

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1>**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ЧЕРПАКОВОЙ ЦЕПИ В ПРИЗАБОЙНОЙ ЗОНЕ ПРИ ДРАЖНОЙ РАЗРАБОТКЕ РОССЫПНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ**

Научная статья

**Кисляков В.Е.<sup>1</sup>, Zubov П.А.<sup>2,\*</sup>, Цимбалюк Н.А.<sup>3</sup>**<sup>2</sup> ORCID : 0009-0005-8125-5535;<sup>1,2,3</sup> Сибирский Федеральный Университет, Красноярск, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (zubovpavela[at]gmail.com)

**Аннотация**

Рассмотрена применимость дражного способа разработки в Российской Федерации в настоящее время. Поставлена проблема, сопутствующая дражному способу разработки россыпных месторождений золота – разубоживание песков в забое драги мелкодисперсными грунтовыми частицами эфельного отвала. Целью представленной работы является моделирование процесса зачерпывания частиц хвостов эфельных отвалов черпаками драги. Дана методика и получена математическая модель определения пространственного положения внутреннего и внешнего контуров холостого хода черпаковой цепи. Полученные результаты позволяют построить более полную картину процесса драгирования, также может использоваться при определении объемов разубоживания хвостами эфельных отвалов.

**Ключевые слова:** дражная разработка, разубоживание, моделирование процессов.**MODELLING THE TRAJECTORY OF A SCOOP CHAIN IN THE BOTTOM-HOLE AREA DURING DREDGE WORK OF ALLUVIAL DEPOSITS**

Research article

**Kislyakov V.Y.<sup>1</sup>, Zubov P.A.<sup>2,\*</sup>, Tsimbalyuk N.A.<sup>3</sup>**<sup>2</sup> ORCID : 0009-0005-8125-5535;<sup>1,2,3</sup> Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

\* Corresponding author (zubovpavela[at]gmail.com)

**Abstract**

The applicability of the dredge method of development in the Russian Federation at present is reviewed. The problem accompanying the dredge method of development of alluvial gold deposits is posed – dilution of sands in the mining face of the dredge by finely dispersed soil particles of the ephemeral dump. The objective of the presented work is modelling of the process of scooping of particles of tailings of ephelial dumps by dredge bailers. A methodology is presented and a mathematical model for determining the spatial position of the inner and outer contours of the idle stroke of the scoop chain is obtained. The received results allow to build a more complete picture of the dredging process, can also be used in determining the volume of dilution by tailings of ephemeral dumps.

**Keywords:** dredging, dilution, process modelling.**Введение**

Дражный метод – один из основных способов разработки россыпных месторождений. 27,9% (82,84 т.) добытого в России золота в 2021 году получено многочерпаковыми драгами [1]. На протяжении последних лет данному способу характерно усложнение горно-геологических и горнотехнических условий, растет техногенный ресурс [2], [3], [4]. Современные технологии идут по курсу отработки техногенных месторождений, снижения потерь и разубоживания полезного ископаемого [5], [6], [7], [8], [9].

Для наиболее полного извлечения запасов из месторождений, а также для оптимизации дражных работ необходимо иметь наиболее полную картину процессов, происходящих при разработке россыпных месторождений [10], [11], [12]. В настоящее время растет необходимость определения разубоживания песков в забое драги мелкодисперсными грунтовыми частицами эфельного отвала, так как увеличивается количество месторождений с большой глубиной черпания, а также имеющих большие объемы песков мелкой фракции. По этой причине хвосты эфельных отвалов достигают призабойной зоны драги [13]. Так, например, практически не изучено влияние контура черпаковой цепи на границы эфельного отвала непосредственно в забое драги.

Целью исследования является разработка модели для определения координат контура черпаковой цепи, составляющих основу формирования контура поверхности эфельных отвалов в призабойной зоне с целью определения величины разубоживания хвостами эфельных отвалов драги.

Для достижения поставленной цели были поставлены следующие задачи: построение физической модели черпаковой цепи; получение математических уравнений, описывающих координаты черпаковой цепи, при этом учитывающих такие переменные как: угол наклона черпаковой рамы и длину черпаковой цепи.

