

Научная статья  
УДК 622.271.1:622.277  
DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-85-94

## Логико-математический анализ обобщённой функции модели кучного выщелачивания золота в рудном штабеле

**Виктор Петрович Мязин<sup>1</sup>, Денис Сергеевич Гончаров<sup>2</sup>,  
Екатерина Сергеевна Соколова<sup>3</sup>, Светлана Александровна Арданаева<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup>Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия,

<sup>1</sup>Институт горного дела имени Н. А. Чинакала СО РАН, г. Новосибирск, Россия,

<sup>2</sup>Восток геосервис партнёр, г. Чита

<sup>1</sup>myazinvpchita@mail.ru, <sup>2</sup>dgoncharov@yandex.ru, <sup>3</sup>sokolova2132@mail.ru, <sup>4</sup>ardanaeva@mail.ru

### Информация о статье:

Статья поступила  
в редакцию 10.05.2023

Одобрена после  
рецензирования 17.10.2023

Принята к публикации  
20.10.2023

### Ключевые слова:

кучное выщелачивание,  
рудный штабель, золото,  
ценный компонент,  
эффективность процесса,  
логико-математический  
анализ, обобщённая  
функция, факторный  
анализ, методологические  
приёмы исследования,  
методика

Теория кучного выщелачивания ценных компонентов из минерального сырья в значительной степени базируется на методах моделирования и их компьютерной реализации. Объектом исследования в работе является обобщённая функция эффективности перевода ценного компонента при кучном выщелачивании в продуктивный раствор, ранее она была получена авторами при блочном моделировании процесса кучного выщелачивания золота из рудного штабеля. Цель исследования – научное обоснование важнейших технологических факторов после расчленения исследуемой обобщённой функции с использованием логического приёма метода дедукции на полноту перевода ценного компонента (извлечения) в раствор. Задачи исследования – логико-математический анализ варьирующих технологических факторов в обобщённой функции путём комплексного использования приёмов дедукции, индукции и математических методов. Приведены результаты исследования, полученные методом системного анализа по оценке каждого и попарно варьирующих технологических факторов на полноту извлечения ценного компонента в раствор. В работе предложено использовать декартово произведение множества комбинаций варьирующих факторов (картежей) на эффективность перевода золота в продуктивный раствор. Дана оценка влияния отдельных и попарно взятых варьируемых факторов на характер изменения функциональной зависимости извлечения золота от времени выщелачивания. При этом выявлено, что все исследуемые факторы подчиняются экспоненциальной зависимости. Данное заключение также подтверждено использованием приёма первой производной функции варьирующих факторов. Сравнительной оценкой скорости выщелачивания золота и сочетания варьирующих факторов на основе использования логического приёма дедукции установлено, что наибольшее влияние от времени выщелачивания оказывает крупность рудного куска и температура раствора. Результаты могут быть использованы для формирования практических рекомендаций по эффективности использования технологии кучного выщелачивания ценных компонентов из минерального сырья.

### Original article

## Logical and Mathematical Analysis of the Generalized Function of the Model of Heap Leaching of Gold in the Ore Stack

**Viktor P. Myazin<sup>1</sup>, Denis S. Goncharov<sup>2</sup>, Ekaterina S. Sokolova<sup>3</sup>, Svetlana A. Ardanaeva<sup>4</sup>**

<sup>1,3,4</sup>Transbaikal State University, Chita, Russia, <sup>1</sup>Institute of Mining named after N. A. Chinakal SB RAS,

Novosibirsk, Russia, <sup>2</sup>Vostok geoservice partner, Chita, Russia

<sup>1</sup>myazinvpchita@mail.ru, <sup>2</sup>dgoncharov@yandex.ru, <sup>3</sup>sokolova2132@mail.ru, <sup>4</sup>ardanaeva@mail.ru

### Information about the article:

Received 10 May, 2023

Approved after review  
17 October, 2023

Accepted for publication  
20 October, 2023

The theory of heap leaching of valuable components from mineral raw materials is largely based on modeling methods and their computer implementation. The object of study is a generalized function of a valuable component transferring efficiency during heap leaching into a productive solution. Previously it has been obtained by the authors during block modeling of the process of heap leaching of gold from an ore stack. The purpose of the study is the scientific substantiation of the most important technological factors after the division of the generalized function under study using

the logical method of deduction to the completeness of the valuable component (extraction) transfer into solution. The objectives of the research are logical and mathematical analysis of varying technological factors in a generalized function through the integrated use of deduction, induction and mathematical methods. The results of the study are presented, obtained by the method of system analysis by assessing each and pairwise varying technological factors for the completeness of the valuable component extraction into the solution. The authors propose to use the Cartesian product in many combinations of varying factors (cartes) for the efficiency of transferring gold into a productive solution. An assessment of the individual and pairwise variable factors influence on the nature of changes in the functional dependence of gold extraction on leaching time is made. It is revealed that all the studied factors obey an exponential dependence. This conclusion is also confirmed using the technique of the first derivative of the varying factors function. By comparative assessment of the gold leaching rate and a combination of varying factors based on the use of a logical deduction technique, it is established that the size of the ore piece and the temperature of the solution have the greatest influence on the leaching time. The conclusion drawn can be used to provide practical recommendations on the effectiveness of using heap leaching technology for valuable components from mineral raw materials.

