

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СИНТЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ УГОЛЬНОЙ ШАХТЫ С ПОЗИЦИЙ СИСТЕМОТЕХНИЧЕСКОГО ПОДХОДА И ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОМПОЗИЦИОННЫХ ГИБРИДНЫХ НЕЧЕТКИХ МОДЕЛЕЙ

Агафонов В.В.<sup>1</sup>, Козлова О.Ю.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Национальный исследовательский технологический университет «МИСИС», Москва;

<sup>2</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва

**Ключевые слова:** угольная шахта, процедура синтеза, производственные правила, системотехнический подход, концептуальное представление, гибридные нечеткие модели.

**Аннотация.** В рамках использования когнитивного подхода к моделированию функциональной структуры технологической системы угольной шахты представлены концептуальные методические основы и положения, принципы обоснования процедуры синтеза проектных решений, которые закладываются в методологическую основу рабочей методики с привлечением элементов долгосрочного динамического анализа при различных альтернативных сценариях. В рамках этого представления предлагается использование логического и математического аппарата формирования формализованной модели, которая позволяет не только объединить в единое целое разрозненные составляющие подсистем, но и сформировать прогнозную ретроспективную количественную и качественную составляющую функционирования и развития технологической системы угольной шахты в пространственно-временном интервале жизненного цикла угледобывающего предприятия. Предложено алгоритмическое обеспечение итерационных процедур синтеза, генерации и проверки конечного множества альтернативных проектных решений устойчивой функциональной структуры в сложившихся макроэкономических условиях с учетом рационализации природопользования. Описана блок-схема алгоритма адаптации методологии когнитивного моделирования к заявленной процедуре с использованием системотехнического подхода и композиционных гибридных нечетких моделей.

## DESIGN AND SYNTHESIS OF THE TECHNOLOGICAL SYSTEM OF A COAL MINE FROM THE STANDPOINT OF A SYSTEM-TECHNICAL APPROACH AND THE USE OF COMPOSITE HYBRID FUZZY MODELS

Agafonov V.V.<sup>1</sup>, Kozlova O.Yu.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>National Research Technological University "MISIS", Moscow;

<sup>2</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow

**Keywords:** coal mine, synthesis procedure, production rules, system engineering approach, conceptual representation, hybrid fuzzy models.

**Abstract.** Within the framework of using a cognitive approach to modeling the functional structure of the technological system of a coal mine, conceptual methodological foundations and provisions, principles of substantiation of the procedure for synthesizing design solutions are presented, which are laid down in the methodological basis of the working methodology involving elements of long-term dynamic analysis under various alternative scenarios. Within the framework of this presentation, it is proposed to use the logical and mathematical apparatus for forming a formalized model for the synthesis of the technological system of a coal mine, which allows not only to combine the disparate components of subsystems into a single whole, but also to form a predictive retrospective quantitative and qualitative component of the functioning and development of the technological system of a coal mine in the space-time interval of the life cycle of a coal mining enterprise. Algorithmic support of iterative procedures for the synthesis, generation and verification of a finite set of alternative design solutions for a stable functional structure of technological systems of coal mines in modern macroeconomic conditions, taking into account the rationalization of environmental management, is proposed. The flowchart of the algorithm for adapting the cognitive modeling methodology to the procedure for synthesizing the technological system of a coal mine using a system-technical approach and composite hybrid fuzzy models is described.

**Введение.** С позиций системотехнического подхода угледобывающие технологии можно ассоциировать с динамичными и саморазвивающимися производственными системами с наличием базовой подсистемы – функциональной структуры технологической

системы, которая должна быть наделена целевыми адаптационными свойствами к изменяющейся горно-геологической и производственно-технической среде функционирования в максимально сжатые сроки, сохраняя при этом приемлемые целевые индикаторы технико-экономической эффективности [1, 2].

Учитывая данные аспекты, под технологической системой угледобывающего предприятия с подземным способом добычи можно заявить функционально-организационную совокупность взаимоувязанных во времени и пространстве технологических решений и технических средств ведения подземных горных работ соответствующего оснащения, совокупность регламентированных процессов и операций горного производства и людских ресурсов для их выполнения. Такая система обычно представляется в виде комплекса подсистем, которые имеют непрерывные и дискретные связи.

