УДК 622.775

**С.Б.ТАТАУРОВ**, *канд. техн. наук, доцент, tataurovsb@mail.ru*
*Министерство образования и науки Российской Федерации*

**S.B.TATAUROV**, *PhD in eng. sc., associate professor, tataurovsb@mail.ru*
*Ministry of Education and Science of the Russian Federation*

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБОСНОВАНИЕ ГЕОТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ШТАБЕЛЯ ИЗ ОКОМКОВАННЫХ ЗОЛОТОСОДЕРЖАЩИХ РУД ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ФИЛЬТРАЦИОННЫХ СВОЙСТВ

В работе на основе экспериментально-теоретических исследований определены оптимальные параметры геотехнологии формирования штабеля из окомкованных золотосодержащих руд для улучшения его фильтрационных свойств. В частности, установлена экспоненциальная зависимость коэффициента фильтрации от высоты штабеля и предельной прочности окомкованной руды, ее насыпного веса и содержания крупнодисперсных частиц +2 мм в составе с песчаным, супесчаным и суглинистым мелкоземом. Без учета данных параметров потери золота в штабеле могут увеличиваться в 2 – 3 раза и более. На основе полученных результатов обосновано применение комбинированной геотехнологии кучного выщелачивания золотосодержащего глинистого сырья природного и техногенного происхождения.

***Ключевые слова*:** золотосодержащие глинистые руды, окомкование, прочностные свойства, коэффициент фильтрации, статическая нагрузка, кучное выщелачивание, криолитозона.

# EXPERIMENTAL AND THEORETICAL STUDIES AND JUSTIFICATION OF GEOTECHNOLOGY OF STOCK PILE FORMATION FROM PELLETIZED GOLD-BEARING ORES IN ORDER TO ENHANCE ITS FILTRATION PROPERTIES

Optimal parameters of geotechnology of stock pile formation from pelletized gold-bearing ores were established basing on experimental and theoretical studies in order to enhance its filtration properties. In particular, exponential dependence was established of permeability coefficient on the stock pile height and the ultimate strength of the pelletized ore, its bulk weight and content of coarse particles +2 mm in combination with sandy-loamy and loamy fine grained soil. Without account of this data loss of gold within the stock pile can increase over 2 or 3 times. Basing on the results obtained application of the combined geothechnology of heap leaching of gold-bearing clayey materials of natural and man-made origin was justified.

***Key words*:** gold-bearing clayey ores, pelletizing, strength properties, permeability coefficient, static load, heap leaching, permafrost zone.

**Постановка проблемы.** Одним из основных условий эффективной работы предприятий, применяющих геотехнологию кучного выщелачивания золота на месторождениях с высоким содержанием глинистых руд, является улучшение фильтрационных свойств выщелачивающего массива. В противном случае может наблюдаться снижение извлечения золота и значительное увеличение периода кучного выщелачивания.

Это особенно важно для территории криолитозоны, так как продление периода кучного выщелачивания золота требует существенных энергетических затрат на сохранение положительного теплового состояния штабеля и всей инфраструктуры в целом. При несоблюдении этого условия штабель может быть проморожен, что приведет к его криоконсервации, а соответственно к высоким потерям золота.

Для улучшения фильтрационных свойств штабеля кучного выщелачивания широко применяются технологии окомкования глинистых руд [3, 6]. Эти технологии нашли широкое применение при промышленной отработке золотосодержащих руд коры выветривания, отвалов россыпной и коренной золотодобычи с высоким содержанием глинистых фракций. Их целью является создание прочного и пористого материала, сохраняющего свои свойства при формировании и выщелачивании золотосодержащего сырья.

Анализ литературных данных показывает, что для окомкования различных типов руд среднее содержание цемента на тонну руды составляет 5-6 кг, хлорной извести – 3,5-4 кг [1]. В результате прочность окомкованной руды с таким содержанием связующего материала варьирует от 73,5-78,4 кПа при пористости окатышей до 1 д.е. Дальнейшее увеличение содержания связующего материала приводит к снижению проницаемости окомкованной руды, увеличению времени выщелачивания, а также ведет к удорожанию процесса рудоподготовки. Кроме этого, при окомковании глинистых руд и хвостов обогащения крупностью 0-3 мм увеличение цемента может приводить к обратному эффекту, проявляющемуся в снижении прочности окатышей [3].

