

УДК 622.772

DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-1-31-39

**ПОСТРОЕНИЕ И СРАВНЕНИЕ РЕГРЕССИОННЫХ МОДЕЛЕЙ ОБОГАЩЕНИЯ  
ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩЕГО СЫРЬЯ В ЦЕНТРОБЕЖНОЙ ОТСАДОЧНОЙ МАШИНЕ****DEVELOPMENT AND COMPARISON OF THE REGRESSION MODELS OF  
GOLD-BEARING MATERIAL SEPARATION USING A CENTRIFUGAL JIGGING MACHINE**

**М. С. Лучко,**  
АО «Иргиредмет», г. Иркутск  
maxuse@gmail.com

**M. Luchko,**  
JSC «Irgiredmet»,  
Irkutsk



**П. К. Федотов,**  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет, г. Иркутск  
fedotovpavel@yandex.ru

**P. Fedotov,**  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk



**Н. Д. Лукьянов,**  
Иркутский национальный исследовательский  
технический университет, г. Иркутск  
lukyanov.n@gmail.com

**N. Lukyanov,**  
Irkutsk National Research Technical University,  
Irkutsk

**С**нижение качества золотосодержащих руд характерно для всех стран, ведущих добычу золота. Всё чаще в отработку вовлекаются месторождения с низким содержанием ценного компонента и сложным вещественным составом, для переработки руд которых применяются, в основном, гидрометаллургические методы обогащения, например кучное выщелачивание. Применение цианида натрия, а также его заменителей является экологически небезопасным методом. В этом аспекте актуально развитие гравитационных методов обогащения, таких как отсадка в центробежном поле. Разработаны две математические модели, позволяющие прогнозировать значения содержания и извлечения ценного компонента в продуктах обогащения центробежной отсадочной машины (ЦОМ) при изменении регулируемых технологических параметров, а именно: скорости вращения отсадочной камеры, амплитуды и частоты пульсации подвижного днища и расхода подрешётной воды. Математические модели построены методом регрессионного анализа. В качестве исходных данных для построения моделей приняты результаты натурных испытаний промышленного образца центробежной отсадочной машины конструкции АО «Иргиредмет» на золотоизвлекательных фабриках (ЗИФ). В результате математического моделирования ранжированы по степени влияния на процесс обогащения регулируемые технологические параметры ЦОМ, выявлена модель, позволяющая с меньшей ошибкой прогнозировать значения технологических параметров обогащения (извлечения ценного компонента в концентрат) при изменении настраиваемых параметров обогащения в ЦОМ. *Объект исследования* – центробежно отсадочный метод обогащения золотосодержащих руд. *Предмет исследования* – математическое моделирование процесса обогащения золотосодержащей руды в ЦОМ. *Цель исследования* – определить и ранжировать по степени влияния на процесс обогащения регулируемых технологических параметров ЦОМ с выявлением модели, позволяющей с меньшей ошибкой прогнозировать значения технологических параметров обогащения. *Методология исследования* – определение взаимосвязи между зависимостями содержания и извлечения золота в продукты обогащения и регулируемые технологическими параметрами ЦОМ. *Методы исследования* – метод регрессионного анализа, математического моделирования

**Ключевые слова:** математическая модель, регрессионный анализ, метод наименьших квадратов, гравитационный метод обогащения, центробежная отсадочная машина, обогащение золотосодержащего сырья, интенсификация процесса обогащения, полезные ископаемые, добыча и переработка сырья, отвальные хвосты