**Keywords:**

heap leaching, ore stack, gold; valuable component, process efficiency, logical and mathematical analysis, generalized function, factor analysis, methodological methods of research, technique

**Введение.** Разработка методов кучного выщелачивания ценного компонента из природных и техногенных месторождений относится к числу важнейших научных проблем.

**Актуальность темы исследования** – использование теоретических методов познания на основе системного анализа исследований путём развития применения математического моделирования и компьютерной реализации физико-химических моделей. Однако в них слабо отражено влияние математической логики исследований, которая по предмету – логика, а по методу – математика<sup>1</sup>.

**Объектом исследования** является обобщённая функция эффективности перевода ценного компонента при кучном выщелачивании в продуктивный раствор, ранее она была получена авторами при блочном моделировании процесса кучного выщелачивания золота из рудного штабеля.

Авторами разработана обобщённая функция, учитывающая эффективность перевода ценного компонента в продуктивный раствор  $E(t)$  путём блочного моделирования процесса кучного выщелачивания золота из рудного штабеля [1; 8; 10].

Обобщённая функция основана на учёте влияния характерных варьирующих технологических факторов<sup>2</sup> [5] с учётом варьирующих физико-химических показателей процесса выщелачивания, используемых для анализа  $E(t)$ : содержание золота в руде, температура выщелачивающего раствора, максимальный диаметр куска в сформированном рудном штабеле, расход растворителя золота (цианида натрия), интенсивность орошения руд-

ного штабеля, коэффициент фильтрации выщелачивающего раствора [4; 12]

$$E(t) = K_E \left[ 1 - \exp \left( -\beta \frac{w_0 \cdot f_p \cdot f_{Au}^{\alpha} \cdot f_{NaCN}^{\alpha} \cdot f_{Tp}}{f_{dmax} \cdot f_{Kф}} \cdot t \right) \right] \cdot 100, \quad (1)$$

где  $K_E$  – предельный коэффициент извлечения золота;

$w_0$  – коэффициент конвективной диффузии, мм/сут.;

$f_p, f_{Au}^{\alpha}, f_{max}^{\alpha}, f_{Kф}, f_{Tp}$  – изменение функциональных параметров отдельных варьируемых технологических и физико-химических факторов:

– функционал интенсивности орошения рудного штабеля ( $f_p$ ), л/м<sup>2</sup>×сут.;

– функционал содержания золота в исходной руде ( $f_{Au}^{\alpha}$ ), г/т.;

– функционал содержания цианида натрия в растворе ( $\alpha_{NaCN}$ ), г/л.;

– функционал температуры рабочего раствора ( $f_{Tp}$ ), °С.;

– функционал максимального диаметра куска в рудном штабеле ( $f_{dmax}$ ), мм.;

– функционал коэффициента фильтрации выщелачивающего раствора в рудном штабеле ( $f_{Kф}$ ), м/сут, базируемый на данных практики выщелачивания ценного компонента из техногенного сырья [2].;

– время выщелачивания ценного компонента в штабеле ( $t$ ), сут.

Сложный объект исследования процессов выщелачивания золота из минерального сырья (система) определяется в этом случае не только отдельными элементами функции, но и характерными связями и отношениями между ними.

**Предмет исследования** – извлечение ценного компонента в раствор в зависимости

<sup>1</sup> Дрещинский В.А. Методология научных исследований: учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2022. – 274 с.

<sup>2</sup> Там же.

от основных варьирующих технологических факторов.

**Цель исследования** – научное обоснование важнейших технологических факторов после расчленения исследуемой обобщённой функции с использованием логического приёма метода дедукции на полноту перевода ценного компонента (извлечения) в раствор.

**Задачи исследования:** 1) оценить влияние отдельных варьирующих факторов после расчленения функции на отдельные элементы для оценки полноты перевода золота в продуктивный раствор; 2) проанализировать влияние значимых факторов использования декартового произведения множества комбинаций (картежей) на основе применения логических приёмов индукции и дедукции для эффективного извлечения золота в продуктивный раствор; 3) логико-математический анализ варьирующих технологических факторов в обобщённой функции путём комплексного использования приёмов дедукции, индукции и математических методов.

**Методология и методы исследования.** Системный подход исследования на основе логико-математического анализа отдельных элементов расчленённой обобщённой функции, определяющих полноту перевода ценного компонента в продуктивный раствор.

**Разработанность темы исследования.** Гидрометаллургическая технология кучного выщелачивания как система достаточно полно изучена и получила распространение в ведущих странах и России.

Особую роль логике исследования отдельных элементов в методологии и методах исследования Ч. Дарвин сформулировал в следующем изречении, обращённым к критикам: «О наблюдатель он хороший, но способности рассуждать у него нет».

Первые описания о логике исследований принадлежит древнегреческой науке (философы – Аристотель, Сократ, Платон). Важнейшее достижение науки в античный период времени является создание дедуктивного метода исследования, который в законченном виде впервые был представлен в «Логике» Аристотеля<sup>1</sup>. Изложена методика расчёта характеристик сложных систем технологического профиля, а количественные характеристики системы выражены через блоки с помощью алгебры логики.

<sup>1</sup> Дрещинский В. А. Методология научных исследований: учебник для вузов. – М.: Юрайт, 2022. – 274 с.

В это же время широкое распространение получают математические методы, использующиеся для решения прикладных и научных задач. Последующую систематизацию всех математических достижений предшественников осуществил Евклид, в которой он выдвинул систему аксиом, принимаемых без доказательства, а завершение античной науки закончилось обоснованием цельной концепции с использованием логики (основоположник Аристотель).