Вместе с тем, как показывает практика кучного выщелачивания золота, при производстве штабелей из окомкованной глинистой руды сохраняется тенденция к увеличению его высоты. В частности, наши расчеты свидетельствуют, что при строительстве штабеля пять метров с насыпным весом агломерированной руды 1600 кг/м$^3$ статическая нагрузка на нижележащий слой возрастает до 78,4 кПа, а при строительстве штабеля десять метров соответственно увеличивается в два раза, что значительно превышает предел прочности окомкованной руды.

В этой связи, для повышения эффективности кучного выщелачивания золота из окомкованных глинистых руд в условиях криолитозоны были проведены исследования по изучению влияния статического давления налегающей верхней части штабеля превышающего прочность окомкованной руды на изменение коэффициентов фильтрации выщелачиваемого массива, его гранулометрический состав и извлечение золота.

**Методика исследований.** В методику исследований входило: 1) выявление причин и установление закономерностей изменения коэффициентов фильтрации и гранулометрического состава окомкованной суглинистой руды при строительстве и водонасыщении штабеля; 2) оценка эффективности извлечения золота при использовании штабелей КВ из окомкованной глинистой руды высотой свыше 5 метров.

Для проведения окомкования использовалась руда крупностью –10 мм. В качестве связующего вещества был применен цемент марки ПЦ-400. Его концентрация принималась равной 4 кг на тонну руды. Концентрация воды составляла 20 л/т. Гранулометрический состав окомкованной руды был следующим: –40+20(22 %), –20+10(35,6 %), –10+5(17,9 %), –5+2(15,2 %), –2+1(5,1), –1+0,5(1,7 %), –0,5+0,1(0,7 %), –0,1(0,5 %) мм. Влажность окомкованной руды на начало экспериментальных исследований колебалась от 0,11 до 0,17 д.ед., прочность окатышей составляла 68,3 кПа.

Определение влияния статических нагрузок на фильтрационные свойства окомкованной руды по разрезу штабеля КВ проводили на разработанном и созданном в ИПРЭК СО РАН крупногабаритном стенде.

Для изучения влияния статической нагрузки на гранулометрический состав окомкованной руды в штабеле на этапах его строительства и кучного выщелачивания золота было выполнено несколько серий экспериментов. В первой серии для каждого эксперимента формировали две аналогичные модели

штабеля, на каждую из которых задавали одинаковую нагрузку, равную статическому давлению на заданной глубине. После завершения уплотнения, для одной из моделей проводился гранулометрический анализ. Это позволяло оценить изменения гранулометрического состава окомкованной руды при строительстве штабеля. Вторую модель использовали для определения коэффициента фильтрации. Вторая серия экспериментов отличалась тем, что во время уплотнения аналогичных по составу двух моделях штабеля при тех же нагрузках, что и в первой серии, в рабочую камеру подавался йодидный раствор. Расход раствора для орошения исследуемых моделей (площадь сечения 0,024 м$^2$) был постоянным в течение эксперимента. При достижении заданной нагрузки одну из моделей использовали для установления влияния водонасыщения на изменение гранулометрического состава окомкованной руды, во второй определяли значения коэффициентов фильтрации и извлечения золота.

На завершающей стадии исследований производился комплексный анализ воздействия статических нагрузок на гранулометрический состав, воздействие этого состава на величину коэффициента фильтрации, и в целом на эффективность кучного выщелачивания. Это позволило разработать ряд предложений по совершенствованию геотехнологии кучного выщелачивания золота из окомкованных глинистых руд.

Определение гранулометрического состава и физико-механических свойств окомкованной руды выполняли до, и после проведения каждого в отдельности эксперимента, количество которых в сериях изменялось от 5 до 10.

Для оценки изменения гранулометрического состава, коэффициентов фильтрации и скорости выщелачивания ценного компонента в процессе сооружения и водонасыщения штабеля кучного выщелачивания использовались йодидные растворы.

