

И.А. Матвеев, Н.Г. Еремеева

НАКЛОННЫЙ ШЛЮЗ ДЛЯ ОБОГАЩЕНИЯ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Аннотация. Представлены результаты экспериментальных исследований по обогащению на наклонном шлюзе с системой отсекающих пластин, который разработан в лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН. Для определения показателей обогатимости минеральных смесей в зависимости от технологических и конструктивных параметров производится расчет качественно-количественных показателей проведенного эксперимента. Создана матрица для полного факторного эксперимента с изменением трех факторов (угол наклона шлюза, расход воды, скорость подачи исходной пробы). Выведено уравнение регрессии выхода и извлечения концентрата. Проведены экспериментальные исследования по обогащению на лабораторной модели наклонного шлюза с изменением угла наклона шлюза, скорости подачи воды и исходного материала. Используя уравнения регрессии определены оптимальные параметры работы шлюза, которые достигаются со значениями факторов (1,-1,-1), при которых извлечение концентрата составило 88,54%, а выход 61%.

Ключевые слова: шлюз, обогащение, пульпа, угол наклона, пластина, концентрат, магнетит, фактор эксперимента.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-172-178

Истощение минерально-сырьевой базы россыпного золота и вовлечение в эксплуатацию техногенных объектов привело к увеличению объемов переработки песков, в которых значительная часть золота сосредоточена в труднообогатимых классах крупности (менее 0,25 мм). Применение традиционного оборудования сопровождается со значительными потерями золота. Таким образом, одной из актуальных задач в области обогащения полезных ископаемых является разработка эффективных способов извлечения мелкого золота, связанных с совершенствованием технологий и модернизацией оборудования.

Гравитационное обогащение остается одним из наиболее важных способов разделения минералов, этот метод обогащения является экологически чистым и во многих случаях наименее затратным из всех существующих. Принципы

гравитационного разделения широко используют не только при непосредственном обогащении различных руд и материалов, но и в рудоподготовительных переделах при классификации и обезвоживании продуктов.

Исследованиями, направленными на повышение эффективности извлечения золота с применением различного гравитационного оборудования занимаются, как в России, так и за рубежом [1–5].

Простая конструкция шлюза, высокая степень концентрации, отсутствие необходимости других источников энергии, кроме транспортирующего водного потока, минимальные капитальные вложения и эксплуатационные расходы по сегодняшний день остаются востребованными. Модернизацией, созданием и использованием новых видов шлюзов занимаются множество исследователей [6–11].

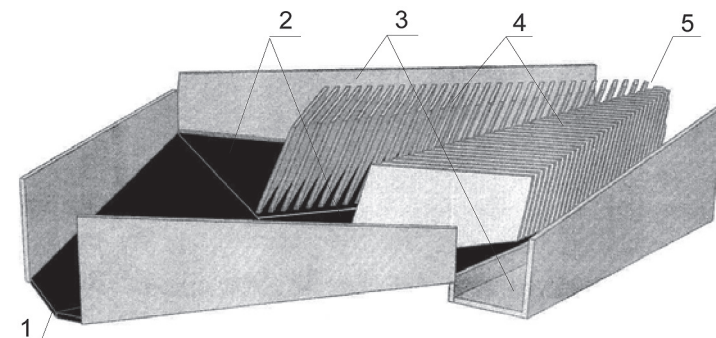
На основании вышеизложенного в лаборатории обогащения полезных ископаемых ИГДС СО РАН предложен наклонный шлюз с системой отсекающих пластин. Для определения оптимальных параметров работы шлюза необходимо подобрать: скорость подачи воды для смыва исходного материала; скорость подачи исходного материала; угол наклона шлюза.

Исследования по обогащению искусственных смесей на наклонном шлюзе проводятся на лабораторной модели с изменением угла наклона шлюза, скорости подачи воды и исходного материала. В качестве испытуемого материала использовался речной песок, в качестве имитатора — магнетит крупностью $-0,25$ мм. После проведения эксперимента каждый продукт высушивался, взвешивался, а потом с помощью магнита вытягивался магнетит. Магнетит взвешивался и составлялся баланс по продуктам.