Развитие логики как науки логических закономерностей познания и её связь с методологией и методами исследования. Основоположники разработки математических методов логики – немецкий учёный Г. Лейбниц и англичанин Джордж Буль<sup>2</sup> [7].

Среди современных предшественников развивающих теоретические методы исследования процесса кучного выщелачивания ценных компонентов следует выделить следующих учёных: И. Н. Плаксина (основоположника современной гидрометаллургии благородных металлов и обогащения полезных ископаемых), Б. Н. Ласкорина (крупного специалиста в области получения цветных и благородных металлов (сорбция, десорбция), Ф. Хабаши (разработавшего теоретические основы прикладной гидрометаллургии), А. Н. Зеликмана и Г. М. Вольдмана (обосновавших теорию процессов выщелачивания золота при гидрометаллургических методах переработки минерального сырья), Г. Г. Минеева (обозначившего теоретические основы металлургии золота методами кучного и подземного выщелачивания золота), М. И. Фазлуллина (разработчика проектов и технологий кучного выщелачивания при освоении урановых и золотосодержащих месторождений), Г. В. Седельникову (разработчика методов интенсификации процесса кучного выщелачивания ценного компонента из бедных руд, теория обогащения золотосодержащих руд), Л. В. Шумилову (давшую теоретическое обоснование методов кучного выщелачивания ценных компонентов, разработка инновационных технологий кучного выщелачивания) и научные школы академика В. А. Чантурия (разработчика технологий переработки руд цветных и благородных металлов, комбинированные методы обогащения), Институт проблем комплексного освоения недр РАН, Российский государственный геологоразведочный университет им. Серго Орджоникидзе

<sup>2</sup> Там же.

зе, Московский государственный горный университет, Национальный исследовательский технологический университет МИСиС, Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина, Забайкальский государственный университет.

Комбинированное сочетание приёмов логики и математических методов в исследованиях предшественников до сих пор слабо разработаны. Для дальнейших теоретических исследований полноты перевода ценного компонента в продуктивный раствор, ранее отмеченного в работе методом блочного моделирования [9], предлагается в дальнейшем проанализировать влияние других неучтённых факторов. К ним в первую очередь следует отнести:

- содержание цианида натрия в рабочем растворе;
- интенсивность орошения рудного штабеля;
- влияние вещественного состава руды в штабеле на изменение численного значения коэффициента фильтрации, определяющего эффективность выщелачивания на границе раздел фаз твёрдого и жидкого (Т:Ж);
- влияние климатических параметров окружающей среды, в том числе характеристики криолитозоны на месте размещения технологической площадки под рудный штабель на эффективность процесса выщелачивания золота.

**Теоретические методы исследования:** 1) системный анализ факторов с применением логических приёмов индукции и дедукции; 2) моделирование технологического процесса выщелачивания золота; 3) разработка инновационных технологиче-

ских решений при кучном выщелачивании золота.

Граничные значения изменения каждого из варьирующих факторов приняты по данным практики использования метода кучного выщелачивания золота из техногенного сырья (см. таблицу) [11; 14; 15].

Кривые, характеризующие эффективность процесса выщелачивания золота из рудного штабеля в продуктивный раствор, приведены на рис. 1. Установлено, что зависимость эффективности перевода золота в продуктивный раствор подчиняется экспоненциальной закономерности. Причём изменения функции прослеживается в разной степени для различных варьируемых факторов. Кривые, характеризующие влияние содержания золота, температуры выщелачивающего раствора, максимальной крупности рудных кусков в рудном штабеле, отражены на рис. 1.

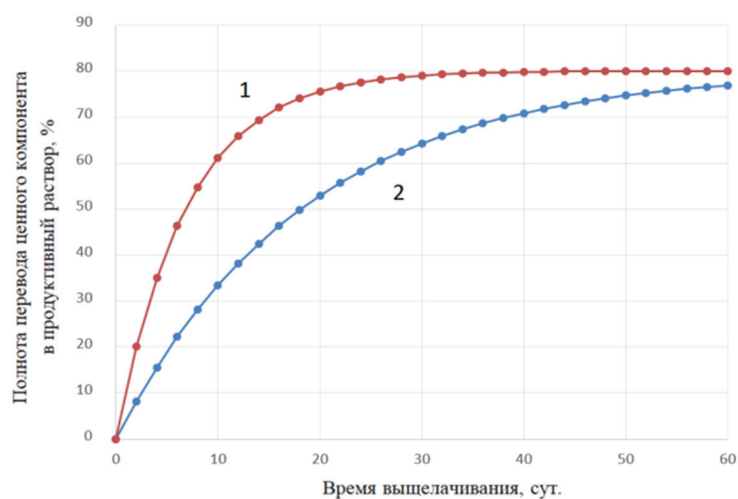
Анализ изменения функции, полученный в виде экспоненты показывает, что экспонента быстрее достигает плато, т. к. возрастает эффективность протекания физико-химических реакций. В то время как с повышением кусков руды в штабеле эффективность процесса выщелачивания золота снижается.

Влияние каждого индивидуального фактора обобщённой функции изучено с использованием метода математического анализа [3; 6], путём нахождения первой производной, учитывающей скорость выщелачивания ценного компонента в штабеле  $E'(t) = \Delta E(t) / \Delta t$ .