Decreasing ore grades is a common challenge for every gold mining country in the world. Deposits of low-grade and complex ores are increasingly brought into production. These ores are typically treated by hydrometallurgical methods, for example, heap leaching. Meanwhile, the use of cyanide and its alternatives poses a risk for the environment. Thus, the development of gravity methods including jigging in a centrifugal-field is becoming an attractive option of low-grade and complex ore processing. Two mathematical models have been developed using the regression method to predict grade and recovery characteristics of the products of a centrifugal jigging machine (CJM) with variable process parameters including jig chamber rotational speed, pulsation frequency and vibration amplitude of a movable cone, underscreen-water flow rate. The models are based on the results of the field trials of a pilot centrifugal jigging machine designed by JSC Irgiredmet at existing gold-processing plants. Mathematical modelling provided a means of the process parameters ranking according to their impact on the separation process. A model has been identified that ensures a more accurate prediction of the separation process variables (metal recovery in concentrate) when the CJM's adjustable parameters are changed. *The object of the study* is the centrifugal jigging method of gold-bearing ore separation. *The scope of the study* is mathematical modelling of gold-bearing ore separation using CJM. *The objective of the study* is the determination and ranking of the CJM's process parameters according to their impact on the separation process, identification of a model that ensures a more accurate prediction of the separation process variables. *The methodology of the study* involves finding the correlation between gold grade/gold recovery into the separation products and the CJM's adjustable parameters. *The method of the study* is regression analysis

**Key words:** mathematical model, regression analysis, method of least squares, gravity separation, centrifugal jigging machine, gold-bearing material separation, separation process intensification

**В**ведение. Минерально-сырьевые базы стран, ведущих добычу и переработку полезных ископаемых, постоянно изменяются [1; 8; 9; 10; 11], в связи с чем для поддержания и увеличения объёмов добычи и переработки сырья наряду с наращиванием производственных мощностей совершенствуются и осваиваются новые технологические процессы обогащения руд и песков, в которых большое внимание уделяется прогнозированию получаемых технологических показателей обогащения, в том числе при помощи методов математического моделирования.

*Объект исследования* – центробежно-отсадочный метод обогащения золотосодержащих руд.

*Предмет исследования* – математическое моделирование процесса обогащения золотосодержащей руды в ЦОМ.

*Цель исследования* – определить и ранжировать по степени влияния на процесс обогащения регулируемых технологических параметров ЦОМ с выявлением модели, позволяющей с меньшей ошибкой прогнозировать значения технологических параметров обогащения.

Наличие математической модели для обогатительного аппарата или процесса играет особую роль не только на стадии эксплуатации, но и при проведении научно-исследовательских и проектных работ, и позволяет получать максимальные показатели обогащения (содержание и извлечение

ценного компонента в продукты обогащения) путём математического определения оптимальных регулируемых параметров оборудования [3].

С конца 80-х гг. прошлого столетия приобрело известность центробежно-отсадочное обогащение, реализуемое в центробежно-отсадочных машинах, которые работают по принципу воздействия на обогащаемую смесь восходящих и нисходящих пульсаций с одновременным наложением центробежных сил.

В АО «Иргиредмет» разработан опытно-промышленный образец центробежной отсадочной машины с максимальной расчётной производительностью 15 т/ч, на котором проведены натурные испытания на ЗИФ.

Для разработки математических моделей в качестве исходных данных приняты результаты испытаний на ЗИФ 1 и ЗИФ 2. При испытаниях в промышленных условиях на ЗИФ 1 исходным питанием являлся весьма труднообогатимый материал с крайне неблагоприятным вещественным составом – отвальные хвосты цианирования фабрики. Преобладающим размером минеральных зёрен был класс крупности минус 0,125 мм – 92,7 %, а выход наибольшего размера класса крупностью +0,5 мм составлял 0,02 %. Содержание золота за время проведения исследований изменялось от 0,64 до 0,91 г/т. Учитывая, что исходная руда проходит многостадийное дробление и обогащение, а также процесс

цианирования, можно сказать, что в хвостах ЗИФ 1 свободного золота нет.

Исходным питанием ЦОМ на ЗИФ 2 были отвальные хвосты крупностью 79...83 % фракции минус 0,074 мм, представленные сливом гидроциклонов, полученного после двойной классификации в них слива спиральных классификаторов, в которые поступали хвосты гравитации ЗИФ. Содержание золота в исходном питании ЦОМ составляло 0,27...0,83 г/т, золото практически полностью связано с сульфидами, которые представлены большей частью пиритом.

В разработанных и сравниваемых математических моделях основными показателями, определяющими качество процесса обогащения, являются содержание и извлечение ценного компонента в концентрат, которые изменяются путём регулирования настраиваемых технологических параметров ЦОМ.

