая из которых описывает один и тот же объект исследования с различных точек зрения. В результате получается стратифицированное описание объекта одновременно на разных уровнях иерархии. Чем выше страта, тем выше абстрагирование, тем отчетливее назначение объекта как единого целостного образования. Концепция эшелонов обеспечивает взаимосвязь между соответствующим уровнем описания целей системы и уровнем описания средств их достижения [2].

Цель работы — представить апробацию метода моделирования объектов на различных уровнях абстрагирования как последовательность решений комплекса информационных задач на примере исследования характеристик экономической системы.

Российские специалисты широко используют иерархический подход для разнообразных социально-экономических исследований. В статье Павлова К. В. дается обоснование целесообразности использования понятия «экономическое ядро», под которым подразумевается совокупность точек роста и базисных элементов экономики. Рассмотрена идея вариативности экономического ядра на разных уровнях иерархии, критерии отбора элементов в «ядро» и их оптимизация [3]. Мишин С. П. решает задачу реализации управленческих функций в организации через создание иерархии, с помощью которой возможно повысить эффективность взаимодействия сотрудников на основе планирования и контроля материальных, информационных и других потоков [4]. Моностырская Е. Е. предлагает анализировать состояние социально-экономической системы с использованием иерархии потребностей человека. В ее работе приведен пример анализа экологического состояния окружающей среды с использованием разработанной иерархической системы потребностей [5]. Жуковская Л. В. исследовала модель иерархии управления социально-экономической системой в условиях отсутствия идентичности структуры и однотипных объемов информации на примере системы социальной защиты населения [6]. Рассмотрена модель иерархической структуры «медиасфера» в виде семантической сети [7].

Формирование образов показателей экономической системы на разных уровнях иерархии

Рассмотрение объекта исследования начинается с нижнего уровня иерархии. На первом этапе выявляются базисные факторы, оказывающие позитивное или негативное влияние на функционирование исследуемой системы. Далее проводится попарное сравнение выявленных факторов, используемых для формирования матрицы смежности 1-го уровня иерархии, элементами которой являются экспертные оценки, отражающие величины и направления взаимовлияния базисных факторов. Из элементов матрицы смежности первого уровня формируются группы элементов 2-го уровня иерархии, соответствующие некоторым характеристикам объекта исследования. Третий уровень представляет собой обобщенный показатель, влияющий на функционирование исследуемой системы в целом. На 4-м уровне представляется обобщенный показатель экономической системы в детализированном виде.

Пример. В нашем примере на первом уровне иерархии представлена матрица смежности $A = \{a_{ij}\}, i, j = \overline{1, n}$, элементами которой являются экспертные оценки специалистов, полученные при попарном сравнении базисных факторов, влияющих на функционирование экономической системы, выявленных в ходе экспертных процедур, PEST и SWOT анализа (рис. 1).

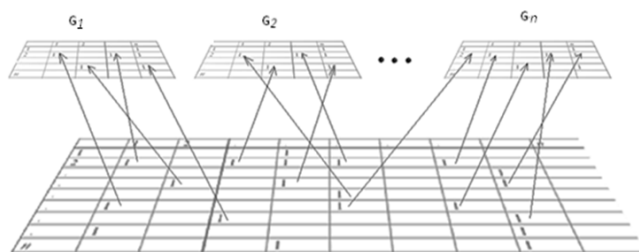


Рис. 1. Два уровня рассмотрения факторов экономической системы

Из элементов матрицы смежности первого уровня иерархии формируются совокупности элементов второго уровня, отражающие взаимовлияния факторов, соответствующих характеристикам экономической системы конкурентоспособность (K), прибыль (P), лояльность клиентов (L), с соответствующими логико-семантическими образами.

На третьем уровне иерархии формируется совокупность взаимосвязанных орграфов, матрицы которых указаны на втором уровне иерархии (рис. 2). Третий уровень иерархии представляется орграфом $G_{ia} = (G, W) = (\{g_i\}, \{w_{ij}\})$, где g_i — вершины, w_{ij} — дуги, $i, j = \overline{1, n}$.

В нашем примере вершинами обобщенного орграфа являются характеристики экономической системы в виде орграфов и связи между ними. Таким образом, обобщенный показатель, характеризующий функционирование экономической системы представляется совокупностью трех ее характеристик, исследованных ранее по отдельности [8]. На рисунке 3 представлена детализация обобщенного показателя в виде графа четвертого уровня иерархии.