В ходе исследования была рассмотрена проблема, сопутствующая дражному способу – разубоживание песков эфельными частицами в призабойной части дражного разреза. Данная проблема возникает по причине того, что хвосты эфельных отвалов достигают призабойной части дражного разреза, что влечет за собой зачерпывание фракций, слагающих эфельный отвал, впоследствии ухудшая процесс обогащения, а также приводит к падению производительности драги [14].

### Основные результаты

При исследовании величины разубоживания песков хвостами эфельных отвалов в зоне забоя драги наибольшую важность представляет та часть цепи, которая с большой вероятностью принимает участи в процессе выемки грунтовых частиц эфельного отвала. Данная работа направлена на определение пространственного положения контура холостого хода черпаковой цепи. Черпаковая цепь представляет собой шарнирно-соединенные между собой черпаки. Соединение между черпаками осуществляется пальцами. Для определения контура сконструирован макет черпаковой рамы с черпаковыми барабанами в соответствии с линейными размерами известных драг. За прототип была принята модель наиболее распространенной драги 250Д. Модель выполнена в масштабе 1:50. Вращение черпаковой цепи вокруг верхнего черпакового барабана (с координатами [0,0]) позволил получить графически контур холостой части цепи при любом угле наклона.

Контур черпаковой цепи получены с различными переменными, такими как угол наклона черпаковой цепи (от 15 до 45 град.), длина цепи (от 81 до 85 черпаков). Полученные координаты контура цепи, ограниченные продольной осью верхнего и нижнего черпакового барабана, точки АЗ и А1 соответственно. Положение черпаковой цепи представлено на рисунке 1. Координаты точек А1 и АЗ описываются следующими уравнениями:

$$x_{A1} = -(A + r_{нчб}) \cdot \cos\alpha \quad (1)$$

$$y_{A1} = -(A + r_{нчб}) \cdot \sin\alpha \quad (2)$$

$$x_{A3} = r_{вчб} \cdot \cos\alpha \quad (3)$$

$$y_{A3} = r_{вчб} \cdot \sin\alpha \quad (4)$$

где  $r_{нчб}$  и  $r_{вчб}$  – радиус нижнего черпакового барабана и верхнего черпакового барабана, соответственно, м;  $A$  – длина черпаковой рамы, м;  $\alpha$  – угол наклона черпаковой рамы, град.

Координаты контура черпаковой цепи описываются следующим уравнением:

$$y = A \cdot x^2 + B \cdot x - C \quad (5)$$

где  $A, B$  и  $C$  – эмпирические коэффициенты, которые зависят от длины черпаковой цепи и угла наклона черпаковой рамы, доли. ед.;  $x$  – значения по оси абсцисс, м.

Эмпирические коэффициенты  $A, B$  и  $C$  представлены в таблицах 1–3.

Таблица 1 - Эмпирический коэффициент А для внутреннего контура черпаковой цепи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.1>

Количество черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
81	0,014	0,015	0,017	0,19	0,023	0,027	0,034
82	0,019	0,021	0,023	0,026	0,031	0,037	0,046
83	0,024	0,026	0,028	0,032	0,037	0,045	0,055
84	0,028	0,03	0,033	0,037	0,043	0,051	0,063
85	0,031	0,033	0,037	0,041	0,048	0,057	0,069

Таблица 2 - Эмпирический коэффициент В для внутреннего контура черпаковой цепи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.2>

Количество черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
81	0,694	0,814	0,947	1,104	1,286	1,502	1,765
82	0,862	0,989	1,133	1,302	1,5	1,741	2,033
83	0,995	1,127	1,279	1,458	1,668	1,924	2,237
84	1,11	1,247	1,405	1,589	1,811	2,076	2,405

85	1,215	1,355	1,518	1,71	1,938	2,214	2,554
----	-------	-------	-------	------	-------	-------	-------

Таблица 3 - Эмпирический коэффициент С для внутреннего контура черпаковой цепи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.3>

Количество черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
81	0,27	0,278	0,286	0,299	0,315	0,333	0,355
82	0,019	0,021	0,023	0,026	0,031	0,037	0,046
83	0,024	0,026	0,028	0,032	0,037	0,045	0,055
84	0,028	0,03	0,033	0,037	0,043	0,051	0,063
85	0,031	0,033	0,037	0,041	0,048	0,057	0,069

Для всех условий, представленных в таблицах 1–3 и используя уравнение (5) определяем координаты экстремума дуги контура цепи ( $A_2$ ). Координаты точки  $A_2$  представлены в таблице 4.