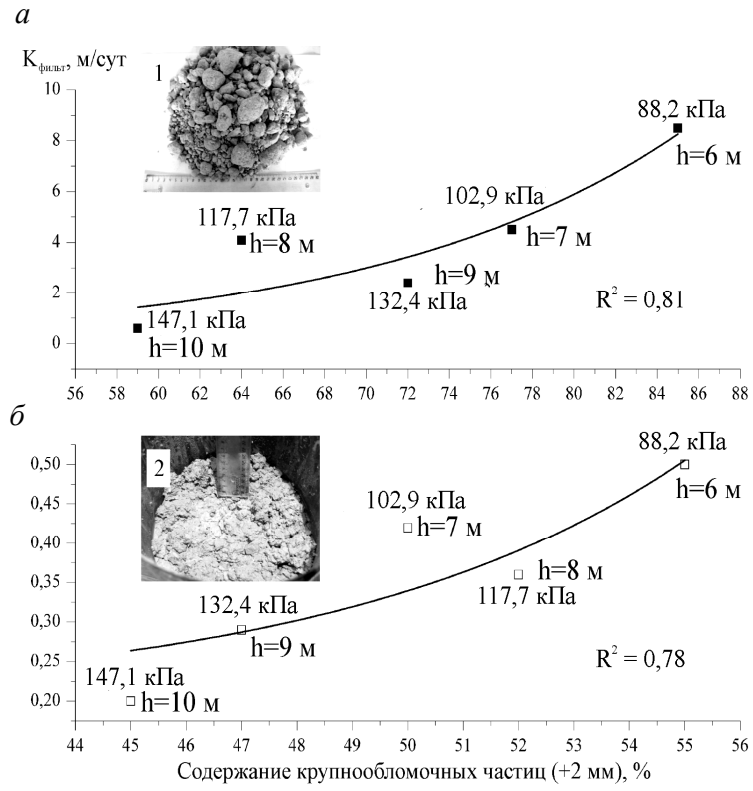



Рис.1. Изменение коэффициента фильтрации окомкованной руды в модели штабеля кучного выщелачивания золота в зависимости от содержания окатышей крупностью +2 мм (при прочности окатышей – 68,3 кПа), $R^2$ – коэффициент детерминации: *а* – стадия формирования штабеля; *б* – стадия водонасыщеня штабеля (72 ч)

Исходные растворы и растворы после выщелачивания золота анализировались на *Eh* на приборе CG-837 и *pH* на приборе «Анион 7000». Установление концентрации золота в растворах было выполнено на атомно-абсорбционном спектрофотометре фирмы «Perkinelmer» – 303ОВ в режиме абсорбции.

**Результаты исследований.** В ходе экспериментальных исследований нами было установлено, что на стадии формирования рудного штабеля при достижении критического статического давления налегающей верхней части штабеля превышающего прочность агломерированной руды, происходит разрушение окатышей с увеличением дисперсности окомкованного материала без существенного образования глинистой составляющей (рис.1, *а*). После полного растворонасыщения снижается содержание крупнообломочных фракций +2 мм, в составе руды вновь появляется глинистая составляющая, существовавшая до окомкования. Выбор нижнего предела крупности руды 2 мм обосновывается тем, что частицы крупнее 2 мм не обладают капиллярным поднятием и водоудерживающей способностью.

Также установлено, что при достижении критического статического давления налегающей верхней части штабеля более 73,5 кПа (при прочности окомкованной руды 68,3 кПа) содержание мелкозема достигло 55 %, что всего на 10-15 % меньше содержания мелкозема в исходной руде. В результате коэффициент фильтрации по глубине штабеля снизился с 0,5 до 0,25 м/сут (рис.1, *б*). Скорость снижения величины коэффициента фильтрации для окомкованной руды до водонасыщения при уменьшении содержания окатышей составила $0{,}28 \cdot 10^{-4}$ м/сут, после растворонасыщения – $75 \cdot 10^{-4}$ м/сут.

Одновременно была исследована кинетика йодидного выщелачивания золота из окомкованной руды (рис.2).

Наибольшая скорость выщелачивания достигается в верхнем окомкованном слое при статическом давлении верхней части штабеля, не превышающем предельной прочности окомкованной руды 68,3 кПа. При этом извлечение золота в раствор составляет 87 %. При статическом давлении верхней части штабеля >73,5 кПа в слое руды, находящемся в условиях статической нагрузки, превышающей предельную прочность окатышей, формируется «структурный» уровень разрушения, характеризующийся низкой фильтрационной способностью, высоким содержанием глинистой составляющей, мощность которого зависит от вещественного состава, насыпного веса руды и высоты штабеля. В результате скорость выщелачивания золота в этом уровне резко снижается (рис.2, кривая 2). Извлечение золота в раствор из нижележащего разрушенного слоя модели штабеля, составило 21 %, что в 4 раза меньше, чем в слое агломерированной руды, находящемся выше границы разрушения штабеля.