К регулируемым технологическим параметрам при обогащении полезного ископаемого в центробежной отсадочной машине относятся: частота вращения отсадочной камеры, частота и амплитуда пульсации постели ЦОМ, расход подрешетной технологической воды [4].

Содержание золота в продуктах обогащения определялось методом пробирного анализа.

Целью разработки и сравнения математических моделей является определение возможности прогнозирования значений содержания и извлечения золота в продукты обогащения при изменении технологических параметров работы ЦОМ и ранжирование их по значимости (степени влияния на интенсификации регулируемые технологическими параметрами ЦОМ).

*Выбор способа построения зависимостей.* При выборе метода построения математических моделей учитывался объём данных, полученных после проведения натурных испытаний ЦОМ. Так, для построения имитационных моделей или моделей в виде дифференциальных уравнений требуется большой массив данных [7], поэтому построение моделей осуществлялось методом регрессионного анализа, основой которого является метод наименьших квадратов. Регрессионные модели успешно применяются при построении математических моделей обогатительных аппаратов, в том числе для гравитационного обогащения [5].

Наряду с частотой вращения отсадочной камеры, частотой и амплитудой колебаний подвижного конуса в математические модели четвертым значимым параметром принят расход подрешетной воды как важный регулируемый технологический параметр отсадочных машин [10]. Содержание и извлечение золота в концентрат и хвосты в уравнениях регрессии обозначены как  $y_1$  и  $y_2$  соответственно, а регулируемые технологические параметры – как  $x_i$ , где  $i = 1(1)4$ .

Суть нахождения коэффициентов уравнения регрессии методом наименьших квадратов (МНК) заключается в поиске таких коэффициентов уравнения регрессии, при которых сумма квадратов прогнозируемых значений (ошибок) от полученных натурным путём данных будет минимальна [11].

По результатам натурных испытаний получены значения содержания и извлечения золота в продукты обогащения ЦОМ при конкретных регулируемых технологических параметрах  $x_i$  (табл. 1).

При обогащении материала в ЦОМ на получаемые значения содержания и извлечения золота в концентрат и хвосты ( $y_1$  и  $y_2$ ) кроме регулируемых технологических параметров ( $x_{1-4}$ ) влияют и другие факторы, например характеристики исходного питания, крупность и высота искусственной постели ЦОМ, удельная нагрузка по твёрдому и пульпе и др. В данном случае в уравнениях регрессий включают только основные регулируемые технологические параметры ЦОМ, остальные принимаются как постоянные.

В описываемых математических моделях регрессия – это прогнозирование значений содержания и извлечения при определённых параметрах частоты вращения отсадочной камеры, частоты и амплитуды колебаний, расхода подрешетной воды.

Для большей адаптивности линейной регрессии и минимизации среднеквадратичной ошибки может выглядеть целесообразно включение в уравнения максимального количества экспериментальных данных из табл. 1. Однако в этом случае модели будут идеально определять  $y_1$  и  $y_2$  только для указанного в таблице массива данных. При получении новых, фактически полученных значений содержания и извлечения будут существенно отличаться от прогнозируемых значений, полученных при помощи уравнений регрессии.

Таблица 1 / Table 1

Результаты испытаний ЦОМ на ЗИФ 1 и 2 / Results of the CJM's trials at Plant 1 and Plant 2