Шлюз состоит из V-образного сужающегося в нижней части наклоненного в продольном направлении лотка, в верхней части шлюза находится загрузочный узел 1, днище шлюза 2 выполнено из двух пластин с рифлями, расположенными под углом друг к другу, с боковыми бортами 3 для удаления легких частиц увлекаемых потоком и переливающихся в хвосты, шлюз имеет отсекающие

пластины 4, расположенные параллельно друг к другу по центру лотка, которые служат для сбора концентрата и перемещения его в накопитель концентрата 5, зазоры между пластинами по всей длине соответствуют общему сечению загрузочного узла (рисунок) [12].

Наклонный шлюз работает следующим образом: исходная пульпа, содержащая пески с ценными тяжелыми минералами поступает из пульпопровода в загрузочный узел, в котором происходит распределение пульпы по всей ширине шлюза, материал непрерывно подается с водой в верхнюю часть лотка шлюза. При этом расположение отсекающих пластин предусматривает последовательное отведение части пульпы по мере перемещения исходной пульпы вдоль оси шлюза к загрузочному узлу. Часть пульпы, попадая в пространство между отсекающими пластинами подвергается разделению по плотности, на поверхности легкая фракция увлекается потоком воды. Легкая фракция (хвосты) под действием потока воды переливом удаляется через боковые борты. Тяжелая фракция оседает за счет отсекающих пластин ко дну лотка и в последующем перечищается на рифлях под действием нисходящих потоков по ходу перемещения материала по днищу шлюза. При этом, за счет турбулентных потоков часть легких материалов взвешивается, подхватывается потоками пуль-



Общий вид наклонного шлюза
General view of inclined sluice

Таблица 1

Вариант расчета качественно-количественных показателей проведенного опыта
Alternate calculation of qualitative and quantitative indicators of implemented experiment

Продукты обогащения	Общий вес, г	Магнетит, г	Песок, г	Выход, %	Содержание, %	Извлечение, %
Концентрат 1	A_1	B_2	$C_2=A_1-B_2$	$D_1=(A_1 \times 100)/A_6$	E_2	$F_1=(B_2 \times 100)/B_1$
Концентрат 2	A_2	B_3	$C_3=A_2-B_3$	$D_2=(A_2 \times 100)/A_6$	E_3	$F_2=(B_3 \times 100)/B_1$
Концентрат 3	A_3	B_4	$C_4=A_3-B_4$	$D_3=(A_3 \times 100)/A_6$	E_4	$F_3=(B_4 \times 100)/B_1$
Всего концентрата	$A_4=\Sigma A_1 A_2 A_3$	$B_5=\Sigma B_2 B_3 B_4$	$C_5=\Sigma C_2 C_3 C_4$	$D_4=\Sigma D_1 D_2 D_3$	E_5	$F_4=\Sigma F_1 F_2 F_3$
Хвосты	$A_5=A_6-A_4$	$B_6=B_1-B_5$	$C_6=C_1-C_5$	$D_5=(A_5 \times 100)/A_6$	E_6	$F_5=(B_6 \times 100)/B_1$
Итого исходная проба	$A_6=B_1+C_1$	B_1	C_1	100,00	E_1	100,00

пы и перемещается в направлении разгрузки хвостов. Таким образом, происходит постоянная перечистка и расслаивание исходных материалов, что, в конце концов, приводит к увеличению эффективности разделения материала. Концентрат перемещается в разгрузочный узел, а хвосты удаляются через боковые борты [12].

На основании фиксируемых показателей работы шлюза производится расчет качественно-количественных показателей проведенного опыта, сделанный в программе MicrosoftExcel (табл. 1) [13].

В расчете в первую очередь задается масса исходного песка и магнетита (B_1, C_1), также задаются массы полученных концентратов (A_1, A_2, A_3) и выделенного из него магнетита (B_2, B_3, B_4). На основе введенных данных рассчитываются массы песков C_2-C_5 , выход D_1-D_5 и извлечение F_1-F_5 продуктов обогащения.