Далее проводится серия имитационных экспериментов с использованием авторского программного средства для исследования устойчивости когнитивной структуры сформированного детализированного образа обобщенной характеристики экономической системы [9]. Суть имитационного эксперимента состоит в том, что в одну или несколько управляющих вершин орграфа вводятся импульсы, которые распространяются по различным его путям и оказывают суммарное воздействия на другие вершины, в том числе целевую «конкурентоспособность».

Один из вариантов, когда во все управляющие вершины внесены возмущения по одной условной единице, представлен на рисунке 4.

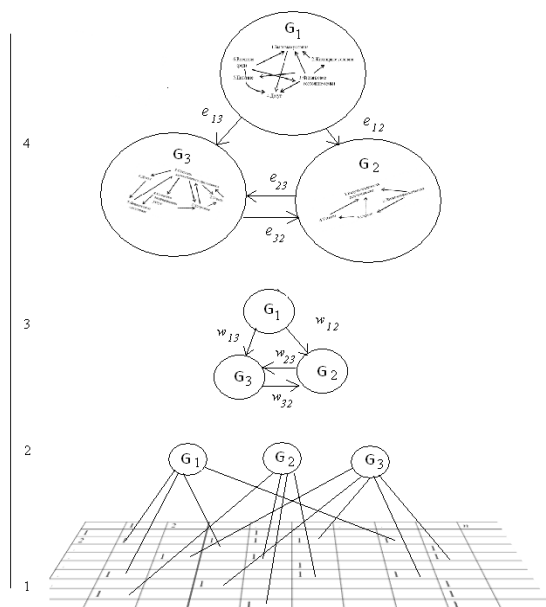


Рис. 2. Четыре уровня иерархии рассмотрения объекта

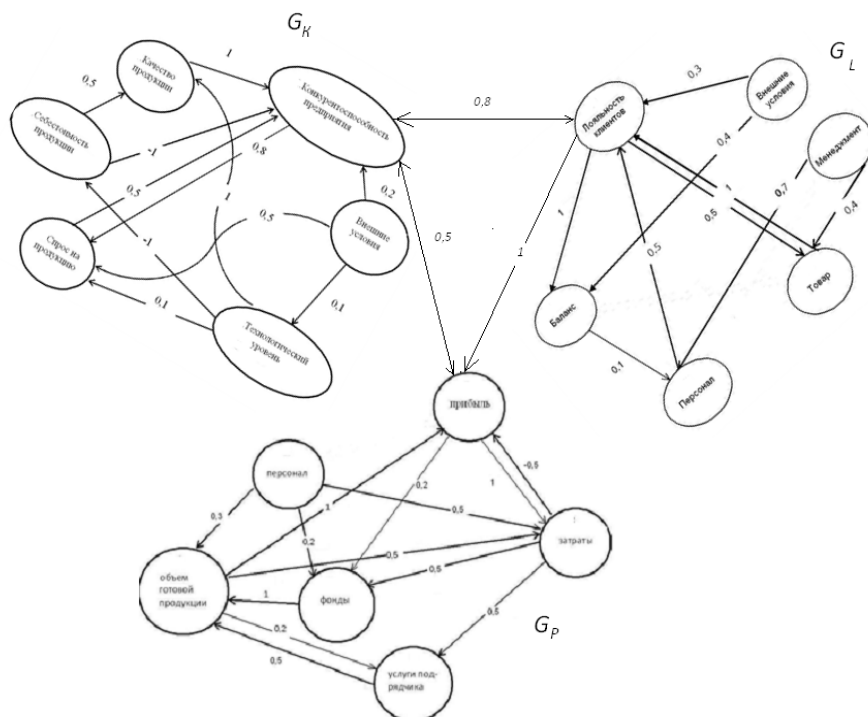


Рис. 3. Детализированное представление объекта исследования на 4-м уровне иерархии