ЗИФ / Plant	Модель по содержанию ценного компонента / Grade model		Модель по извлечению ценного компонента / Recovery model		Частота вращения отсадочной камеры, мин <sup>-1</sup> , x <sub>1</sub> / Jig chamber rotational speed, min <sup>-1</sup> , x <sub>1</sub>	Частота колебаний подвижного конуса, мин <sup>-1</sup> , x <sub>2</sub> / Movable cone pulsation frequency, min <sup>-1</sup> , x <sub>2</sub>	Длина хода подвижного конуса, мм, x <sub>3</sub> / Movable cone stroke length, mm, x <sub>3</sub>	Расход подрешётной воды, м <sup>3</sup> /ч, x <sub>4</sub> / Underscreen-water flow rate, m <sup>3</sup> /h, x <sub>4</sub>
	Содержание золота в концентрате (y <sub>1</sub> ), г/т / Gold in concentrate (y <sub>1</sub> ), g/t	Содержание золота в хвостах (y <sub>2</sub> ), г/т / Gold in tailings (y <sub>2</sub> ), g/t	Извлечение золота в концентрат (y <sub>1</sub> ), % / Gold recovery in concentrate (y <sub>1</sub> ), %	Извлечение золота в хвостах (y <sub>2</sub> ), % / Gold recovery in tailings (y <sub>2</sub> ), %				
1	0,68	0,63	12,5	87,5	95	200	18	10
	0,78	0,7	5,9	94,1	85	200	24	10
	0,88	0,63	15,9	84,1	115	200	12	10
	0,92	0,65	25,9	74,1	125	200	12	10
	2,2	1,3	19,3	80,7	150	200	9	5
	1,04	0,71	20,4	79,6	150	200	12	10
	0,9	0,6	20,1	79,9	150	240	12	7
	1,21	0,82	29,9	70,1	150	300	14	10
	1,23	0,86	31,1	68,9	150	300	14	10
	0,9	0,6	17,5	82,5	175	200	12	7
	2,2	0,8	20,1	79,9	175	250	9	5
	1,07	0,72	28,6	71,4	200	240	14	10
	1,3	0,5	26,5	73,5	200	280	9	5
	2,56	1,72	18,1	81,9	220	240	12	7
	2,64	1,3	22,3	77,7	220	240	12	7
2	0,78	0,7	5,54	94,46	85	200	24	10
	0,68	0,63	12,83	87,17	95	200	18	10
	0,73	0,68	12,77	87,23	105	200	12	10
	0,88	0,63	16	84	115	200	12	10
	0,92	0,86	21,1	78,9	125	200	12	10
	1,04	0,71	27,55	72,45	150	240	12	10
	1,21	0,82	29,76	70,24	150	300	12	14
	0,98	0,86	26,64	73,36	150	300	12	14
	1,07	0,72	34,3	65,7	200	240	12	14

Исходя из этого, исходный массив случайным образом разделен на две части. На одной из них осуществлялось построение модели, на второй – проверка на адекватность.

*Построение регрессионных моделей.* Перед началом построения регрессивных моделей необходимо провести расчет парных коэффициентов корреляции  $r_{xy}$  между

независимыми переменными  $x_1, \dots, x_4$  и выходными параметрами  $y_1$  и  $y_2$  по формуле

$$r_{x_i y_j} = \frac{\sum (x_i - \bar{x}_i)(y_j - \bar{y}_j)}{\sigma_{x_i} \sigma_{y_j}}, \quad (1)$$

где  $\bar{x}_i$  и  $\bar{y}_j$  средние значения величин, для которых рассчитывается коэффициент;

$\sigma_{x_i}$  и  $\sigma_{y_j}$  – их среднеквадратические отклонения соответственно.

Таблица 2 / Table 2

Результаты расчёта парных коэффициентов / Calculation of the pair coefficients

Показатель/ Parameter	Частота вращения отсадочной камеры, мин <sup>-1</sup> , $x_1$ / Jig chamber rotational speed, min <sup>-1</sup> , $x_1$		Частота колебаний подвижного конуса, мин <sup>-1</sup> , $x_2$ / Movable cone pulsation frequency, min <sup>-1</sup> , $x_2$		Длина хода подвижного конуса, мм, $x_3$ / Movable cone stroke length, mm, $x_3$		Расход подрешётной воды, м <sup>3</sup> /ч, $x_4$ / Underscreen-water flow rate, m <sup>3</sup> /h, $x_4$	
	Содержание / Grade	Извлечение / Recovery	Содержание / Grade	Извлечение / Recovery	Содержание / Grade	Извлечение / Recovery	Содержание / Grade	Извлечение / Recovery
Концентрат ( $y_1$ )/ Concentrate ( $y_1$ )	0,69	0,63	0,24	0,71	-0,44	-0,6	-0,54	0,247
Хвосты ( $y_2$ )/ Tailings ( $y_2$ )	0,47	-0,63	0,13	-0,71	-0,2	0,6	-0,25	-0,247

Сумма извлечения в концентрат и хвосты равна 100 %. Соответственно, эти две величины взаимозависимы, что выражается в совпадении значений коэффициентов корреляции отличаясь при этом знаком.