Исходное содержание магнетита E_1 рассчитывается по формуле (1), а содержание магнетита по продуктам обогащения рассчитывается по формуле (2).

$$E_1 = \frac{B_1 \times 100}{A_6} \quad (1)$$

Таблица 2

Полный факторный эксперимент для трех факторов
Complete three-factor experiment

Номер опыта	Факторы в натурном масштабе			Факторы в безразмерной системе координат			Выходной параметр
	Z_1	Z_2	Z_3	X_1	X_2	X_3	
1	Z_1^{\min}	Z_2^{\min}	Z_3^{\min}	-1	-1	-1	Y_1
2	Z_1^{\max}	Z_2^{\min}	Z_3^{\min}	+1	-1	-1	Y_2
3	Z_1^{\min}	Z_2^{\max}	Z_3^{\min}	-1	+1	-1	Y_3
4	Z_1^{\max}	Z_2^{\max}	Z_3^{\min}	+1	+1	-1	Y_4
5	Z_1^{\min}	Z_2^{\min}	Z_3^{\max}	-1	-1	+1	Y_5
6	Z_1^{\max}	Z_2^{\min}	Z_3^{\max}	+1	-1	+1	Y_6
7	Z_1^{\min}	Z_2^{\max}	Z_3^{\max}	-1	+1	+1	Y_7
8	Z_1^{\max}	Z_2^{\max}	Z_3^{\max}	+1	+1	+1	Y_8

$$E_{2...6} = \frac{F_n \times E_1}{D_n} \quad (2)$$

где F_n — извлечение продукта обогащения; E_1 — исходное содержание; D_n — выход продукта обогащения.

На основании полученных результатов по извлечению имитатора составляется заключение об обогатительной способности шлюза.

Создается матрица для полного факторного эксперимента (табл. 2) для изменения трех факторов (угол наклона шлюза, расход воды, скорость подачи исходной пробы). В этом случае число возможных комбинаций из трех факторов на двух уровнях равно $N = n^2 = 2^3 = 8$ [14].

Таким образом, по отдельности находим уравнение регрессии для двух выходных параметров: выход концентрата и извлечение ценного компонента.

Для поиска оптимального режима работы наклонного шлюза были проведены эксперименты согласно плана-матрицы экспериментов с изменением трех параметров: угол наклона шлюза z_1 ($z_1^{\min} = 2,5^\circ$, $z_1^{\max} = 5^\circ$), расход воды z_2 ($z_2^{\min} = 2,83$ л/с, $z_2^{\max} = 3,82$ л/с), скорость подачи материала z_3 ($z_3^{\min} = 5,75$ г/с,

$z_3^{\max} = 11,11$ г/с). Результаты экспериментов занесены в табл. 3.

Модель изучаемого процесса представим в виде обобщенного уравнения:

$$E = b_0 + \sum(b_i X_i) + \sum(b_{ij} X_i X_j) + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (3)$$

$$B = b_0 + \sum(b_i X_i) + \sum(b_{ij} X_i X_j) + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (4)$$

где E — извлечение концентрата, B — выход концентрата.

Применительно к трехфакторному эксперименту уравнение (3), (4) можно записать в виде:

$$y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + b_{12} X_1 X_2 + b_{13} X_1 X_3 + b_{23} X_2 X_3 + b_{123} X_1 X_2 X_3 \quad (5)$$

где X_1, X_2, X_3 — кодированные значения уровней факторов. Кодированные значения уровней факторов в уравнении (4) могут принимать значения +1 и -1.

Коэффициенты уравнения регрессии (4) рассчитываются по зависимости:

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N X_{i,u} \cdot \bar{y}_u}{N} \quad (6)$$

где u — номер опыта; $X_{i,u}$ — кодированные значения уровней варьируемых факторов / независимых переменных

Таблица 3

Результаты экспериментов, согласно плана-матрицы экспериментов
Results of experimentation in accord with the matrix

Номер опыта	Факторы в натуральном масштабе			Факторы в безмерной системе координат				Выходной параметр	
	z_1	z_2	z_3	X_0	X_1	X_2	X_3	$\varepsilon, \%$	$\gamma, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	2,5	3,82	5,75	1	-1	-1	-1	54,09	45,00
2	5	3,82	5,75	1	1	-1	-1	88,54	61,00
3	2,5	2,83	5,75	1	-1	1	-1	49,09	55,00
4	5	2,83	5,75	1	1	1	-1	61,82	55,45
5	2,5	3,82	11,11	1	-1	-1	1	49,27	49,00
6	5	3,82	11,11	1	1	-1	1	79,82	60,00
7	2,5	2,83	11,11	1	-1	1	1	56,36	55,00
8	5	2,83	11,11	1	1	1	1	59,82	46,00