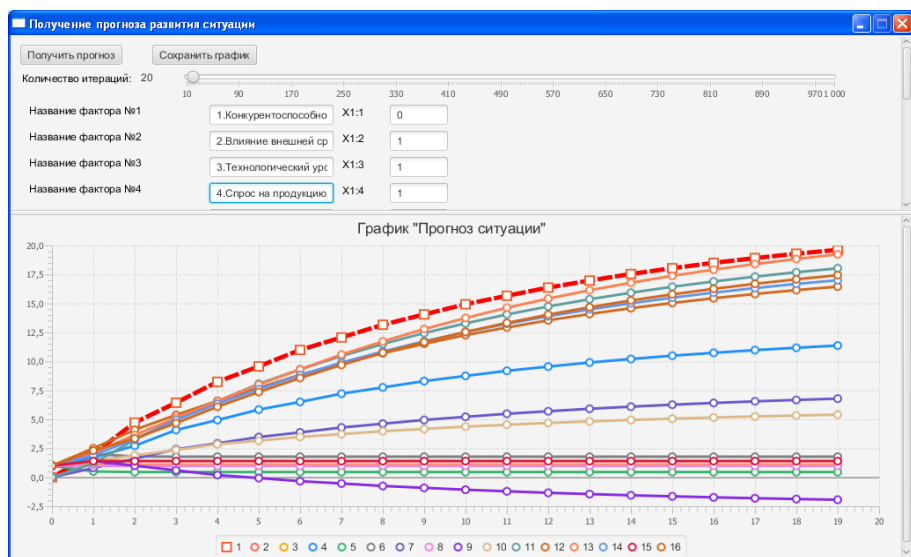


Рис. 4. Результат имитационного эксперимента с использованием исходной матрицы

Из рисунка видна тенденция увеличения значений всех факторов на нескольких шагах вычислительной процедуры. Такое состояние является импульсным линейным резонансом, которое показывает неустойчивость сформированной когнитивной структуры. Для ее преобразования используется симплицальный анализ.

Симплицальный анализ детализированной когнитивной структуры. Симплицальный анализ является одним из важнейших этапов исследования, так как позволяет выявлять неочевидные взаимосвязи факторов в структуре системы с целью принятия адекватных решений о способах ее управления. Симплицальный анализ оперирует понятиями симплекса и комплекса, для построения которых используется структура системы в виде орграфа $G = (X, E), V = \{x_i, x_j\}, E = \{e_{ij}\}, i, j = 1, 2, \dots, n$. Множество вершин в нашем примере x_i , относящихся к конкретной вершине x_i орграфа $G_{\text{дет}}$, трактуется как симплекс $\sigma_q^{(i)}$, где i — номер вершины, q — число дуг, на единицу меньших числа элементов в соответствующей строке (столбце) матрицы инцидентности. Симплицальный анализ или анализ q-связности использует понятие «цепь связи», которое означает, что два симплекса могут быть связаны, в том числе, путем последовательности промежуточных симплексов. Совокупность симплексов, соединенных посредством общих граней, образует симплицальный комплекс $K_x(Y, R)$ или $K_y(Y, R)$ [10].

Реализация симплицального анализа предполагает формирование матрицы инцидентности, вычисление размерности комплексов (Y, R) и (X, R) путем подсчета количества элементов в каждой i -ой строке и j -ом столбце матрицы инцидентности.

Затем — формирование структурных векторов $Q_x = \{Q_{\dim K, \dots}, Q_1, Q_0\}$ и $Q_y = \{Q_{\dim K, \dots}, Q_1, Q_0\}$ комплексов. Далее преобразуется структура исходной матрицы путем упорядочения строк сверху вниз и столбцов слева направо в соответствии с правилами убывания размерности $q_1^i > q_2^i > q_3^i > \dots > 0 > -1$ и $q_1^j > q_2^j > q_3^j > \dots > 0 > -1$.

Комплекс $K_y(X, R)$ имеет шестнадцать симплексов с разной связностью. Анализ начинается с наибольшей связности и заканчивается связностью, равной нулю. Наибольшая связность элементов определяется по столбцам матрицы инцидентности. Для этого находим столбец с наибольшим числом элементов — это первый столбец, содержащий восемь единиц. Наибольшая связность комплекса $q = 8 - 1 = 7$. На этом уровне связности имеется один компонент $\{x_1\}$. Понижаем уровень связности на единицу. Столбец с семью элементами отсутствует, поэтому на уровне связности $q=6$ имеется тот же компонент $\{x_1\}$. Далее находим столбцы с шестью элементами — это один одиннадцатый столбец. Далее последовательно понижаем уровень связности на единицу, включая уровень связности, равной нулю, каждый раз проверяя условие объединения [11].

