

# Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья

**А. Ю. Пучков<sup>1\*</sup>, М. И. Дли<sup>1,2</sup>, Н. Н. Прокимнов<sup>2</sup>, Д. Ю. Шутова<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Филиал ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет «МЭИ»  
в г. Смоленске, Смоленск, Россия,

<sup>2</sup>Университет «Синергия», Москва, Россия  
\*putchkov63@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты исследований, целью которых была разработка многоуровневых алгоритмов принятия решений по управлению энергетической и ресурсной эффективностью, техногенной и экологической безопасностью комплексной многостадийной системы переработки мелкодисперсного рудного сырья (МСПМРС). Отличительной особенностью такой системы является ее многомерность и многомасштабность, проявляющаяся в наличии двух вариантов реализации технологических процессов переработки мелкодисперсного рудного сырья (МРС), необходимости учета взаимодействия входящих в систему агрегатов, а также иерархии описания процессов, протекающих в них, – механических, теплофизических, гидродинамических, физико-химических. Такое разнообразие процессов характеризует междисциплинарность исследований и сложность получения аналитических, взаимоувязанных математических моделей. Эта ситуация инспирировала применение для описания и анализа процессов методы искусственного интеллекта, такие как глубокое машинное обучение и нечеткая логика. Научная составляющая результатов исследования заключается в разработанной обобщенной структуре МСПМРС, концептуальной основе многоуровневых алгоритмов оценки и принятия решений по оптимальному управлению этой системой, предложенном составе параметров и форме критерия оптимизации. Задача исследования состояла в проведении анализа возможных вариантов переработки рудного сырья, выработке концепции построения МСПМРС, допускающей возможность оптимизации ее функционирования по критерию энергоресурсоэффективности при обеспечении требований экологической безопасности. Анонсировано применение эволюционных алгоритмов для решения задачи оптимизации МСПМРС по критерию минимума энергоресурсопотребления и конкретизированы ее этапы. Представлена структура блока нейронечеткого анализа информации о параметрах процессов в МСПМРС, в основе которого лежит использование глубоких рекуррентных и сверточных нейронных сетей, а также системы нечеткого логического вывода. Приведены результаты имитационного эксперимента по апробации программной реализации данного блока в среде MatLab.

**Ключевые слова:** системы принятия решений, переработка мелкодисперсного рудного сырья, методы искусственного интеллекта

**Для цитирования:** Пучков А.Ю., Дли М.И., Прокимнов Н.Н., Шутова Д.Ю. Многоуровневые алгоритмы оценки и принятия решений по оптимальному управлению комплексной системой переработки мелкодисперсного рудного сырья // Прикладная информатика. 2022. Т. 17. № 6. С. 102–121. DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121

# Multilevel algorithms for evaluating and making decisions on the optimal control of an integrated system for processing fine ore raw materials

A. Puchkov<sup>1\*</sup>, M. Dli<sup>1,2</sup>, N. Prokimnov<sup>2</sup>, D. Shutova<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia

<sup>2</sup>Synergy University, Moscow, Russia

\*putchkov63@mail.ru

**Abstract.** The results of studies aimed at developing multi-level decision-making algorithms for management of energy and resource efficiency, technogenic and environmental safety of a complex multi-stage system for processing fine ore raw materials are presented (MSPFORM). A distinctive feature of such a system is its multidimensionality and multiscale, which manifests itself in the presence of two options for implementing technological processes for processing finely dispersed ore raw materials, the need to take into account the interaction of the aggregates included in the system, as well as the hierarchy of describing the processes occurring in them - mechanical, thermophysical, hydrodynamic, physical and chemical. Such a variety of processes characterizes the interdisciplinarity of research and the complexity of obtaining analytical, interconnected mathematical models. This situation inspired the analyze use of artificial intelligence methods, such as deep machine learning and fuzzy logic, to describe and analyze processes. The scientific component of the research results consists in the developed generalized structure of the MSPFORM, the conceptual basis of multilevel algorithms for evaluating and making decisions on the optimal control of this system, the proposed composition of the parameters and the form of the optimization criterion. The task of the study was to analyze possible options for the processing of ore raw materials, to develop a concept for the construction of the MSPFORM allowing the possibility of optimizing its functioning according to the criterion of energy and resource efficiency while meeting the requirements of environmental safety. The application of evolutionary algorithms for solving the problem of optimizing the MSPFORM according to the criterion of minimum energy consumption is announced and its stages are specified. The structure of the block of neuro-fuzzy analysis of information about the parameters of processes in MSPFORM is presented, which is based on the use of deep recurrent and convolutional neural networks, as well as a fuzzy inference system. The results of a simulation experiment on approbation of the software implementation of this block in the MatLab environment are presented.

**Keywords:** decision-making systems, processing of fine ore raw materials, artificial intelligence methods

**For citation:** Puchkov A., Dli M., Prokimnov N., Shutova D. Multilevel algorithms for evaluating and making decisions on the optimal control of an integrated system for processing fine ore raw materials. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2022, vol.17, no.6, pp.102-121 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2022-17-6-102-121

## Введение

Орнорудная промышленность относится к числу наиболее энергоемких отраслей экономики Российской Федерации: потребление топливно-энергетических ресур-

сов на одного занятого в добыче полезных ископаемых составляет 72,5 тонны условного топлива, что более чем в два раза превышает аналогичный показатель для отрасли производства и распределения электроэнергии, занимающей второе место в этом рей-