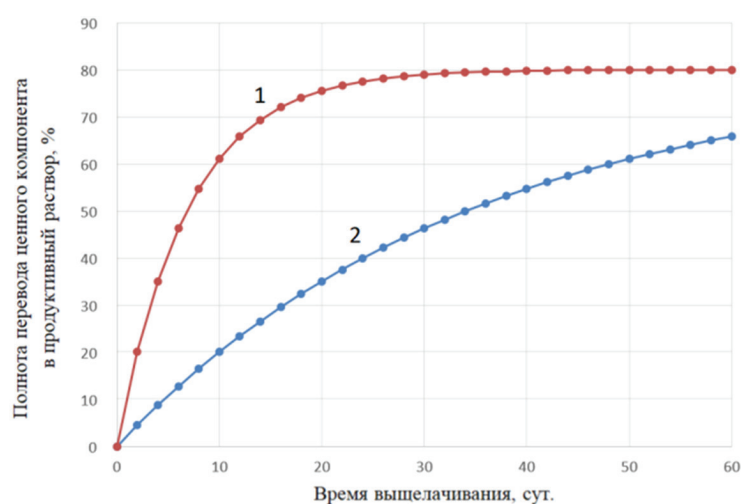
Результаты изменения первой производной обобщённой функции эффективности перевода ценного компонента в продуктивный раствор от времени выщелачивания приведены на рис. 2.

Основные варьирующие технологические факторы / Main varying technological factors

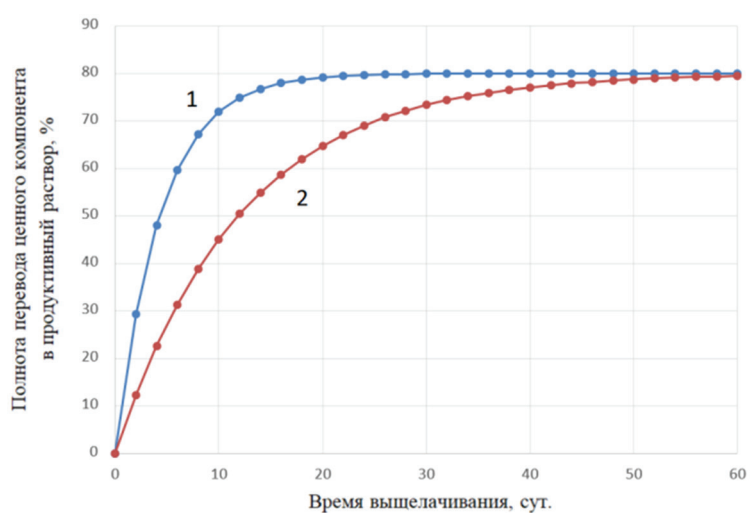
<i>Варьируемые технологические факторы / Technological factors</i>	<i>Единица измерения / Unit measure</i>	<i>Обозначение / Designation</i>	<i>Мин. значение / Min. value</i>	<i>Макс. значение / Max. Value</i>	<i>Шаг изменения исследуемого параметра / Step of the studied parameter change</i>
Содержание золота / Gold Content	Г/т / G/t		1,5	4	0,1
Температура рабочего раствора / working solution temperature	°С	$T_p$	5	25	1
Диаметр рудного куска / Ore piece diameter	Мм / Mm	$d_{max}$	10	40	10
Время выщелачивания / Leaching time	Сут. / Day	$t$	0	60	2



а)