Таблица 4

Расширенная матрица плана 2^3 **Expanded matrix of plane 2^3**

Номер опыта	X_0	X_1	X_2	X_3	$X_4 = X_1X_2$	$X_5 = X_1X_3$	$X_6 = X_2X_3$	$X_7 = X_1X_2X_3$	ε	γ
1	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	54,09	45,00
2	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	88,54	61,00
3	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	49,09	55,00
4	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	61,82	55,45
5	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	49,27	49,00
6	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	79,82	60,00
7	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	56,36	55,00
8	1	1	1	1	1	1	1	1	59,82	46,00

X_1, X_2, X_3 (табл. 3); \bar{y}_u — средние арифметические значения функции отклика.

Для расчета коэффициентов регрессии составим расширенную матрицу планирования (табл. 4).

Рассчитаем коэффициенты в уравнении регрессии (5) по зависимостям с учетом знаков X_i в столбцах табл. 4:

$$b_0 = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 + \varepsilon_4 + \varepsilon_5 + \varepsilon_6 + \varepsilon_7 + \varepsilon_8)/8 = (54,09 + 88,54 + 49,09 + 61,82 + 49,27 + 79,82 + 56,36 + 59,82)/8 = 62,35$$

$$b_1 = 10,15; b_2 = -5,58; b_3 = -1,03;$$

$$b_{12} = -6,10; b_{13} = -1,64; b_{23} = 2,35;$$

$$b_{123} = -0,67$$

Таким же образом рассчитываем коэффициенты в уравнении регрессии для выхода концентрата.

$$c_0 = (\gamma_1 + \gamma_2 + \gamma_3 + \gamma_4 + \gamma_5 + \gamma_6 + \gamma_7 + \gamma_8)/8 = (45 + 61 + 55 + 55,45 + 49 + 60 + 55 + 46)/8 = 53,306$$

$$c_1 = 2,306; c_2 = -0,444; c_3 = -0,806;$$

$$c_{12} = -4,44; c_{13} = -1,806;$$

$$c_{23} = -1,556; c_{123} = -0,556$$

Таким образом, получены следующие уравнения регрессии извлечения и выхода:

$$\varepsilon = 62,35 + 10,15X_1 - 5,58X_2 - 1,03X_3 - 6,10X_4 - 1,64X_5 + 2,35X_6 - 0,67X_7$$

$$\gamma = 50,306 + 2,306X_1 - 0,444X_2 - 0,806X_3 - 4,44X_4 - 1,806X_5 - 1,556X_6 - 0,556X_7$$

Используя уравнения регрессии находим оптимальные параметры работы шлюза в области экспериментирования при условии: $-1 \leq x_i \leq 1$.


Оптимальные параметры работы шлюза достигаются при значении факторов (1, -1, -1), при которых извлечение равно 88,54%, при выходе — 61%.

Режим в натуральных единицах: $z_1 = 5^\circ$; $z_2 = 3,82$ л/с; $z_3 = 5,75$ г/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алгебраистова Н. К., Бурдакова Е. А., Макшанин А. В., Маркова А. С. Современные гравитационные аппараты для обогащения золото- и серебросодержащих руд / Инновационные процессы комплексной и глубокой переработки минерального сырья (Плаксинские чтения–2013): материалы Международного совещания, 16–19 сентября 2013 г. — Томск: Изд-во ТПУ, 2013. — С. 143–146.

2. Александрова Т. Н., Корчевенков С. А. Исследование влияния морфологических характеристик частиц благородных металлов на эффективность разделения в гравитационных аппаратах // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2014. — S 4-6. — С. 12–19.