Данные технологические подсистемы наделены различными функциональными свойствами на основе различных выполняемых производственных процессов и операций, но все они соподчинены одной единственной цели: добыче определенного объема угольной продукции за определенный промежуток времени с определенными эксплуатационными издержками.

Безусловно, эти технологические подсистемы обладают и различными эксплуатационными свойствами, но все они должны обладать свойствами сопряженности и адаптации друг к другу с возможностями трансформации и приспособляемости к динамически изменяющейся горно-геологической и горнотехнической сред эксплуатации в минимально сжатые регламентированные сроки.

При этом заявленная проблема синтеза и проведения динамического анализа реализуемости синтезированных проектов напрямую увязывается с использованием методов, которые предусматривают реализацию «мягких вычислений», причем наибольшего синергетического эффекта можно достичь только при системной интеграции высокоэффективных и хорошо себя зарекомендовавших в практическом плане методов и технологий поддержки принятия проектных решений [3, 4].

**Содержательная часть.** Интеграционные аспекты и прерогативы использования когнитивной науки в последних исследованиях теоретического и прикладного характера обозначаются и актуализируются многочисленными исследователями. При этом подчеркивается очевидная и безапелляционная связь когнитивных подходов с теорией устойчивого развития производственных систем [5].

В связи с этим, основными преимуществами данного методологического подхода с использованием технологических платформ когнитивного моделирования являются [6, 7]:

- представление и структурно-функциональная идентификация объекта моделирования на базе факторно-концепторного симулятора посредством алгоритмического обеспечения теории графов;

- возможность проведения многомасштабного ситуационного моделирования посредством варьирования количества и взаимосвязей основных технологических подсистем (факторов-концептов) объекта моделирования в соответствии с целевыми индикаторами-показателями технико-экономической эффективности функционирования и устойчивого развития промышленного предприятия в динамической постановке в соответствии с новыми актуальными особенностями и ограничениями макроэкономической обстановки;

- возможность привлечения к сравнительной оценке и анализу альтернативных вариантов технологических систем производственных систем и сценариев их развития;

- возможность эффективной структуризации и выбора оптимального синтезированного варианта проектных решений технологической системы в периоде моделирования сценария стратегии ее устойчивого развития.

На базе этих представлений и продукционных правил основополагающего целеполагания блок-схему алгоритма адаптации методологии когнитивного моделирования к заявленной области проблематики можно представить в следующем виде (рис. 1).