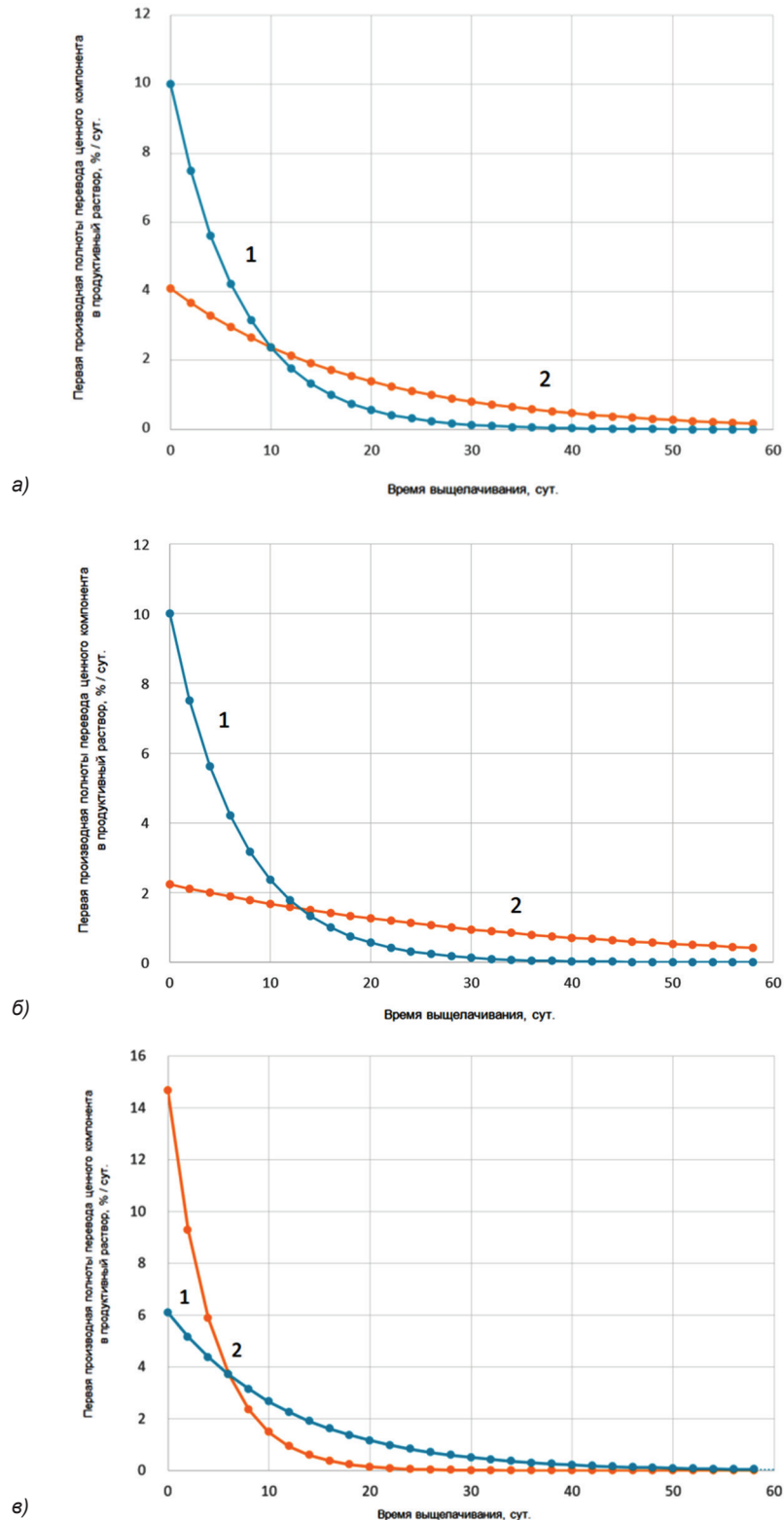


б)



в)

**Рис. 1.** Зависимость полноты перевода ценного компонента в продуктивный раствор (а, б, в) от времени выщелачивания: а) содержание ценного компонента, г/т; 1 – 4,0; 2 – 1,5; б) температура выщелачивающего раствора, °С, где 1 – 25; 2 – 5; в) максимальная крупность куска руды в штабеле, мм, 1 – 20, 2 – 40 / **Fig. 1.** The dependence of the completeness of a valuable component transfer into a productive solution (a, b, c) on the time of leaching: а) content of the valuable component, g/t, where 1 – 4.0; 2 – 1.5; б) temperature of the leaching solution, °C, 1 – 25; 2 – 5; в) maximum size of a piece of ore in a stack, mm, 1 – 20, 2 – 40



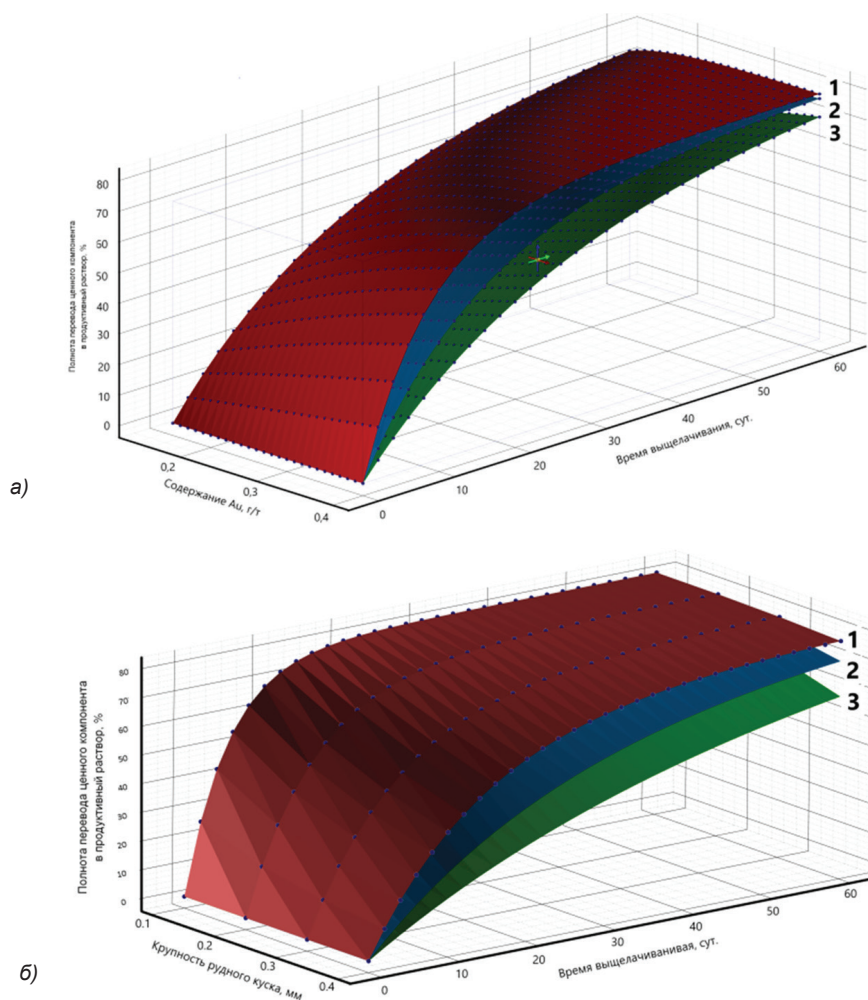
**Рис. 2.** Зависимость первой производной обобщённой функции полноты перевода ценного компонента в продуктивный раствор (а, б, в) от времени выщелачивания: а) содержание ценного компонента, г/т, 1 – 4,0; 2 – 1,5; б) температура выщелачивающего раствора, °С, 1 – 25; 2 – 5; в) максимальная крупность куска руды в штабеле, мм, 1 – 20, 2 – 40 / **Fig. 2.** The dependence of the first derivative of the generalized function of the completeness of a valuable component transfer into a productive solution (a, b, c) from the time of leaching:

a) content of the valuable component, g/t, 1 – 4.0; 2 – 1.5; b) temperature of the leaching solution, °C, 1 – 25; 2 – 5; c) maximum size of a piece of ore in a stack, mm, 1 – 20, 2 – 40

