

# Модель оценки энергоресурсоэффективности процессов переработки мелкорудного сырья на основе дерева систем нечеткого вывода

А.Ю. Пучков<sup>1\*</sup>, М.В. Максимкин<sup>1</sup>, А.В. Зедаина<sup>1</sup>, Я.А. Федулов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Филиал Национального исследовательского университета «МЭИ» в г. Смоленске, Смоленск, Россия  
putchkov63@mail.ru

**Аннотация.** Представлена программная модель сложных процессов переработки мелкорудного сырья на основе обучаемого дерева систем нечеткого логического вывода. Переработка такого сырья обеспечивает не только получение ценного конечного продукта, например такого, как желтый фосфор, но и способствует решению проблемы утилизации рудных отходов, мелкодисперсные фракции которых наносят значительный экологический ущерб территориям, прилегающим к горно-обогатительным комбинатам. Технологическая система переработки мелкорудного сырья состоит из энергоресурсоемких агрегатов, поэтому даже незначительное относительное снижение затрат ресурсов и энергии приводит к большой экономии в абсолютных цифрах. Такое снижение может достигаться за счет оптимизации управления агрегатами, синтез которого требует наличия моделей технологических процессов, поэтому совершенствование методов и инструментария моделирования является актуальной исследовательской задачей. Особенностью предложенной модели является то, что ее входами являются не только переменные, описывающие преобразования ресурса, но и переменные, отражающие энергозатраты отдельных технологических агрегатов. Это позволяет применять модель для расчета энергоресурсоэффективности переработки мелкорудного сырья. Иерархическая структура нечетко-логического дерева способна отражать взаимосвязь процессов различной природы, сопровождающих переработку мелкорудного сырья, а также способствует повышению эффективности ее обучения за счет разбиения признакового пространства большой размерности на несколько групп, на которых обучаются отдельные узлы дерева. Программа, разработанная в среде MatLab и реализующая предложенную модель, показала высокую точность регрессии на синтетическом наборе входных данных, что может свидетельствовать о целесообразности применения предложенной модели в задачах оптимизации систем управления переработкой мелкорудного сырья по критерию энергоресурсоэффективности.

**Ключевые слова:** машинное обучение, иерархические системы нечеткого логического вывода, переработка мелкодисперсного рудного сырья

**Для цитирования:** Пучков А.Ю., Максимкин М.В., Зедаина А.В., Федулов Я.А. Модель оценки энергоресурсоэффективности процессов переработки мелкорудного сырья на основе дерева систем нечеткого вывода // Прикладная информатика. 2025. Т. 20. № 1. С. 85–99. DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-1-85-99

# Model for assessing energy and resource efficiency of process recycling small-ore raw material based on a tree of fuzzy inference systems

A. Puchkov<sup>1\*</sup>, M. Maksimkin<sup>1</sup>, A. Zedaina<sup>1</sup>, Ya. Fedulov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Branch of the National Research University "MPEI" in Smolensk, Smolensk, Russia  
\*putchkov63@mail.ru

**Abstract.** The article presents a software model of complex processes of small-scale ore raw material processing based on a trainable tree of fuzzy logical inference systems. Processing of such raw materials not only provides a valuable end product, such as yellow phosphorus, but also helps to solve the problem of ore waste disposal, the fine fractions of which create significant environmental damage to the territories adjacent to mining and processing plants. The technological system of small-scale ore raw material processing consists of energy-intensive units, so even a slight relative reduction in resource and energy costs leads to large savings in absolute figures. Such a reduction can be achieved by optimizing the control of units, the synthesis of which requires the availability of process models, so improving the methods and tools for modeling is an urgent research task. A feature of the proposed model is that its inputs are not only variables describing resource transformations, but also variables reflecting the energy costs of individual technological units. This allows using the model to calculate the energy and resource efficiency of small-scale ore raw material processing. The hierarchical structure of the fuzzy-logical tree is capable of reflecting the interrelationship of processes of various natures accompanying the processing of small-scale raw materials, and also contributes to increasing the efficiency of its training by dividing the feature space of large dimension into several groups on which individual tree nodes are trained. The program developed in the MatLab environment and implementing the proposed model showed high regression accuracy on a synthetic set of input data, which may indicate the feasibility of using the proposed model in problems of optimizing control systems for processing small-scale raw materials according to the criterion of energy and resource efficiency.

**Keywords:** machine learning, hierarchical fuzzy inference systems, fine ore processing

**For citation:** Puchkov A., Maksimkin M., Zedaina A., Fedulov Ya. Model for assessing energy and resource efficiency of process recycling small-ore raw material based on a tree of fuzzy inference systems. *Prikladnaya informatika*=Journal of Applied Informatics, 2025, vol.20, no.1, pp.85-99 (in Russian). DOI: 10.37791/2687-0649-2025-20-1-85-99

## Введение

Одним из источников мелкорудного сырья является мелкодисперсная фракция отходов обогащения руд на горно-обогатительных комбинатах. Эти отходы в больших объемах скапливаются на прилегающих к комбинатам террито-

риях и безвозвратно теряются в результате ветровой и водной эрозии, оказывая существенное негативное влияние на природную среду [1]. Поэтому актуальной исследовательской задачей является создание технологии утилизации этих отходов, а также разработка для нее информацион-