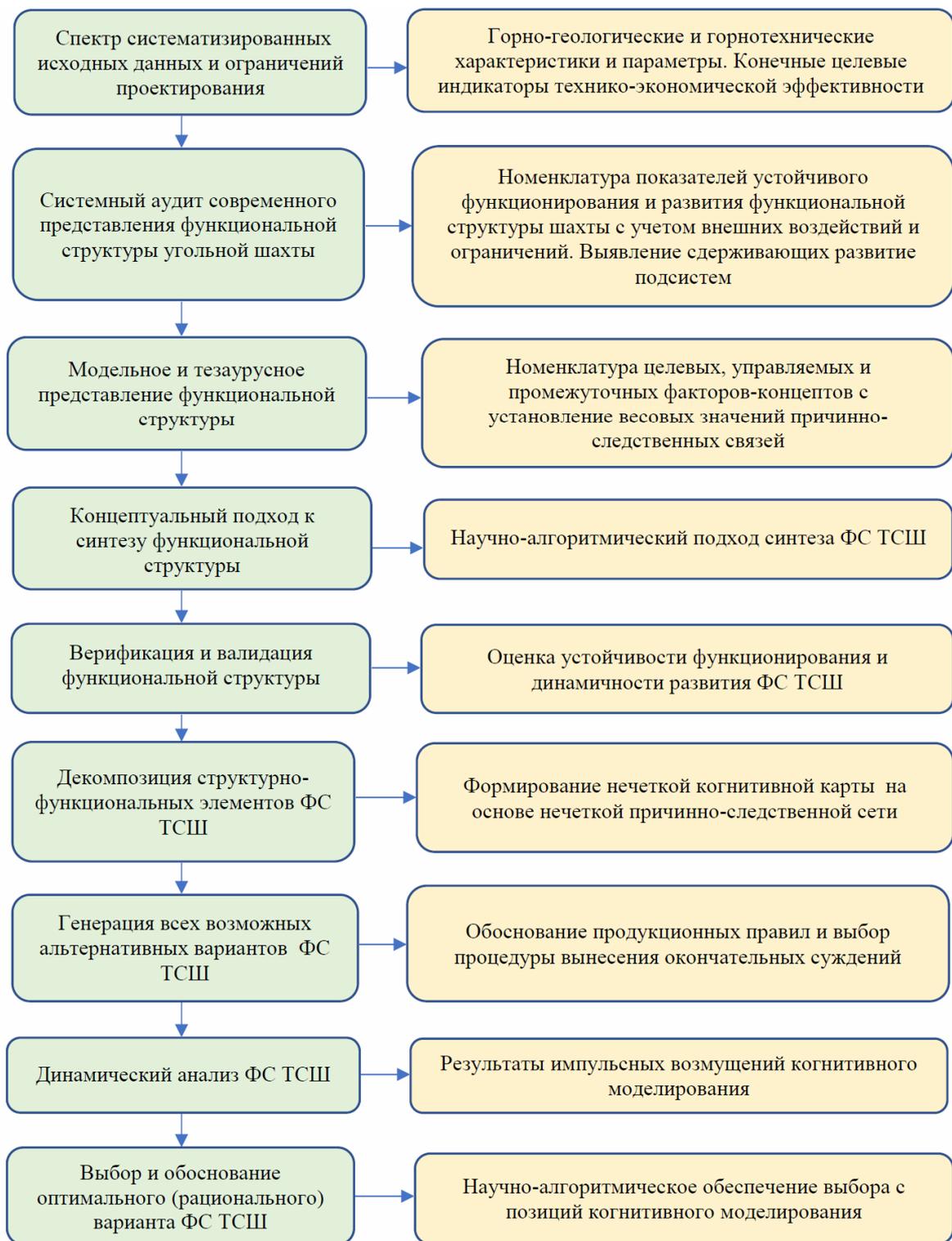


Рис. 1. Блок-схема алгоритма адаптации методологии когнитивного моделирования к процедуре синтеза технологической системы угольной шахт

Исходя из этого и общепринятых представлений, стратегические итерационные процедуры проектирования делятся на этапные составляющие *синтеза, анализа и так называемого «черного ящика»*, имеющих различные степени детализации и воплощения [8].

Основной и конечной целью первой итерационной составляющей является выбор и обоснование устойчивой функциональной структуры, полностью соответствующей требованиям промышленно-экологической безопасности и адаптивной к основным тенденциям и закономерностям изменения среды функционирования, обладающей соответствующей надежностью и энтропией.

Основной целью второй итерационной составляющей (*анализ*) является выявление степени качества осуществления производственно-хозяйственной деятельности синтезированной технологической системы угледобывающего предприятия с подземным способом добычи в современных условиях недропользования и действующих ограничениях макроэкономического характера.

Основной целью третьей итерационной составляющей («*черный ящик*») является воплощение в жизнь постулата оптимизации функциональной структуры при смене и трансферте угледобывающих технологий и парадигм недропользования.

Структурные элементы, представленные в рамках технологической системы угольной шахты в рамках системотехнического подхода имеют в этом случае как качественное  $E$ , так и количественное измерение  $S$ . Качественные составляющие (параметры) представлены технологическими структурами отработки запасов, схемами вскрытия и подготовки, транспорта, дегазации и др.

Количественные параметры представлены объемами добытого угля, длиной очистного забоя и др.

С учетом вышеприведенного технология угледобычи заявляется в виде самоорганизующейся производственной системы с динамичным развитием с соответствующими совокупностями входных и выходных концептов.

Совокупности концептов формализуются в следующем виде:

- целевые выходные концепты-индикаторы, имеющие максимальную степень приближения к достигнутым значениям;
- управляемые входные концепты, которые должны иметь свойство корректировки их значений в доверительном интервале;
- внешние концепты, которые оказывают непосредственное влияние на значения целевых и управляемых концептов.