Характер изменения производной функции (скорости процесса от основных технологических параметров – количества вещества, переходящего в раствор в единицу времени) проявляется для каждого из факторов по-разному. Причём это в большей степени появляется при максимальной крупности куска в рудном штабеле и зависит от особенности протекания физико-химических реакций на границе раздела фаз Ж:Т, рис. 2в. Жидкая фаза (Ж) представлена концентрацией цианида в рабочем растворе воды, а кусок руды – минеральной поверхностью определённой формы, содержащей различные частицы вкрапленного мелкого золота и золота, сконцентрированного на поверхности сульфидных минералов. Сравнением данных скорости выщелачивания ценного компонен-

та, найденных по тангенсу угла наклона касательных к соответствующим кривым 1, 2, доказана существенная разница между ними. Угол наклона для первой кривой составляет  $10^\circ$ , а для второй –  $40^\circ$ .

Для оценки совместного влияния анализируемых факторов на эффективность перевода золота в продуктивный раствор предложено использовать декартовое произведение множеств комбинаций (кортежей)  $R = \alpha_{Au} \cdot T_p \cdot d_{max} \cdot t$  [13], значения которых приведены в таблице. Зависимости обобщённой функции  $E(t)$ , представленные в виде трёхмерных поверхностей эффективности перевода ценного компонента в продуктивный раствор, показаны на рис. 3. Численное значение изменения температуры раствора обозначено цифрами 1, 2, 3, где 1– $20^\circ\text{C}$ ; 2– $10^\circ\text{C}$ ; 3– $5^\circ\text{C}$ .



**Рис. 3.** Зависимости полноты перевода ценного компонента в продуктивный раствор: а – температура раствора, содержание ценного компонента, время выщелачивания; б – температура раствора, время выщелачивания, крупность рудного куска в штабеле, 1 – температура раствора  $20^\circ\text{C}$ , 2 – температура раствора  $10^\circ\text{C}$ , 3 – температура раствора  $5^\circ\text{C}$  / **Fig. 3.** The dependencies of the completeness of a valuable component transition into a productive solution: а – temperature of the solution, the content of the valuable component, leaching time; б – temperature of the solution, leaching time, size of the ore piece in the stack, 1 – solution temperature  $20^\circ\text{C}$ , 2 – solution temperature  $10^\circ\text{C}$ , 3 – solution temperature  $5^\circ\text{C}$

Анализ представленных поверхностей на рис. 2 показывает, что совместное сочетание двух факторов – крупности рудного куска и температуры раствора оказывает большее влияние на эффективность полноты перевода ценного компонента, чем влияние содержания ценного компонента и температуры раствора при этом же времени выщелачивания.

**Выводы.** С использованием приёмов логики научных исследований, основанных на анализе правил вывода заключений из посылок дедукции, показано влияние отдельных технологических факторов на эффективность перевода ценного компонента из рудного штабеля в продуктивный раствор.

Установлено, что каждый исследуемый фактор (содержание ценного компонента, температура выщелачивающего раствора, максимальная крупность куска руды в штабеле) подчиняется экспоненциальной закономерности. Совместное влияние рассмотрен-

ных технологических факторов при использовании функции, характеризующей полноту перевода ценного компонента в раствор, также подчиняется ранее выявленной экспоненциальной закономерности.

Анализ скорости изменения эффективности полноты перевода ценного компонента в продуктивный раствор, выполненный с помощью первой производной позволил заключить, что повышение содержания золота в руде и температуры выщелачивающего раствора приводит к повышению эффективности режимных параметров кучного выщелачивания золота.

Крупность куска руды в рудном штабеле приводит к снижению процесса выщелачивания ценного компонента в продуктивный раствор.

Дальнейшая оценка эффективности выщелачивания золота в рудном штабеле требует последующего проведения теоретических и экспериментальных исследований.