Из табл. 2 видно, что парные коэффициенты корреляции подтверждают наличие зависимости между выходными и входными параметрами. В модели по содержанию при этом большинство коэффициентов менее 0,5, что может свидетельствовать о нелинейности зависимости между исследуемыми параметрами. В модели по извлечению прослеживается доминирование частоты колебаний подвижного конуса над остальными параметрами.

Конструирование регрессионной модели осуществлялось в виде упрощённого ря-

да Винера, общая формула которого может быть представлена в виде

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^4 b_i x_i + \sum_{i=1}^k \sum_{j=i}^l b_{ij} x_i x_j, \quad (2)$$

где  $k, l$  определяют порядок модели.

Ввиду ограниченного числа опытов, а также в связи с тем, что количество наблюдений незначительно превосходит число параметров, сложность модели была ограничена первым и вторым порядком для моделей по содержанию и извлечению соответственно.

Обработка результатов испытаний осуществлялась по представленному следующему алгоритму:

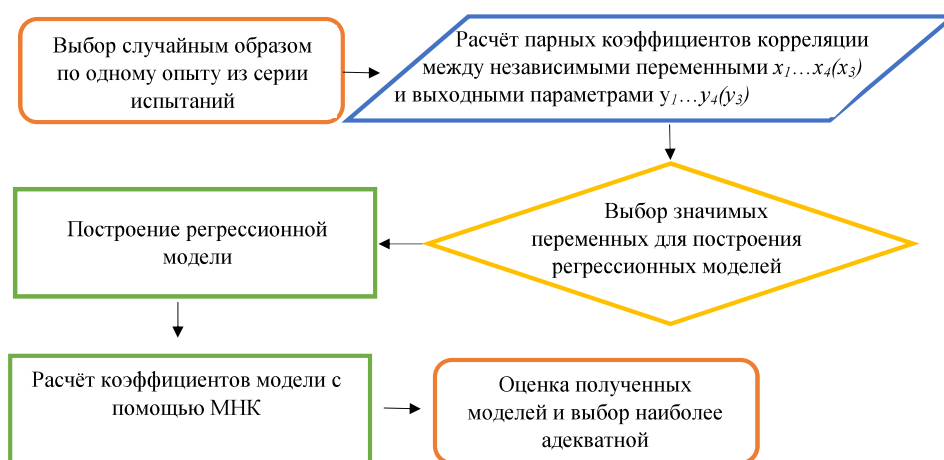


Схема алгоритма обработки результатов испытаний / Algorithm for processing of the study results

При проведении оценок конечные модели должны:

– как можно лучше описывать исходную выборку. Для этого применяется коэффициент детерминации  $R^2$  с учётом, что  $R^2 \in [0; 1]$ , для чего в критерий включена величина  $1/R^2$ ;

– быть близки к результатам испытаний, для чего необходимо рассчитать сумму квадратов отклонений прогнозных величин от истинных, для чего и было отобрано по одному опыту, которые не принимались во внимание при расчете коэффициентов уравнения регрессии.

Критерий для оценки получаемых регрессионных моделей ( $I$ ) определен по формуле

$$I = \frac{\alpha}{R^2} + \beta \cdot \sum (\hat{y} - y_{\text{в}})^2 \rightarrow \min, \quad (3)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  весовые коэффициенты;

$\alpha + \beta = 1$ ,  $\hat{y}$  – значение, рассчитанное на основании модели для данных из проверочной выборки;

$y_{\text{в}}$  – истинное значение параметра из проверочной выборки.

Коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  позволяют изменять модели как в сторону увеличения prognostic способности, так и в сторону увеличения адаптивности модели. Целесообразно принять  $\alpha$  и  $\beta$  равными 0,5.