Текущее состояние функциональной структуры технологической системы шахты характеризуется конечным набором значений всех ее составляющих концептов, а чтобы охарактеризовать целевое состояние, используется вектор значений составляющих целевых концептов-индикаторов.

Методология когнитивного моделирования требует реализации процедуры установления причинно-следственных взвешенных связей между учитываемыми концептами с установлением знака конъюнкции (знак «+» ставится при усиливающемся влиянии и интенсивности, а знак «-» при ослабляющемся) с соответствующими весовыми влияниями (корреляционно-регрессионный анализ; экспертные методы с установлением степеней принадлежности (Томаса-Саати, Ягера и др.); методы, использующие процедуры, позволяющие установить идентификацию  $\alpha$ -срезов принятого к учету нечеткого множества).

Далее для реализации процедуры анализа предыдущих итераций необходимо установление степени взаимовлияния сформированных факторов (используется алгоритм В.Б. Силова с продукционными правилами транзитивного замыкания с элементными парами сил влияния концептов с положительным и отрицательным влиянием).

Внутренняя структура входных и выходных концептов представлена элементами пространства векторного типа и характеризуется материальными ( $S$ ), энергетическими ( $En$ ) и технологическими ( $I$ ) потоками.

В последнее время устоявшимся является подход, согласно которому некоторые когнитивные модели можно использовать в рамках предварительного анализа проблемных ситуаций синтеза, а некоторые, в частности, гибридные модели непосредственно для процедуры синтеза проектных решений, так как именно они имеют наибольшую практическую полезность и функциональную возможность замены, трансформации и усовершенствования отдельных составляющих-компонентов нечетких когнитивных моделей функциональных структур и сформировать прерогативу их выбора за счет расширения возможностей, улучшения базовых свойств, конструктивизма и многоагентности моделей. В этом классе когнитивных моделей наибольшая степень использования присуща

рекуррентным когнитивным ANFIS-моделям (RecANFIS) с конкретным структурным наполнением [9, 10] (визуализация конечных результатов моделирования представлена на рисунке 2).

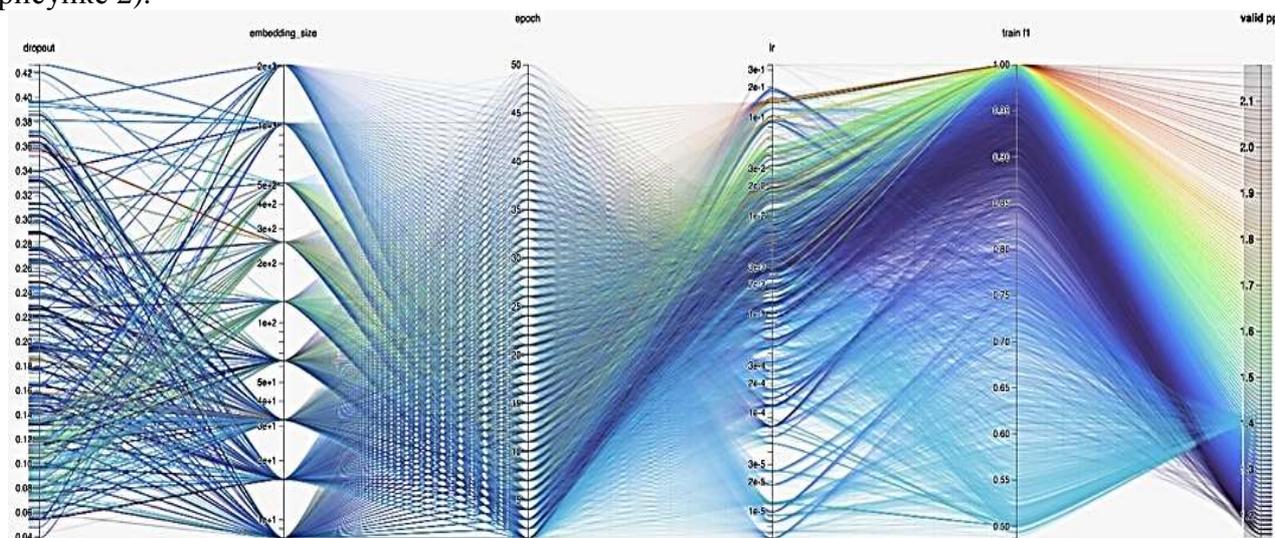


Рис. 2. Визуализация рекуррентной гибридной когнитивной ANFIS-модели (RecANFIS) [7]