Результаты вычислительной процедуры для комплекса $K_y(X, R)$.

$$\begin{aligned} q = 7 \quad Q_7 &= 1 \quad \{x_1\} \\ q = 6 \quad Q_6 &= 1 \quad \{x_1\} \\ q = 5 \quad Q_5 &= 2 \quad \{x_1\} \quad \{x_{11}\} \\ q = 4 \quad Q_4 &= 2 \quad \{x_1\} \quad \{x_{11}\} \\ q = 3 \quad Q_3 &= 3 \quad \{x_1\} \quad \{x_{11}\} \quad \{x_{12}\} \\ q = 2 \quad Q_2 &= 7 \quad \{x_1\} \quad \{x_{11}\} \quad \{x_{12}\} \quad \{x_4\} \quad \{x_7\} \quad \{x_{14}\} \quad \{x_{16}\} \\ q = 1 \quad Q_1 &= 1 \quad \{vce\} \\ q = 0 \quad Q_0 &= 1 \quad \{vce\} \end{aligned}$$

Вид структурного вектора $Q_y = \{1 \ 1 \ 2 \ 2 \ 3 \ 7 \ 1 \ 1\}$ показывает, что комплекс сильно связан для больших и малых значений q , а для остальных распадается на не связанные компоненты.

Результаты вычислительной процедуры для комплекса $K_x(Y, R)$.

$$\begin{aligned} q = 4 \quad Q_4 &= 2 \quad \{x_2\} \quad \{x_{15}\} \\ q = 3 \quad Q_3 &= 3 \quad \{x_2\} \quad \{x_{15}\} \\ q = 2 \quad Q_2 &= 8 \quad \{x_2\} \quad \{x_{15}, x_{11}\} \quad \{x_7\} \quad \{x_1\} \quad \{x_3\} \quad \{x_9\} \quad \{x_{12}\} \quad \{x_{16}\} \\ q = 1 \quad Q_1 &= 1 \quad \{vce\} \\ q = 0 \quad Q_0 &= 1 \quad \{vce\} \end{aligned}$$

Вид структурного вектора $Q_y = \{2 \ 3 \ 8 \ 1 \ 1\}$ показывает, что комплекс сильно связан для малых значений q , а для других — распадается на не связанные компоненты. На уровне связности 2 появляется первый связный компонент, который показывает, что внося управляющее воздействие в фактор $\{x_{11}\}$ — «услуги подрядчика» можно влиять на фактор $\{x_{15}\}$ — «персонал».

Далее исходная матрица взаимовлияния факторов, преобразованная в соответствии с правилом упорядочения строк и столбцов, используется для проверки устойчивости преобразованной когнитивной структуры. Результаты имитационного эксперимента представлены на рисунках 5, 6.

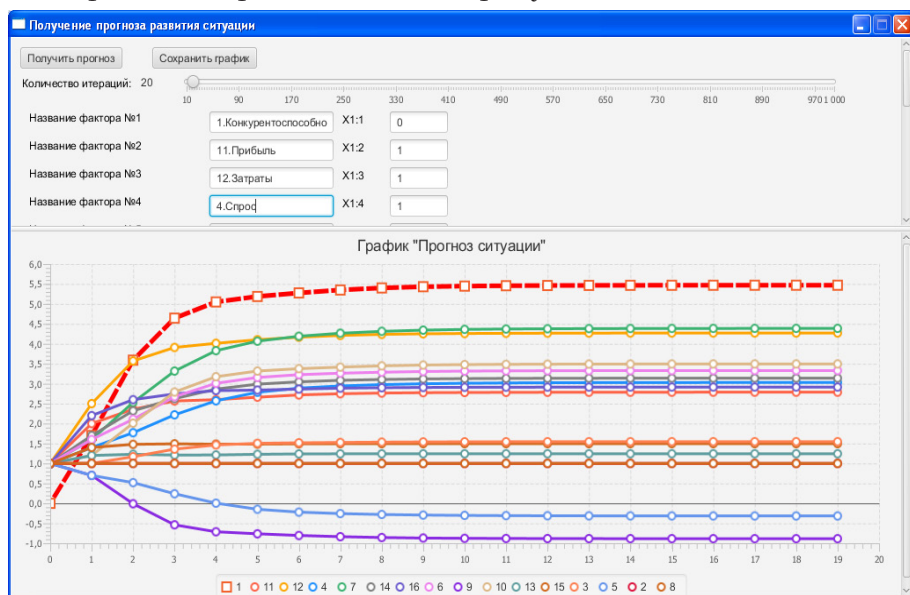


Рис. 5. Результат имитационного эксперимента с использованием преобразованной матрицы

Имитационный эксперимент показал устойчивость преобразованной детализированной структуры, т.к. результаты эксперимента совпадают с теоретическими расчетами: на первых шагах вычислительной процедуры значения всех факторов изменяются, а затем происходит их стабилизация на некотором уровне [12]. Далее, не меняя прежнего условия, вносим импульс десять условных единиц в фактор x_{11} «прибыль». Результат показан на рисунке 6.