Конечный результат алгоритма и получение уравнений регрессии с минимальным

значением критерия  $I = 0,92$  и  $I = 0,59$  для моделей по содержанию и извлечению соответственно, что соответствует уравнению регрессии для модели по содержанию:

$$y_1 = 1,18 + 12,49x_1 + 3x_2 - 17,8x_3 + 1,25x_4 - 2,68x_1x_2 - 1,64x_1x_3 - 8,72x_1x_4 + 15,53x_2x_3 - 3,0x_2x_4 + 6,75x_3x_4 - 1,66x_1^2 - 10,15x_2^2 - 0,51x_3^2 + 5,21x_4^2. \quad (4)$$

При этом  $R^2 = 0,99$ , что говорит о высоком качестве полученной модели.

Уравнение регрессии для модели по извлечению

$$y_1 = 0,74 + 1,38x_1 + 0,27x_2 + 1,14x_3 - 1,24x_1^2 + 1,94x_1x_2 - 0,27x_2^2 - 0,47x_1x_3 + 1,31x_2x_3 - 0,26x_3^2. \quad (5)$$

При этом  $R^2 = 0,92$ , что говорит о высоком качестве полученной модели.

Из итогового уравнения регрессии по извлечению видно, что процесс эффективности обогащения в ЦОМ не зависит от переменной  $x_4$  (расход подрешётной воды), что соответствует данным корреляционного анализа (коэффициент  $r_{x_4, y_1} = 0,274$ ).

Вероятности для коэффициентов регрессии уравнения, определенные при помощи расчета t-статистики, равны соответственно и могут быть представлены в табл. 3.

Таблица 3 / Table 3

Вероятности для коэффициентов регрессии / Probabilities for the regression coefficients

Коэффициент регрессии / Regression coefficient	Математическая модель по содержанию / Mathematical model of grade		Математическая модель по извлечению / Mathematical model of recovery	
	Значение коэффициента регрессии / Regression coefficient	Значение вероятности для коэффициента регрессии / Regression coefficient probability	Значение коэффициента регрессии / Regression coefficient	Значение коэффициента регрессии / Regression coefficient
$b_0$	1,18	$5,5 \cdot 10^{-7}$	0,74	0,05
$b_1$	12,49	$1,95 \cdot 10^{-6}$	1,38	0,02
$b_2$	3	0,00064	0,27	0,35
$b_3$	-17,8	$1,07 \cdot 10^{-7}$	1,14	0,04
$b_4$	1,25	0,002	-1,24	0,04
$b_5$	-2,68	0,1	1,94	0,05
$b_6$	-1,64	0,0003	0,27	0,39
$b_7$	-8,72	$1,09 \cdot 10^{-5}$	-0,47	0,6

Окончание табл. 3

$b_8$	15,53	$1,4 \cdot 10^{-5}$	1,31	0,22
$b_9$	-3	0,0004	-0,26	0,38
$b_{10}$	6,75	0,0005		
$b_{11}$	-1,66	0,12		
$b_{12}$	-10,15	$7,22 \cdot 10^{-5}$		
$b_{13}$	-0,51	0,021		
$b_{14}$	5,21	0,0013		

Как видно из табл. 3, значения большей части вероятностей меньше 0,05, что говорит о значимости полученных коэффициентов уравнения регрессии.

**Выводы.** Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

1) математическая модель по содержанию имеет 14 слагаемых, а математическая модель по извлечению – 9. Следовательно, математическая модель по извлечению с

меньшей ошибкой определяет технологические параметры обогащения (извлечения ценного компонента в концентрат) при изменении настраиваемых параметров обогащения в ЦОМ;

2) определены и ранжированы по степени влияния на процесс обогащения в ЦОМ регулируемые технологические параметры (табл. 4).

Таблица 4 / Table 4

*Ранжирование параметров по степени влияния на содержание и извлечение золота в продукты обогащения ЦОМ / Ranking of the process parameters according to their impact on gold grade and recovery into the CJM's separation products*