Ее отличительной особенностью является наличие в функциональной структуре нечетко-нейросетевой когнитивной темпоральной модели модуля минимизации ошибок процедуры прогнозирования поведения системы. Таким образом, это дает возможность использовать при алгоритмическом наполнении процесса моделирования так называемый *целевой конечный синтезированный образ шахты*, формирующийся итеративно путем перевода набора составляющих проектных решений из состояния  $S^i$  в состояние  $S^{i+1}$  со *стратегическим оптимальным шагом*  $S^i \rightarrow S^{i+1}$  на основе их сравнительной оценки.

Целевое конечное состояние синтезированного образа технологической системы угольной шахты  $S^C$  считается достигнутым, если сравнительная оценка системы по целевым конечным индикаторам технико-экономической эффективности, заданных в виде функционала достижения целей процедуры синтеза альтернативных проектных решений, показывает их превалирующее значение.

**Выводы.** Исходя из вышеизложенного, можно актуализировать и сформировать единый методологический подход, обладающий достаточной наглядностью и удовлетворяющий интерпретации к оценке итоговых и промежуточных взаимозависимостей функционирования синтезированной технологической системы угольной шахты с привлечением методических положений *нечеткой каузальной алгебры*.

Детальный анализ исследований в сфере использования и адаптации когнитивного моделирования в проблематичной области, результаты которых можно относительно независимо задействовать для их углубленного исследования и последующей трансформации показал наличие двух основных направлений.

1. Использование гибридных нечетких когнитивных моделей, основанных и разработанных на использовании *принципа «функционального замещения»*. Этот подход основан на трансформации и усовершенствовании отдельных составляющих структуры «базовых» нечетких когнитивных моделей более совершенными компонентами моделей, основанных на других представлениях, которые расширяют функционал возможностей с улучшенными свойствами.

2. Использование композиционных гибридных нечетких моделей, основанных и разработанных на использовании *принципа гибридизации «с взаимодействием»*. Этот подход основан на относительной независимости использования разных по своей природе нечетких когнитивных моделей для решения различных частных задач в рамках достижения общей стратегической цели.

**Заключение.** Осуществление проектной деятельности с привлечением системотехнического подхода и композиционных гибридных нечетких моделей позволяет сформировать производственные правила, при которых:

– создаются условия для формализации и всестороннего анализа не только целостной технологической системы, но и слагающих ее отдельных подсистем с присущими проблемными ситуациями с обеспечением требуемого уровня надежности и достоверности результатов моделирования;

– осуществляется одновременный учет стохастической и статистической неопределенности в границах единой модели;

– допускается одновременное использование и вовлечение в процесс моделирования разнородной исходной информации, представленной в различных системах шкалирования;

– производится системный и комплексный учет прямого, опосредованного и интегрированного взаимовлияния всех системных и граничных факторов с целью обеспечения требуемой эмерджентности моделируемой технологической системы с набором производственных процессов и проблемных ситуаций;

– достигается требуемый уровень единства представления системных и граничных факторов и их параметров, вида целевых функций, критериев оптимальности и ограничений в свете использования процедуры нечеткой грануляции.