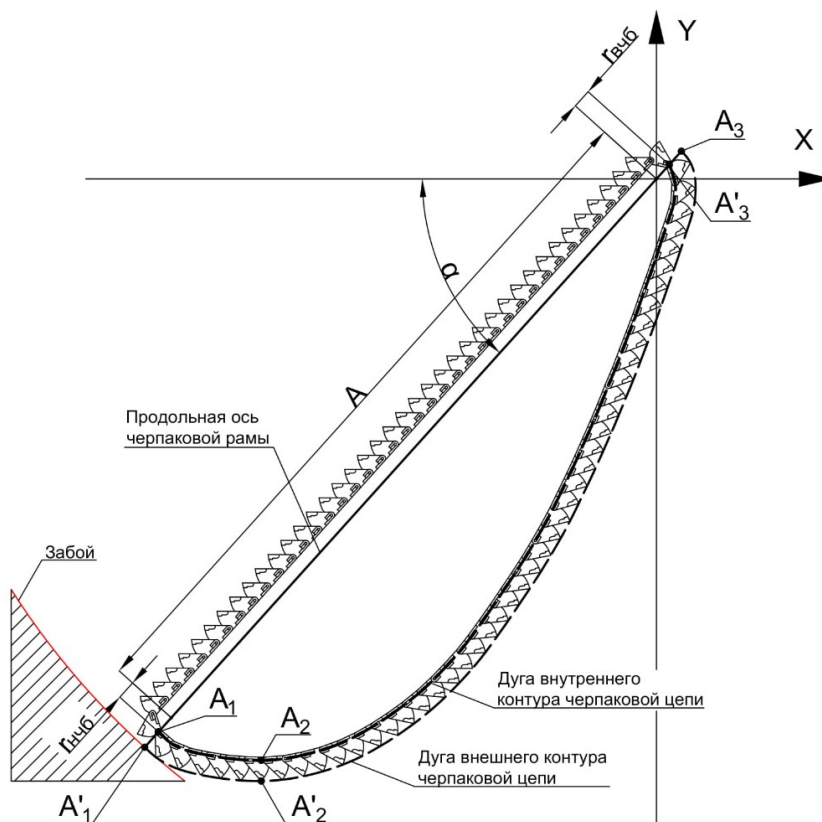


Рисунок 1 - Положение черпаковой цепи в дражном забое  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.4>

Таблица 4 - Координаты экстремума внутреннего контура  
 DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.5>

Количество черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
Координата по X, м	-19,207	-19,906	-20,203	-20,252	-19,833	-19,033	-17,971
81	-8,47	-10,495	-12,588	-14,79	-16,948	-19,03	-21,05
82	-9,774	-11,757	-13,815	-15,952	-18,063	-20,137	-22,132
83	-10,81	-12,752	-14,778	-16,87	-18,942	-20,978	-22,951
84	-11,71	-13,619	-15,608	-17,641	-19,688	-21,682	-23,63
85	-12,525	-14,401	-16,352	-18,355	-20,349	-22,32	-24,229

Вышеприведенная методика позволяет определить координаты точек внутреннего контура черпаковой цепи. Для определения координат внешнего контура, используя метод интерполяции, определим координаты точек внешнего

контура. Высота черпака составляет 1057 мм, таким образом, используя уравнения 1–4, с тем учетом, что к радиусам верхнего и нижнего черпаковых барабанов необходимо прибавить высоту черпака, можно получить уравнение координат внешнего контура цепи.

Далее необходимо определить эмпирические коэффициенты для полученных уравнений координат внешнего контура и точки экстремума. Коэффициенты и координаты представлены в таблицах 5–8.