3. Mills C. Process Design, Scale-Up and Plant Design for Gravity Concentration // Mineral Processing Plant Design. AIMME, NewYork. 1998. pp. 12–15.
4. Holland-Batt A. B. The Dynamics of Sluice and Spiral Separations // J. Minerals Engineering. 1995. no 8 (1). pp. 3–21.
5. Holland-Batt A. B. Gravity Separation: A Revitalized Technology // J. Mining Engineering. 1998. no 50 (9). pp. 43–48.
6. Замятин О. В. Обогащение золотосодержащих песков на шлюзах. Основные закономерности и технологические возможности процесса / Анализ, добыча и переработка полезных ископаемых. Сборник научных трудов, посвященный 125-летию Иргиредмет. — Иркутск, 1998. — С. 208–121.
7. Ряховский С. М., Кротков Н. Ф. и др. Разработка технологии гравитационного обогащения тонкозернистых цирконий содержащих песков Буткинского месторождения с использованием макетных и промышленных образцов винтовых сепараторов, концентрационных столов, шлюзовых и центробежных концентраторов / Материалы IV конгресса обогатителей стран СНГ. — М., 2003. — С. 8–10.
8. Мязин В. П. Новые технологические решения по учащенному сполоску концентрата со шлюзов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2003. — № 1. — С. 238–240.
9. Замятин О. В., Кавчик Б. К. Шлюз с непрерывной разгрузкой концентрата (ШНРК) // Золотодобыча. — 2005. — № 83. — С. 6–8.
10. Литвинцев В. С., Пуляевский А. М., Сас П. П. Исследование параметров гидротока на шлюзах гидроэлеваторного промывочного прибора // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. — 2012. — № 6. — С. 134–139.
11. Серый Р. С. Снижение потерь золота на шлюзовых промывочных приборах при обработке труднообогатимых россыпей // Маркшейдерия и недропользование. — 2014. — № 5. — С. 55–60.
12. Матвеев И. А., Матвеев А. И., Еремеева Н. Г. Патент РФ № 2013100343/03, 27.06.2014. Наклонный шлюз. 2013. Бюл. № 18.
13. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — 280 с.
14. Мантгомери Д. К. Планирование эксперимента и анализ данных: пер. с англ. — Л.: Судостроение, 1980. — 384 с. 

КОРОТКО ОБ АВТОРАХ

Матвеев Игорь Андреевич¹ — младший научный сотрудник,
e-mail: igor.andr.matveev@gmail.com,
Еремеева Наталья Георгиевна¹ — научный сотрудник,
e-mail: danng1@mail.ru,
¹ Институт горного дела Севера им. Н.В. Черского
Сибирского отделения РАН.

ISSN 0236-1493. Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'. 2018. No. 9, pp. 172–178.

Inclined sluice for mineral dressing

Matveev I.A.¹, Junior Researcher,
e-mail: igor.andr.matveev@gmail.com,
Eremeeva N.G.¹, Researcher, e-mail: danng1@mail.ru,
¹ Chersky Mining Institute of the North, Siberian Branch,
Russian Academy of Sciences, 677018, Yakutsk, Russia.

Abstract. The article describes the results of experimental research into mineral concentration on an inclined sluice with cutting-off plates designed at the Mineral Dressing Laboratory of the Institute of Mining of the North, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences. In order to determine mineral washability subject to the dressing process and sluice design parameters, the qualitative and quantitative indicators of the experiment are calculated. The complete experiment matrix with variation of three factors is created

(sluice angle, water flow rate, sample feed velocity). The regression equation of yield and recovery of a concentrate is derived. The experimental investigation of concentration is carried out on the laboratory model of the inclined sluice at the varied sluice angles, water flow rates and sample feed velocities. Using the regression equation, the optimal sluice performance at the concentrate recovery of 88.64 % and yield of 61 % is determined.

Key words: Sluice, mineral dressing, pulp, sluice angle, plate, concentrate, magnetite, experimental factor.