На основании теоретических и экспериментальных результатов исследований предложено уравнение, позволяющее определить изменение коэффициента фильтрации в нижележащем слое штабеля, подверженного статической нагрузке, превышающей предельную прочность окомкованной руды при условии, что предельная прочность окомкованной руды равна нагрузке при известной высоте и насыпном весе штабеля:

$$m = \frac{R_{\text{П}}}{g\rho h}, \qquad (1)$$

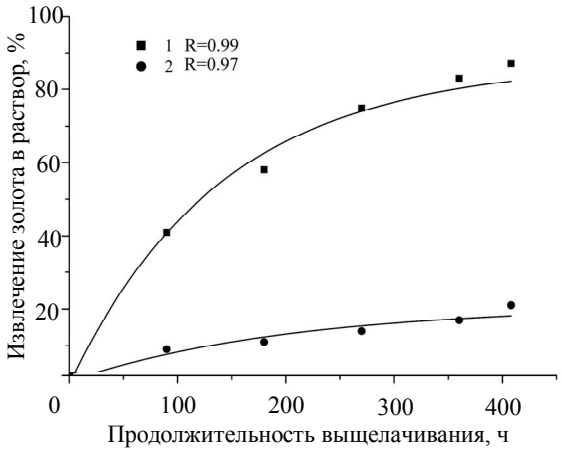



Рис.2. Кинетика йодидного выщелачивания золота из агломерированной окисленной руды месторождения Погромное (предел прочности 68,3 кПа) при статической нагрузке < 73,5 (1) и > 73,5 (2) кПа; $R^2$ – коэффициент детерминации




Рис.3. Принципиальная комбинированная схема кучного сернокислотно-хлоридного криовыщелачивания золотосодержащего глинистого сырья в присутствии диоксида марганца

$$k = k_o\left[1 - \frac{1}{e^m}\right], \qquad (2)$$

где $R_П$ – предельная прочность агломерированной руды, кПа; ρ – плотность окомкованной руды, кг/м$^3$, $h$ – высота штабеля, м; $g$ – скорость свободного падения, м/с$^2$; $k_o$ – коэффициент фильтрации окомкованной руды, с учетом содержания окатышей крупностью +2 мм.

Использование уравнения (2) позволяет оптимизировать геотехнологию кучного выщелачивания золота при промышленной отработке россыпных, техногенных месторождений и коры выветривания, с высоким содержанием глинистых фракций. В результате значительно сокращается период кучного выщелачивания золота в условиях криолитозоны за счет равномерного орошения во всем объеме штабеля.

Вместе с тем, известно, что россыпные месторождения золота криолитозоны характеризуется значительным присутствием крупного, среднего и мелкого золота, а техногенные месторождения – золотосодержащей амальгамой и ртутью [2, 7]. В этой связи применение технологии кучного выщелачивания для таких типов золотосодержащего сырья без предварительного извлечения крупного, среднего и мелкого золота, а также амальгамы будет связано с низкой эффективностью применяемой геотехнологии и потерей ценного компонента.

Для решения данной проблемы были проведены комплексные исследования по обоснованию и разработке аппаратов для отбора проб и переработки золотосодержащего сырья с целью создания комбинированных геотехнологий сочетающих разработанные технологические аппараты (магнитно-флокуляционный, гравитационно-электрохимический, сегрегационно-диффузионный) и кучное выщелачивание золота [4, 5, 7].

Испытания разработанных аппаратов в технологических схемах переработки россыпного золота и утилизации золотосодержащей амальгамы показали повышение извлечения золота из россыпных месторождений на 5-7 % и амальгамы золота на 10-15 %, что делает возможным их использование в комбинированных геотехнологиях сочетающих гравитационные аппараты и кучное выщелачивание золота, а также при геотехнологической оценке россыпных и техногенных месторождений [5, 7].

На основании полученных результатов исследований и обоснованной геотехнологии криовыщелачивания золота [7] предложена комбинированная геотехнология кучного сернокислотно-хлоридного выщелачивания золота в присутствии диоксида марганца из глинистого золотосодержащего сырья и техногенных амальгамосодержащих россыпей в условиях криолитозоны. Данная геотехнология включает следующие операции: дробление (дезинтеграцию), грохочение, предварительную концентрацию крупного, среднего золота и амальгамы, окомкование, формирование штабеля с учетом предельной прочности окатышей и статического давления его верхней части, кучное криовыщелачивание золота с последующей криоконсервацией остатков выщелачивания (рис.3).

Данная геотехнология кучного криовыщелачивания золота предусматривает применение разработанных аппаратов, а также проведение геотехнологических мероприятий, направленных на повышение извлечения золота из глинистого золотосодержащего сырья, всесезонное выщелачивание золота в условиях криолитозоны без применения мероприятий по сохранению положительных температур теплового состояния штабеля.

Некоторые параметры кучного криовыщелачивания глинистого золотосодержащего сырья представлены в таблице.