Таблица 5 - Эмпирический коэффициент А для внешнего контура черпаковой цепи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.6>

Количество во черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
81	0,016	0,017	0,019	0,022	0,026	0,031	0,038
82	0,021	0,023	0,025	0,028	0,033	0,039	0,048
83	0,025	0,027	0,029	0,033	0,038	0,046	0,056
84	0,028	0,03	0,033	0,037	0,043	0,051	0,062
85	0,031	0,033	0,037	0,041	0,047	0,056	0,067

Таблица 6 - Эмпирический коэффициент В для внешнего контура черпаковой цепи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.7>

Количество во черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
81	0,75	0,884	1,023	1,183	1,37	1,589	1,856
82	0,9	1,036	1,182	1,352	1,551	1,791	2,08
83	1,019	1,156	1,308	1,486	1,694	1,944	2,25
84	1,123	1,261	1,417	1,598	1,815	2,073	2,391
85	1,217	1,355	1,515	1,702	1,922	2,189	2,515

Таблица 7 - Эмпирический коэффициент С для внешнего контура черпаковой цепи

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.8>

Количество во черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
81	0,834	0,875	0,9	0,939	0,982	1,029	1,085
82	1,094	1,131	1,161	1,202	1,248	1,306	1,368
83	1,23	1,333	1,367	1,409	1,458	1,516	1,583
84	1,479	1,509	1,543	1,583	1,636	1,692	1,761
85	1,642	1,668	1,702	1,745	1,793	1,852	1,918

Таблица 8 - Координаты экстремума внешнего контура

DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.9>

Количество во черпаков	Угол наклона черпаковой цепи, град						
	15	20	25	30	35	40	45
Координата по X, м	-19,207	-19,906	-20,203	-20,252	-19,833	-19,033	-17,971
81	-9,527	-11,552	-13,645	-15,847	-18,005	-20,087	-22,107
82	-10,831	-12,814	-14,872	-17,009	-19,12	-21,194	-23,189

83	-11,867	-13,809	-15,835	-17,927	-19,999	-22,035	-24,008
84	-12,767	-14,676	-16,665	-18,698	-20,745	-22,739	-24,687
85	-13,582	-15,458	-17,409	-19,412	-21,406	-23,377	-25,286

Таблица 9 - Константы  $k$ ,  $m$  и  $z$ DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2024.140.1.10>

Заданные эмпирические коэффициенты	Определяемые эмпирические коэффициенты		
	$d_a$	$e_a$	$t_a$
$k$	0	0,00002	-0,00063
$m$	0,00001	-0,00188	0,05045
$z$	-0,00019	0,03495	-0,96548
	$d_b$	$e_b$	$t_b$
$k$	-0,00001	0,00035	-0,01592
$m$	0,00093	-0,02633	1,28164
$z$	-0,01686	0,49608	-24,57133
	$d_c$	$e_c$	$t_c$
$k$	0,00001	-0,00024	0,02455
$m$	-0,00063	0,01627	-1,99478
$z$	0,01077	-0,2741	38,62707

Используя полученные значения, представленные в таблицах 5–7 и 9, возможно вычислить координаты точек внешнего контура цепи. Модель учитывает длину черпаковой цепи и угол наклона цепи.

Координаты точек на дуге внешнего контура цепи определяются следующим уравнением:

$$y = a \cdot x^2 + b \cdot x + c \quad (6)$$

где  $a, b$  и  $c$  – коэффициенты, которые зависят от длины черпаковой цепи и угла наклона черпаковой рамы.

$$a, b, c = d_{a,b,c} \cdot \alpha^2 + e_{a,b,c} \cdot \alpha + t_{a,b,c} \quad (7)$$

где  $d, e$  и  $t$  – коэффициенты, которые зависят от длины черпаковой цепи по внутреннему контуру:

$$d_{a,b,c}, e_{a,b,c}, t_{a,b,c} = k \cdot L_{\text{ц}}^2 + m \cdot L + z \quad (8)$$

где  $L_{\text{ц}}$  – длина черпаковой цепи по внутреннему контуру, м;  $k, m$  и  $z$  – константы (табл. 9).

Пример расчета координат точек на внешнем и внутреннем контуре

Исходные данные:  $x = -15$  м;  $A = 31,7$  м;  $n = 82$ ;  $\cdot x = -15$  м;  $A = 31,7$  м;  $\alpha = 30$  град.;  $r_{\text{нчб}} = 1,8$  м;  $r_{\text{вчб}} = 1,8$  м.