#### Список литературы

1. Оразбаев Б.Б. Исследование проблем моделирования и принятия решений при управлении установкой риформинга и подходы к решению // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2022. – Т. 14, № 2(54). – С. 82-95.
2. Горобченко С.Л. Современное состояние применения и развития методов искусственного интеллекта в промышленных регуляторах и интеллектуальных системах управления // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2023. – № 3. – С. 106-112. – DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-106-112.
3. Борисов В.В. Нечёткие когнитивные модели как основа для исследования сложных систем и процессов // Речевые технологии. – 2020. – №. 1-2. – С. 48-62.
4. Босиков И.И. Разработка метода анализа и гибридного имитационного моделирования сложных технических систем переменной структуры // Известия Кабардино-Балкарского научного центра РАН. – 2022. – № 1(105). – С. 25-40. – DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-25-40.
5. Ткалич С.А. Гибридная методика практической реализации системы принятия решений по приоритетному регулированию // Известия Южного федерального университета. Технические науки. – 2021. – № 7(224). – С. 31-40. – DOI: 10.18522/2311-3103-2021-7-31-40.
6. Леденева Т.М., Решетников А.Д. Особенности реализации механизма нечеткого логического вывода в нечетких системах // Международный научно-исследовательский журнал. – 2021. – № 6-1(108). – С. 107-111. – doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.018.
7. Кочегурова Е.А., Репина Е.Ю., Цехан О.Б. Гибридный подход для краткосрочного прогнозирования временных рядов на основе штрафного P-сплайна и эволюционной оптимизации // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 821-829. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-667.
8. Горелова Г.В. Когнитивное моделирование сложных систем: состояние и перспективы // Системный анализ в проектировании и управлении. – 2021. – Т. 25, № 1. – С. 224-248. – DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-66.
9. Дышленко С.Г. Когнитивное моделирование в геоинформатике // Науки о Земле. – 2020. – № 1. – С. 68-79.
10. Осипов В.П., Рыков Ю.Г., Четверушкин Б.Н. Математические аспекты понятия влияния в концепции когнитивного моделирования // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2021. – № 2. – С. 3-10. – DOI: 10.14357/20718594210201.

#### References

1. Orazbaev B. B. Research of modeling and decision-making problems in the management of a reforming installation and approaches to solving them // Bulletin of the Kazan State Energy University. 2022, vol. 14, no. 2 (54), pp. 82-95.
2. Gorobchenko S. L. The current state of the application and development of artificial intelligence methods in industrial regulators and intelligent control systems // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2023, no. 3, pp. 106-112. DOI: 10.24412/2071-6168-2023-3-106-112.
3. Borisov V.V. Fuzzy cognitive models as a basis for the study of complex systems and processes // Speech Technologies. 2020, no. 1-2, pp. 48-62.

4. Bosikov I.I. Development of a method for analysis and hybrid simulation of complex technical systems of variable structure // Proceedings of Kabardino-Balkarian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022, no. 1(105), pp. 25-40. DOI: 10.35330/1991-6639-2022-1-105-25-40.
5. Tkalich S.A. Hybrid methodology of practical implementation of the decision-making system for priority regulation // Proceedings of the Southern Federal University. Technical sciences. 2021, no. 7(224), pp. 31-40. DOI: 10.18522/2311-3103-2021-7-31-40.
6. Ledeneva T.M., Reshetnikov A.D. Features of the implementation of the fuzzy inference mechanism in fuzzy systems // International Scientific Research Journal. 2021, no. 6-1(108), pp. 107-111. doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.018.
7. Kochegurova E.A., Repina E.Yu., Tsekhan O.B. Hybrid approach for short-term time series forecasting based on penalty P-spline and evolutionary optimization // Computer optics. 2020, vol. 44, no. 5, pp. 821-829. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-667.
8. Gorelova G.V. Cognitive modeling of complex systems: state and prospects // System analysis in design and management. 2021, vol. 25, no. 1, pp. 224-248. DOI: 10.18720/SPBPU/2/id21-66.
9. Dyshlenko S.G. Cognitive modeling in geoinformatics // Earth Sciences. 2020, no. 1, pp. 68-79.
10. Osipov V.P., Rykov Yu.G., Chetverushkin B.N. Mathematical aspects of the concept of influence in the concept of cognitive modeling // Artificial intelligence and decision-making. 2021, no. 2, pp. 3-10. DOI: 10.14357/20718594210201.

*Сведения об авторах:*

*Information about authors:*

<b>Агафонов Валерий Владимирович</b> – доктор технических наук, профессор кафедры «Геотехнологии освоения недр»	<b>Agafonov Valery Vladimirovich</b> – doctor of technical sciences, professor of the Department of geotechnology of subsurface development
<b>Козлова Ольга Юрьевна</b> – кандидат технических наук, доцент кафедры «Высшая математика»	<b>Kozlova Olga Yurievna</b> – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of higher mathematics
agafonofvv@yandex.ru	

*Получена 04.06.2024*