Целевой фактор «конкурентоспособность» (пунктирная линия) при таком условии увеличился почти вдвое, что соответствует логике рассуждений. Таким образом, аналитические процедуры симплицеального анализа позволили получить вариант с устойчивой когнитивной структурой, результаты вычислительной процедуры с которой соответствуют экспертным правилам.

Заключение

Проведена апробация нового метода моделирования объектов, состоящего из последовательности решений комплекса информационных задач. Графическое представление образов объекта исследования осуществляется на нескольких уровнях иерархии то в сжатом, то в развернутом виде. С помощью разработанного метода проведено исследование характеристик экономической системы. В результате симплициального анализа выявлена взаимосвязь факторов «персонал» и «услуги подрядчика». Предлагаемый метод может быть использован для формирования рекомендаций по улучшению эффективности деятельности экономической системы в целом.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ильин В. П. Математическое моделирование. Часть 1. Непрерывные и дискретные модели / В. П. Ильин. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2017. — 429 с.
2. Месарович М. Теория иерархических многоуровневых систем / М. Месарович, Д. Мако, И. Такахара. — Москва: Мир, 1973. 344 с.
3. Павлов К.В. 2.1. Ядро экономической системы на разных уровнях управленческой иерархии / К. В. Павлов // Socio-economic Problem of Management: collective monograph / ed. S. I. Drobyazko. — Melbourne, 2015. — Р. 53–68.
4. Мишин С. П. Оптимальные иерархии управления в экономических системах / С. П. Мишин // Экономика и математические методы. — 2007. — Т. 43, № 3. — С. 85–101.
5. Монастырская Е. Е. Иерархия факторов, мотивирующих деятельность человека в социально-экономической системе / Е. Е. Монастырская // Вестник науки Сибири. — 2013. — № 1 (7). — С. 213–219.
6. Жуковская Л. В. Регулирование сложных социально-экономических систем на разных уровнях иерархии в условиях неопределенности / Л. В. Жуковская // Труды Института системного анализа Российской академии наук. — 2018. — Т. 68, № 4. — С. 17–25.
7. Lozhnikov V. E. Information Model of the Media Sphere — Semantic Network / V. E. Lozhnikov, V. A. Marenko. — DOI 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958057 // 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). — URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8958057>.
8. Суходолов А. П. Системный анализ, моделирование. Математическое моделирование / А. П. Суходолов, В. А. Маренко. — Иркутск: Изд-во БГУ, 2018. — 144 с.
9. Ложников В. Е. Программная система «Синтез топологической структуры когнитивной модели»: свидетельство о гос. регистрации программ для ЭВМ № 2019617163 от 04.06.2019 / В. Е. Ложников, В. А. Маренко; заявитель Ом. гос. ун-т; дата регистрации: 04.06.2019.

10. Берёза О. А. Симплициальный анализ когнитивных карт социально-экономических систем / О. А. Берёза // Известия ЮФУ. Технические науки. — 2011. — № 11 (124). — С. 151–161.
11. Маренко В. А. Симплициальный анализ когнитивной структуры / В. А. Маренко // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом ВУЗе. — 2019. — № 7. — С. 199–207.
12. Робертс Ф. С. Дискретные математические модели с приложениями к социальным, биологическим и экологическим задачам / Ф. С. Робертс. — Москва: Наука, 1986. — 496 с.