<b>Математическая модель по содержанию / Mathematical model of grade</b>	<b>Математическая модель по извлечению / Mathematical model of recovery</b>
1. Длина хода подвижного конуса, при этом данная зависимость носит обратно пропорциональный характер: чем больше длина хода подвижного конуса, тем меньше степень концентрации/Movable cone stroke length; the relationship is inversely proportional: the longer the moving cone stroke, the lower the concentration ratio	1. Частота вращения отсадочной камеры, при этом данная зависимость носит прямо пропорциональный характер/Jig chamber rotational speed; the relationship is directly proportional
2. Произведение частоты колебаний подвижного конуса и длины хода подвижного конуса, что говорит о взаимозависимости данных параметров/The product of movable cone pulsation frequency and stroke length which indicates that these parameters are interdependent	2. Произведение частоты колебаний подвижного конуса и частоты вращения отсадочной камеры/The product of movable cone pulsation frequency and jig chamber rotational speed
3. Частота вращения отсадочной камеры, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом/Jig chamber rotational speed which has a positive coefficient in the regression equation	3. Длина хода подвижного конуса, которая входит в уравнение регрессии с положительным коэффициентом/Movable cone stroke length which has a positive coefficient in the regression equation

В обеих математических моделях расход подрешётной воды не оказывает влияния на процесс обогащения в ЦОМ. Парные коэффициенты корреляции менее 0,5, что сви-

детельствует о нелинейности зависимостей между исследуемыми регулируемым технологическими параметрами.

## Список литературы

1. Агабян А. Ю. Технично-экономическое обоснование полноты извлечения металлов в концентрат // Вестник Национального политехнического университета Армении. Metallurgy, materials science, materials science, subsoil use. 2016. № 2. С. 97–108.
2. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ: в 2 кн. Кн. 1. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.
3. Королев И. А., Удовицкий В. И. Математическое моделирование процессов тяжелосреднего обогащения при оптимизации проектных решений углеобогащительных фабрик // Современные тенденции и инновации в науке и производстве: материалы III междунар. науч.-практ. конф. (02–04 апреля 2014 г.). Междуреченск: Кузбасский государственный технический университет, 2014. С. 38–39.
4. Лучко М. С., Федотов П. К. Определение технологических параметров, влияющих на интенсификацию обогащения золотосодержащих руд методом отсадки в центробежном поле // Инновационные процессы комплексной переработки природного и техногенного минерального сырья: материалы междунар. конф. «Плаксинские чтения – 2020» (21–26 сентября 2020 г.). Апатиты: ФИЦ КНЦ РАН, 2020. С. 250.
5. Пелих В. В., Салов В. М., Бурдонов А. Е., Лукьянов Н. Д. Установление технологических зависимостей работы концентратора КС-CVD6 с помощью методов группового учёта аргументов // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг госресурсов. 2020. Т. 331. № 2. С. 139–150.
6. Самылин Н. А., Починок В. В., Золотко А. А. Отсадка. М.: Недра, 1976. 320 с.
7. Стрижова В. В., Крымова Е. А. Методы выбора регрессионных моделей. М.: Вычислительный центр РАН, 2010. 60 с.
8. Чмыхалова С. В. Влияние снижения качества и изменчивости руды на ресурсноэкологические показатели горного производства (на примере АО «Апатит») // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2018. № 2. С. 73–80.
9. Шумилова Л. В., Костикова О. С. Анализ влияния вещественного состава руды серебро-полиметаллического месторождения «Гольцовое» на показатели обогащения // Вестник Забайкальского государственного университета. 2015. № 5. С. 46–55.
10. Chanturiya V. A. Innovation-based processes of integrated and high-level processing of natural and technogenic minerals in Russia // IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress. M., Russia, 2019. P. 2–12.
11. Gibson B., Wonyen D. G., Chehreh Chelgani S. A review of pretreatment of diasporic bauxite ores by flotation separation // Minerals Engineering. 2017. № 114. P. 64–73.