Координаты точек на внутреннем контуре:

$$x_{A1} = -(31,7 + 1,8) \cdot \cos 30 = -29,012 \text{ м} \quad (9)$$

$$y_{A1} = -(31,7 + 1,8) \cdot \sin 30 = -16,75 \text{ м} \quad (10)$$

$$x_{A3} = 1,8 \cdot \cos 30 = 1,56 \text{ м} \quad (11)$$

$$y_{A3} = 1,8 \cdot \sin 30 = 0,9 \text{ м} \quad (12)$$

$$y = 0,026 \cdot (-15)^2 + 1,352 \cdot (-15) - 0,412 = -14,092 \text{ м} \quad (13)$$

Координаты точек на внешнем контуре:

$$y = 0,028 \cdot (-15)^2 + 1,352 \cdot (-15) - 1,202 = -15,182 \text{ м} \quad (14)$$

### Заключение

В результате данной работы разработана математическая модель расчета координат внешнего и внутреннего контуров черпаковой цепи. Данная модель учитывает такие переменные, как: угол наклона черпаковой рамы, а также длину черпаковой цепи. Модель получена для драги 250Д, но также возможно ее применение для других стандартных типоразмеров драг. Таких как 80Д, 150Д и других, так как имеют такое же отношение длины цепи к черпаковой раме.

Зная координаты контура черпаковой цепи, появляется возможность для построения модели, которая может стать основой для определения объемов разубоживания хвостами эфельных отвалов в призабойной зоне дражного разреза.

### Конфликт интересов

Не указан.

### Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### Conflict of Interest

None declared.

### Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### Список литературы / References

1. Космический мониторинг дражных разработок // Геопространственная аналитика. — 2023 — URL: <https://geonovosti.terratech.ru/economy/kosmicheskij-monitoring-drazhnykh-razrabotok/> (дата обращения: 18.05.2023)
2. Тальгамер Б. Л. Формирование продуктивных отложений в процессе подготовки запасов к драгированию / Б. Л. Тальгамер, М. Е. Семенов // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2018. — № 10. — С. 86–93.
3. Пятаков В. Г. Техногенные россыпи – существенный резерв золотодобычи / В. Г. Пятаков // Золотодобыча. — 2009. — № 130. — С. 41–42.
4. Тальгамер Б. Л. Состояние и перспективы дражной золотодобычи в Иркутской области / Б. Л. Тальгамер, С. Г. Тютрин, В. А. Ершов // Золотодобыча. — 2016. — № 12(217). — С. 11–14.
5. Пятаков В. Г. Перспективы развития дражного способа разработки россыпных месторождений / В. Г. Пятаков, Б. Л. Тальгамер // Горный журнал. — 2019. — № 12. — С. 35–38.
6. Ершов В. А. Развитие дражной добычи в Ленском золотопромышленном районе / В. А. Ершов // Горная промышленность. — 2005. — № 2(60). — С. 42–46.
7. Muir A. Retreatment of Gold Residues / A. Muir, J. Mitchell, S. Flatman et al. // Gold Ore Processing. — 2016. — № 15. — P. 709–728.
8. Wates J. Practical Considerations in the Hydro Re-Mining of Gold Tailings / J. Wates, A. Go // Gold Ore Processing. — 2016. — № 15. — P. 729–738.
9. Betancur-Corredor Bibiana Gold Mining as a Potential Driver of Development in Colombia: Challenges and Opportunities / Bibiana Betancur-Corredor, Carlos Loaiza-Usuga Juan, Manfred Denich Christian Borgemeister // Journal of Cleaner Production. — 2018. — № 199. — P. 538–553.
10. Webb B. Dredging for Gold / B. Webb. — Medford : Webb Research Group Publishers, 1994. — 100 p.
11. Rohe R. Gold Dredging in the American West: Origin and Diffusion / R. Rohe // The Pacific Historian. — 1984. — 28. — P. 5–18.
12. Мамаев Ю. А. Развитие теории процессов формирования техногенных россыпных месторождений / Ю. А. Мамаев, В. С. Литвинцев, Г. П. Пономарчук и др. // Горно-информационно-аналитический бюллетень. — 2007. — № 16. — С. 106–122.
13. Кисляков В. Е. Методика определения разубоживания песков в забое эфельными отвалами при дражной разработке россыпных месторождений / В. Е. Кисляков, Д. А. Дорожкин, П. А. Зубов и др. // Маркшейдерия и недропользование. — 2022. — № 6(122). — С. 16–22.
14. Лешков В. Г. Разработка россыпных месторождений / В. Г. Лешков. — Москва : Издательство МГГУ, 2007. — 906 с.