#### Список литературы

1. Барченков В. В. Обогащительные и гидрометаллургические процессы извлечения золота из руд. СПб.: Интермедия, 2022. 544 с.
2. Бейдин А. В., Морозов А. А., Мязин В. П., Соколова Е. С. Технологическая линия рудосортировки забалансовых урановых руд, поражённых накопленными включениями крепёжного леса при подземных работах (на примере ПАО «ППГХО») // Вестник Забайкальского государственного университета. 2022. Т. 28, № 3. С. 6–13.
3. Боярченко Е. Е. Математическое моделирование в горном деле // Севергеозкотех-2021: междунар. молодежная науч. конф. Ухта: Ухтинский гос. техн. ун-т, 2021. С. 227–229.
4. Василюк П. А., Размахнин К. К. Результаты гидрометаллургических исследований окисленной золотосодержащей руды участка «Северо-Восточный» месторождения «Дельмачик» // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 9. С. 77–86. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-9-0-77-86.
5. Доронина М. В., Табуркин В. И. Методология науки: становление, системность, основания, функции. Тюмень: Бюро+, 2019. 148 с.
6. Ковалёва Т. Е. Методы математического и компьютерного анализа и обработки информации в горном деле и геологии // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020. № 10. С. 272–276.
7. Левин В. И. Структурно-логические методы исследования сложных систем с применением ЭВМ. М.: Наука, 1987. 304 с.
8. Маниковский П. М., Овчаренко Н. В., Наумов А. Н. Геолого-математическое моделирование месторождений как фактор формирования профессиональных компетенций при подготовке современных горных инженеров // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. Чита: ЗабГУ, 2019. С. 24–29.
9. Мязин В. П., Гончаров Д. С., Соколова Е. С. Математическое моделирование кучного выщелачивания золота в рудном штабеле (на месторождении «Дельмачик») // Вестник Забайкальского государственного университета. 2021. Т. 27, № 10. С. 6–14.
10. Пономарева Г. А., Шестаков В. А. Кучное выщелачивание золота из бедных руд // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Оренбург: Оренбургский гос. ун-т, 2020. С. 978–981.
11. Рубцов Ю. И., Лавров А. Ю., Петухов А. А. Пути повышения эффективности освоения ресурсов техногенного минерального сырья Дарасунского рудника // Кулагинские чтения: техника и технологии производственных процессов. Чита: ЗабГУ, 2020. С. 221–225.
12. Секисов А. Г., Рассказова А. В., Литвинова Н. М. Комбинированное кучное выщелачивание сложноразвлекомых форм золота из техногенно-трансформированного минерального сырья // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2019. № 8. С. 198–208.



13. Ступицкий Е. Л. Физические исследования и математическое моделирование крупномасштабных геофизических экспериментов: монография. Долгопрудный: Интеллект, 2019. 799 с.
14. Anderson C. G. Alkaline sulfide gold leaching kinetics // *Minerals Engineering*. 2016. Vol. 92. P. 248–256. DOI: 10.1016/j.mineng.2016.01.009.
15. Kianinia Y., Khalesi M. R., Abdollahy M., Hefter G., Senanayake G., Hnedkovsky L., Darban A. K., Shabdazi M. Predicting cyanide consumption in gold leaching: a kinetic and thermodynamic modeling approach // *Minerals*. 2018. Vol. 8. P.110 DOI: 10.339 90/min8030110.

## References

1. Barchenkov V. V. Concentrating and hydrometallurgical processes of gold extraction from ores. Saint Petersburg: Intermedia, 2022. (In Rus.).
2. Beydin A. V., Morozov A. A., Myazin V. P., Sokolova E. S. Technological line of ore sorting of off-balance uranium ores affected by accumulated inclusions of fastening timber during underground work (on the example of PJSC “PPGHO”). *Bulletin of the Transbaikal State University*, vol. 28, no. 3. pp. 6–13, 2022. (In Rus.).
3. Boyarchenko E. E. Mathematical modeling in mining. Severgeocotech-2021: International. youth scientific conference. Ukhta: Ukhta State Technical University, 2021. (In Rus.).
4. Vasilyuk P. A., Razmakhnin K. K. Results of hydrometallurgical studies of oxidized gold-bearing ore of the Severo-Vostochny section of the Delmachik deposit. *Mining information and analytical Bulletin*, no. 9, pp. 77–86, 2020. DOI: 10.25018/0236–1493-2020-9-0-77-86. (In Rus.).
5. Doronina M. V., Taburkin V. I. Methodology of science: formation, consistency, foundations, functions. Tyumen: Bureau+, 2019. (In Rus.).
6. Kovaleva T. E. Methods of mathematical and computer analysis and information processing in mining and geology. *Proceeds of the Tula State University Technical Sciences*, no. 10, pp. 272–276, 2020. (In Rus.).
7. Levin V. I. Structural and logical methods for the study of complex systems using computers. Moscow: Nauka, 1987. (In Rus.).
8. Manikovskiy P. M., Ovcharenko N. V., Naumov A. N. Geological and mathematical modeling of deposits as a factor in the formation of professional competencies in the training of modern mining engineers. *Kulagin readings: techniques and technologies of production processes*. Chita: Transbaikal State University, 2019. (In Rus.).
9. Myazin V. P., Goncharov D. S., Sokolova E. S. Mathematical modeling of heap leaching of gold in an ore stack (at the Delmachik deposit). *Bulletin of the Transbaikal State University*, vol. 27, no. 10, pp. 6–14, 2021. (In Rus.).
10. Ponomareva G. A., Shestakov V. A. Heap leaching of gold from poor ores. University complex as a regional center of education, science and culture. Orenburg: Orenburg State University, 2020. (In Rus.).
11. Rubtsov Yu. I., Lavrov A. Yu., Petukhov A. A. Ways to improve the efficiency of the development of resources of technogenic mineral raw materials of the Darasunsky mine. *Kulaginsky readings: technique and technologies of production processes*. Chita: Transbaikal State University, 2020. (In Rus.).
12. Sekisov A. G., Rasskazova A. V., Litvinova N. M. Combined heap leaching of hard-to-recover forms of gold from technogenically transformed mineral raw materials. *Mining information and Analytical Bulletin*, no. 8, pp. 198–208, 2019. (In Rus.).
13. Stupitsky E. L. Physical research and mathematical modeling of large-scale geophysical experiments: monograph. Dolgoprudny: Intellect, 2019. (In Rus.).
14. Anderson K. G. Kinetics of alkaline sulfide leaching of gold. *Mineral engineering*, vol. 92, pp. 248–256, 2016. DOI:10.1016/j.mineng.2016.01.009. (In Eng.).
15. Kianinia Yu., Khalesi M. R., Abdollahi M., Hefter G., Senanayake G., Gnedkovsky L., Darban A. K., Shabdazi M. Forecasting cyanide consumption during gold leaching: an approach to kinetic and thermodynamic modeling. *Mineral Resources*, vol. 8, pp. 110, 2018. DOI: 10.339 90/min8030110. (In Eng.).