REFERENCES

1. Ilin V. P. *Matematicheskoe modelirovanie. Chast' 1. Nepreryvnye i diskretnye modeli* [Mathematical modeling. Part 1. Continuous and discrete models]. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017. 429 p.
2. Mesarovic M.D., Macko D., Tanahara Y. *Theory of Hierarchical, Multilevel, Systems*. New York, Academic Press, 1970. 294 p. (Russ. ed.: Mesarovic M. D., Macko D., Tanahara Y. *Teoriya ierarhicheskikh mnogourovnevnykh system*. Moscow, Mir Publ., 1973. 344 p.).
3. Pavlov K.V. 2.1. The core of the economic system at different levels of the management hierarchy. In Drobyazko S. I. (ed.). *Socio-Economic Problem of Management*. Melbourne, 2015, pp. 53–68. (In Russian).
4. Mishin S. P. Optimal Hierarchies of Control in Economic Systems. *Ekonomika i matematicheskie metody = Economics and Mathematical Methods*, 2007, vol. 43, no. 3, pp. 85–101. (In Russian).
5. Monastyrskaya E. E. Hierarchy of factors motivating human activity in the socio-economic system. *Vestnik nauki Sibiri = Siberian Journal of Science*, 2013, no. 1(7), pp. 213–219. (In Russian).
6. Zhukovskaya L. V. Public Administration of the Difficult Socio-economic Systems on the Different Levels of Hierarchy of in Conditions of Uncertainty. *Trudy Instituta sistemnogo analiza Rossiiskoi akademii nauk = Proceedings of the Institute for Systems Analysis Russian Academy of Sciences*, vol. 68, no.4, pp. 17–25. (In Russian).
7. Lozhnikov V.E., Marenko V. A. Information Model of the Media Sphere — Semantic Network. 2019 *International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON)*. DOI: 10.1109/SIBIRCON48586.2019.8958057. Available at: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8958057>.
8. Sukhodolov A.P., Marenko V. A. *Sistemnyi analiz, modelirovanie. Matematicheskoe modelirovanie* [System Analysis, Modeling. Mathematical Modeling]. Irkutsk, Baikal State University Publ., 2018. 144 p.
9. Lozhnikov V.E., Marenko V. A. *Programmnyaya sistema «Sintez topologicheskoi struktury kognitivnoi modeli»* [Software System «Synthesis of the Topological Structure of a Cognitive Model»]. Software State Registration Certificate No 2019617163, 4 June 2019. Copyright Omsk State University. Published 4 June 2019.
10. Bereza O. A. Simplicial Analysis of Cognitive Cards of Socio-Economic Systems. *Izvestiia IUFU. Tekhnicheskie nauki = Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2011, no. 11, pp. 151–161. (In Russian).

11. Marenko V. A. Simplicial analysis of cognitive structure. *Aktual'nye problemy prepodavaniya matematiki v tekhnicheskoy VUZe = Актуальные проблемы преподавания математики в техническом ВУЗе, Contemporary problems of mathematics teaching in technical university*. 2019, no. 7, pp. 199–207. (In Russian).

12. Roberts F. S. *Discrete Mathematical Models with Application to Social, Biological and Environmental Problems*. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1976. (Russ. ed.: Roberts F. S. *Diskretnye matematicheskie modeli s prilozheniyami k sotsial'nyy, biologicheskim i ekologicheskim zadacham*. Moscow, Nauka Publ., 1986. 496 p.).

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Александр Петрович Суходолов — профессор, научный руководитель, Байкальский государственный университет, заведующий лабораторией междисциплинарных эколого-экономических исследований и технологий, Лимнологический институт СО РАН, г. Иркутск, Российская Федерация, e-mail: science@bgu.ru.

Валентина Афанасьевна Маренко — кандидат технических наук, доцент, старший научный сотрудник, Институт математики им. С. Л. Соболева, Сибирское отделение Российской академии наук, г. Омск, Российская Федерация, e-mail: marenko@ofim. oscsbras.ru.

Вячеслав Евгеньевич Ложников — аспирант, Омский государственный университет им. Ф. М. Достоевского, г. Омск, Российская Федерация, e-mail: vereskanthem@gmail.com.

AUTHORS INFORMATION

Alexander P. Sukhodolov — Professor, University Head of Research, Baikal State University, Head of Laboratory for Interdisciplinary Ecological-Economic Research and Technologies, Limnological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russian Federation, e-mail: science@bgu.ru.

Valentina A. Marenko — PhD in Technical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher Sobolev Institute of Mathematics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Omsk, Russian Federation, e-mail: marenko@ofim.oscsbras.ru.

Vyacheslav Ye. Lozhnikov — Graduate Student, Dostoyevsky Omsk State University, Omsk, Russian Federation, e-mail: vereskanthem@gmail.com.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ

Суходолов А. П., Маренко В. А., Ложников В. Е. Апробация метода моделирования объектов с применением иерархического подхода / А. П. Суходолов, В. А. Маренко, В. Е. Ложников // System Analysis & Mathematical Modeling. — 2020. — Т. 2, № 2. — С. 37–48.

FOR CITATION

Sukhodolov A. P., Marenko V. A., Lozhnikov V. Ye. Validation of method of modelling objects using hierarchical approach. System Analysis & Mathematical Modeling, 2020, vol. 2, no. 2, pp. 37–48. (In Russian).