DOI: 10.25018/0236-1493-2018-9-0-172-178

REFERENCES

1. Algebraistova N.K., Burdakova E.A., Makshinin A.V., Markova A.S. Sovremennyye gravitatsionnyye apparaty dlya obogashcheniya zoloto- i serebrosoderzhashchikh rud [Modern equipment for gravity concentration of gold- and silver-bearing ore]. *Innovatsionnyye protsessy kompleksnoy i glubokoy pererabotki mineral'nogo syr'ya (Plakinskie chteniya–2013): materialy Mezhdunarodnogo soveshchaniya*, 16–19 September 2013, Tomsk, Izd-vo TPU, 2013, pp. 143–146. [In Russ].
2. Aleksandrova T.N., Korchevenkov S.A. *Issledovanie vliyaniya morfologicheskikh harakteristik chastic blagorodnykh metallov na ehffektivnost' razdeleniya v gravitacionnykh apparatah* [Analysis of influence exerted by morphological characteristics of noble metal particles on gravity separation efficiency]. *Gornyy informacionno-analiticheskyy byulleten'*. 2014. S 4-6, pp. 12–19. [In Russ].
3. Mills C. Process Design, Scale-Up and Plant Design for Gravity Concentration. *Mineral Processing Plant Design*. AIMME, NewYork. 1998. pp. 12–15.
4. Holland-Batt A.B. The Dynamics of Sluice and Spiral Separations. *J. Minerals Engineering*. 1995. no 8 (1). pp. 3–21.
5. Holland-Batt A.B. Gravity Separation: A Revitalized Technology. *J. Mining Engineering*. 1998. no 50 (9). pp. 43–48.
6. Zamyatin O.V. Obogashchenie zolotosoderzhashchih peskov na shlyuzakh. Osnovnyye zakonomernosti i tekhnologicheskies vozmozhnosti processa [Concentration of gold using sluices. Basic regularities and technological capabilities]. *Analiz, dobycha i pererabotka poleznykh iskopaemykh. Sbornik nauchnykh trudov, posvyashchenny 125-letiyu Irgiredmet. Irkutsk, 1998*, pp. 208–121. [In Russ].
7. Ryahovskiy S.M., Krotkov N.F. Razrabotka tekhnologii gravitacionnogo obogashcheniya tonkozernistykh cirkoniy soderzhashchih peskov Butkinskogo mestorozhdeniya s ispol'zovaniem maketnykh i promyshlennykh obrazcov vintovykh separatorov, koncentracionnykh stolov, shlyuzovykh i centrobeznykh koncentratorov [Technological development of gravity concentration of fine-grained zirconium-bearing sand from the Butkin deposit using prototypes and industrial models of spiral separators, concentration tables, sluices and centrifugal concentrators]. *Materialy IV kongressa obogatitelej stran SNG, Moscow, 2003*, pp. 8–10. [In Russ].
8. Myazin V.P. Novye tekhnologicheskies resheniya po uchashchennomu sposobu koncentrata so shlyuzov [New technological solutions on quickened washing-off of concentrates downward sluices]. *Gornyy informacionno-analiticheskij byulleten'*. 2003, no 1, pp. 238–240. [In Russ].
9. Zamyatin O.V., Kavchik B.K. SHlyuz s nepreryvnoy razgruzkoy kontsentrata (SHNRK) [Continuous concentrate discharge sluice]. *Zolotodobycha*. 2005, no 83, pp. 6–8. [In Russ].
10. Litvintsev V.S., Pulyaevskiy A.M., Sas P.P. Issledovanie parametrov gidropotoka na shlyuzakh gidroelevatornogo promyochnogo pribora [Analysis of hydraulic flow parameters in sluices of hydroelevator washing machine]. *Fiziko-tekhnicheskies problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh*. 2012, no 6, pp. 134–139. [In Russ].
11. Seryy R.S. Snizhenie poter' zolota na shlyuzovykh promyochnykh priborakh pri otrabotke trudnoobogatimyykh rosspey [Gold loss reduction on sluice washing machines at complex placers]. *Marksheyderiya i nedropol'zovanie*. 2014, no 5, pp. 55–60. [In Russ].
12. Matveev I.A., Matveev A.I., Ereemeeva N.G. *Patent RU 2013100343/03, 27.06.2014*.
13. Adler Yu.P., Markova E.V., Granovskiy Yu.V. *Planirovanie eksperimenta pri poiske optimal'nykh usloviy* [Experiment planning with optimizing], Moscow, Nauka, 1976, 280 p.
14. Mantgomeri D.K. *Planirovanie eksperimenta i analiz dannykh: per. s angl.* [Experiment planning and data analysis: English–Russian translation], Leningrad, Sudostroenie, 1980, 384 p.