## Информация об авторах

*Мязин Виктор Петрович*, д-р техн. наук, зав. лабораторией института горного дела им. Н. А. Чинакала СО РАН, профессор кафедры обогащения полезных ископаемых и вторичного сырья Забайкальского государственного университета, г. Чита, Россия; myazinvpchita@mail.ru. Область научных интересов: обогащение руд, металлоносных песков, техногенных образований минерального сырья, геоэкология, методология научных исследований, физико-химические и инновационные технологии.

*Гончаров Денис Сергеевич*, канд. техн. наук, ведущий геолог, ООО «Восток геосервис», г. Чита, Россия; dgoncharov@yandex.ru. Область научных интересов: геоэкология, компьютерное моделирование технологических процессов, системный анализ, информационные системы.

*Сokolova Екатерина Сергеевна*, соискатель, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; sokolova2132@mail.ru. Область научных интересов: патентно-информационный анализ объектов техники и технологии, представление данных в двух- и трёхмерной системе проектирования, раз-

работка инновационных технологий, обоснование методов и устройств геотехнологии выщелачивания ценных металлов.

*Арданаева Светлана Александровна*, аспирант, Забайкальский государственный университет, г. Чита, Россия; ardanaeva@mail.ru. Область научных интересов: обогащение полезных ископаемых, металлургические методы и приёмы выщелачивания ценных металлов, математическая обработка и представление экспериментальных данных

#### **Information about the authors**

*Myazin Viktor P.*, doctor of technical sciences, head laboratory of the institute of mining named after N. A. Chinakal SB RAS, professor of the department of mineral processing and secondary raw materials, Transbaikal State University, Chita, Russia; myazinvpchita@mail.ru. Research interests: beneficiation of ores, metal-bearing sands, technogenic formations of mineral raw materials, geoecology, scientific research methodology, physico-chemical and innovative technologies.

*Goncharov Denis S.*, candidate of technical sciences, leading geologist of Vostok Geoservice, Chita, Russia; dgoncharov@yandex.ru. Research interests: geoecology, computer modeling of technological processes, system analysis, information systems

*Sokolova Ekaterina S.*, applicant for scientific degree, Transbaikal State University, Chita, Russia; sokolova2132@mail.ru. Research interests: patent information analysis of technical and technological objects, presentation of data in a two- and three-dimensional design system, development of innovative technologies, justification of methods and devices for geotechnology of leaching of valuable metals

*Ardanaeva Svetlana A.*, postgraduate, Transbaikal State University, Chita, Russia; ardanaeva@mail.ru. Research interests: mineral processing, metallurgical methods and techniques for leaching valuable metals, mathematical processing and presentation of experimental data

#### **Вклад авторов в статью**

В. П. Мязин – разработка идеи исследования, системный анализ разработанности темы с использованием логических приёмов индукции и дедукции, системный анализ научных исследований, формулирование выводов и заключения по статье, общее руководство выполнением работы.

Д. С. Гончаров – математический анализ эффективности обобщённой функции перевода ценного компонента в продуктивный раствор, графическое и экспоненциальное представление данных теоретических исследований.

Е. С. Соколова – поиск и системный анализ информационных источников и патентной документации, анализ аналогов по технологии кучного выщелачивания золота по ведущим странам, графическое представление данных теоретических исследований по варьируемым технологическим факторам, влияющих на эффективность кучного выщелачивания золота в рудном штабеле, оформление статьи.

С. А. Арданаева – математическая обработка данных и построение графических зависимостей.

#### **The authors contribution to the article**

V. P. Myazin – development of the research idea, systematic analysis of the topic development using logical techniques of induction and deduction, systematic analysis of scientific research, formulation of findings and conclusions, general guidance for the implementation of the work;

D. S. Goncharov – mathematical analysis of the effectiveness of the generalized function of a valuable component transferring into a productive solution, graphical and exponential presentation of theoretical research data;

E. S. Sokolova – search and systematic analysis of information sources and patent documentation, analysis of analogues of gold heap leaching technology in leading countries, graphical presentation of theoretical research data on variable technological factors affecting the efficiency of gold heap leaching in an ore stack, designю

S. A. Ardanaeva – mathematical data processing and construction of graphical dependencies.

#### **Для цитирования**

Мязин В. П., Гончаров Д. С., Соколова Е. С., Арданаева С. А. Логико-математический анализ обобщённой функции модели кучного выщелачивания золота в рудном штабеле // Вестник Забайкальского государственного университета. 2023. Т. 29, № 4. С. 85–94. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-85-94.

#### **For citation**

Myazin V. P., Goncharov D. S., Sokolova E. S., Ardanaeva S. A. Logical and Mathematical Analysis of the Generalized Function of the Model of Heap Leaching of Gold in the Ore Stack // Transbaikal State University Journal. 2023. Vol. 29, no. 4. P. 85–94. DOI: 10.2109/2227-9245-2023-29-4-85-94.