### Список литературы на английском языке / References in English

1. Kosmicheskij monitoring drazhnykh razrabotok [Space Monitoring of Dredge Developments] // Geospatial Analytics. — 2023 — URL: <https://geonovosti.terratech.ru/economy/kosmicheskij-monitoring-drazhnykh-razrabotok/> (accessed: 18.05.2023) [in Russian]
2. Tal'gamer B. L. Formirovanie produktivnykh otlozhenij v protsesse podgotovki zapasov k dragirovaniju [Formation of Productive Deposits in the Process of Preparing Reserves for Dredging] / B. L. Tal'gamer, M. E. Semenov // Gornyj informacionno-analiticheskij bjulleten' [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2018. — № 10. — P. 86–93. [in Russian]
3. Pjatakov V. G. Tehnogennye rossypi – suschestvennyj rezerv zolotodobychi [Technogenic Placers Are a Significant Reserve of Gold Mining] / V. G. Pjatakov // Zolotodobycha [Gold Mining]. — 2009. — № 130. — P. 41–42. [in Russian]
4. Tal'gamer B. L. Sostojanie i perspektivy drazhnoj zolotodobychi v Irkutskoj oblasti [Status and Prospects of Dredging Gold Mining in the Irkutsk Region] / B. L. Tal'gamer, S. G. Tjutrin, V. A. Ershov // Zolotodobycha [Gold Mining]. — 2016. — № 12(217). — P. 11–14. [in Russian]
5. Pjatakov V. G. Perspektivy razvitija drazhnogo sposoba razrabotki rossypnykh mestorozhdenij [Prospects for the Development of the Dredging Method for the Development of Alluvial Deposits] / V. G. Pjatakov, B. L. Tal'gamer // Gornyj zhurnal [Mining Journal]. — 2019. — № 12. — P. 35–38. [in Russian]
6. Ershov V. A. Razvitie drazhnoj dobychi v Lenskom zolotopromyshlennom rajone [Development of Dredge Mining in the Lensky Gold Mining Region] / V. A. Ershov // Gornaja promyshlennost' [Mining]. — 2005. — № 2(60). — P. 42–46. [in Russian]

7. Muir A. Retreatment of Gold Residues / A. Muir, J. Mitchell, S. Flatman et al. // *Gold Ore Processing*. — 2016. — № 15. — P. 709–728.
8. Wates J. Practical Considerations in the Hydro Re-Mining of Gold Tailings / J. Wates, A. Go // *Gold Ore Processing*. — 2016. — № 15. — P. 729–738.
9. Betancur-Corredor Bibiana Gold Mining as a Potential Driver of Development in Colombia: Challenges and Opportunities / Bibiana Betancur-Corredor, Carlos Loaiza-Usuga Juan, Manfred Denich Christian Borgemeister // *Journal of Cleaner Production*. — 2018. — № 199. — P. 538–553.
10. Webb B. Dredging for Gold / B. Webb. — Medford : Webb Research Group Publishers, 1994. — 100 p.
11. Rohe R. Gold Dredging in the American West: Origin and Diffusion / R. Rohe // *The Pacific Historian*. — 1984. — 28. — P. 5–18.
12. Mamaev Ju. A. Razvitie teorii protsessov formirovaniya tehnogennyh rossypnyh mestorozhdenij [Development of the Theory of Processes of Formation of Technogenic Placer Deposits] / Ju. A. Mamaev, V. S. Litvintsev, G. P. Ponomarchuk et al. // *Gorno-informacionno-analiticheskij bjulleten'* [Mining Information and Analytical Bulletin]. — 2007. — № 16. — P. 106–122. [in Russian]
13. Kisljakov V. E. Metodika opredelenija razubozhivaniya peskov v zaboe efel'nymi otvalami pri drazhnoj razrabotke rossypnyh mestorozhdenij [Methodology for Determining the Dilution of Sands in the Bottom of the Dredging Waste during the Dredging Development of Placer Deposits] / V. E. Kisljakov, D. A. Dorozhkin, P. A. Zubov et al. // *Markshejderija i nedropol'zovanie* [Mine Surveying and Subsoil Use]. — 2022. — № 6(122). — P. 16–22. [in Russian]
14. Leshkov V. G. Razrabotka rossypnyh mestorozhdenij [Development of Alluvial Deposits] / V. G. Leshkov. — Moscow : Publishing House MSHU, 2007. — 906 p. [in Russian]