## References

1. Agabalyan A. Yu. *Vestnik Natsionalnogo politehnicheskogo universiteta Armenii. Metallurgiya, materialovedeniye, nedropolzovaniye* (Bulletin of the National Polytechnic University of Armenia. Metallurgy, materials science, subsoil use). 2016. No. 2. P. 97–108.
2. Dreyper N., Smit G. *Prikladnoy regressiionnyy analiz* (Applied regression analysis: in 2 books. Book 1). Moscow: Finance and statistics, 1986, 366 p.
3. Korolev I. A., Udovitskiy V. I. *Sovremennyye tendentsii i innovatsii v nauke i proizvodstve: materialy III mezhdunar. nauch.-prakt. konf. (02–04 aprelya 2014 g.)* (Modern trends and innovations in science and production: Materials of III Intern. scientific-practical. conf. (02–04 April 2014). Mezhdurechensk: Kuzbass State Technical University, 2014, pp. 38–39.
4. Luchko M. S., Fedotov P. K. *Innovatsionnyye protsessy kompleksnoy pererabotki prirodnogo i tehnogen-nogo mineralnogo syriya: materialy mezhdunar. konf. «Plaksinskiye chteniya – 2020»* (Innovative processes of complex processing of natural and technogenic mineral raw materials: materials of the international. conf. “Plaksin Readings - 2020” (September 21-26, 2020)). Apatity: FRC KSC RAS, 2020, p. 250.
5. Pelikh V. V., Salov V. M., Burdonov A. Ye., Lukiyonov N. D. *Izvestiya Tomskogo politehnicheskogo universiteta. Inzhiniring gosresursov* (Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Engineering of public resources), 2020, vol. 331, no. 2, pp. 139–150.
6. Samylin N. A., Pochinok V. V., Zolotko A. A. *Otsadka* (Jig). Moscow: Nedra, 1976, 320 p.
7. Strizhova V. V., Krymova Ye. A. *Metody vybora regressiionnyh modeley* (Methods for choosing regression models). Moscow: Computing Center of the Russian Academy of Sciences, 2010, 60 p.
8. Chmykhalova S. V. *Gornyye informatsionno-analiticheskiy byulleten* (Mining information and analytical bulletin), 2018. no. 2, pp. 73–80.
9. Shumilova L. V., Kostikova O. S. *Vestnik Zabaykalskogo gosudarstvennogo universiteta* (Bulletin of the Transbaikals State University), 2015, no. 5, pp. 46–55.



10. Chanturiya V. A. *IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress* (IMPC 2018. 29th International Mineral Processing Congress). Moscow, Russia, 2019, pp. 2–12.

11. Gibson B., Wonyen D. G., Chehreh Chelgani S. *Minerals Engineering* (Minerals Engineering), 2017, no. 114, pp. 64–73.

### Информация об авторе

---

*Лучко Максим Сергеевич*, ведущий инженер АО «Иргиредмет», г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: центробежное обогащение полезных ископаемых, моделирование процессов обогащения полезных ископаемых, автоматизация процессов обогащения полезных ископаемых  
maxuse@gmail.com

*Федотов Павел Константинович*, д-р техн. наук, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, машиностроение, дезинтеграция руд, горное дело.  
fedotovpavel@yandex.ru

*Лукиянов Никита Дмитриевич*, канд. техн. наук, доцент, Иркутский национальный исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия. Область научных интересов: математическая статистика, обработка данных, теория автоматического управления  
lukyanov.n@gmail.com

### Information about the author

---

*Maksim Luchko*, leading engineer, JSC «Irgiredmet», Irkutsk, Russia. Scientific interests: centrifugal separation of minerals, modelling of mineral processing systems, mineral processing automation.

*Pavel Fedotov*, doctor of technical sciences, professor, Mineral Processing department, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Scientific interests: mineral processing, mechanical engineering, ore scrubbing, mining.

*Lukyanov Nikita*, candidate of engineering sciences, associate professor, School of Information Technology and Data Science, Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia. Scientific interests: mathematical statistics, data processing, control theory.

### Для цитирования

---

*Лучко М. С., Федотов П. К., Лукиянов Н. Д. Построение и сравнение регрессионных моделей обогащения золотосодержащего сырья в центробежной отсадочной машине // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 1. С. 31–39. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-1-31-39.*

*Luchko M., Fedotov P., Lukyanov N. Development and comparison of the regression models of Gold-bearing material separation using a centrifugal jigging machine // Transbaikal State University Journal, 2022, vol. 28, no. 1, pp. 31–39. DOI: 10.21209/2227-9245-2022-28-1-31-39.*

Статья поступила в редакцию: 14.01.2022 г.

Статья принята к публикации: 21.01.2022 г.