**Некоторые параметры кучного криовыщелачивания глинистого золотосодержащего сырья**

| Параметр | Значение |
|---|---|
| Производительность установки, тыс. т | 100-150 |
| Содержание золота в товарной руде, г/т | > 1 |
| Режим работы установки кучного выщелачивания | Круглогодичный |
| Рекомендуемая схема подготовки руды | Трехстадиальное дробление – окомкование |
| Крупность окомкованной руды, направляемой на кучное выщелачивание, мм | –10+0 |
| Тип гидроизоляционного основания под размещение штабеля | Одноразового или многоразового использования |
| Общая высота штабеля (рассчитывается с учетом предельной прочности окатышей и статического давления верхней части штабеля), м | ≤ 5 |
| Продолжительность полного цикла выщелачивания, сут*: при тепловом состоянии штабеля от –30 до +20 °С | 40-70 |
| Суммарное извлечение золота из руды, % при тепловом состоянии штабеля в диапазоне от –30 до +20 °С | 24-89 |
| Ориентировочный суммарный расход реагентов на 1 т глинистого золотосодержащего сырья определяется опытным путем | – |

* Продолжительность полного цикла зависит от температуры выщелачивания золота

Данная геотехнология, учитывающая влияние статического давления верхнего слоя штабеля, может рассматриваться в качестве базовой также для кучного выщелачивания золота с применением цианидных, йодидных и других растворов.

## Вывод

Таким образом, в ходе проведенных теоретических и экспериментальных исследований получены следующие результаты:

– на модельных системах изучено влияние статического давления налегающей верхней части штабеля на эффективность кучного выщелачивания золота, что позволило вскрыть закономерности изменения коэффициента фильтрации и степени извлечения золота в зависимости от высоты штабеля окомкованной руды при изменении ее гранулометрического состава;

– предложено обобщенное уравнение для определения коэффициента фильтрации штабеля кучного выщелачивания из окомкованной руды – физический критерий скорости кучного выщелачивания ценного компонента, учитывающий предельную прочность и плотность окомкованной руды, высоту штабеля и содержание крупнообломочных частиц (+2 мм) в составе с песчаным, супесчаным и суглинистым мелкоземом;

– экспериментальные зависимости, методы и уравнения определения параметров формирования штабелей из окомкованных глинистых золотосодержащих руд могут быть использованы для разработки мероприятий по повышению производительности добычи золота и энергосбережения при освоении золотосодержащих месторождений криолитозоны природного и техногенного происхождения.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Дружинина Г.Я.* Кучное выщелачивание золота из предварительно окомкованных руд / Г.Я.Дружинина, Г.А.Строганов, М.Н.Зырянов // Цветные металлы. № 9. 1997. С.17-19.

2. Закономерности развития золотороссыпных узлов и россыпей золота / Мин-во геологии СССР, Вост.-Сиб. научн.-исслед. институт геологии, геофизики и минер. сырья. М: Недра. 1985. 136 с.

3. Кучное выщелачивание благородных металлов / Под редакцией М.И.Фазлуллина. М.: Изд-во академии горных наук. 2001. 647 с.

4. *Кармазин В.В.* Золотодобыча России XIX-XX веков и современные технологии ликвидации причиненного ею экологического ущерба. / В.В.Кармазин, В.П.Мязин, О.И.Рыбакова и др. МГГУ. М., 2000. 40 с.

5. *Кармазин В.В.* Теоретические и экспериментальные исследования сегрегационно-диффузионной концентрации золота из отвальных продуктов / В.В.Кармазин, С.Б.Татауров, Н.П.Кармазина, С.Н.Рахимов // Золотодобывающая промышленность. 2009. № 4 (34). С. 6-12.

6. Подземное и кучное выщелачивание урана, золота и других металлов / Под ред. М.И.Фазлуллина. М.: Издательский дом «Руда и металлы». 2005. Т.2. 407 с.

7. *Татауров С.Б.* Трансформация и переработка золотосодержащего сырья в условиях криолитозоны. М.: Изд-во «Горная книга». 2008. 318 с.

**REFERENCES**

1. Druzhinina G.Ya. Heap Leaching of Gold from Previously Pelletized Ores / G.Ya.Druzhinina, G.A.Stroganov, M.N.Zyryanov // Non-Ferrous Metals. 1997. N.9. P.17-19.

2. Regularities in Development of Alluvial Gold Concentrations and Placer Deposits of Gold / Ministry of Geology of USSR, East-Siberian ResearchInstitute of Geology, Geophysics and Mineral Raw Materials. Moscow: «Nedra», 1985. 136 p.

3. Heap Leaching of Noble Metals / Edited by M.I. Fazlullin. Moscow, Publishing House of the Academy of Mining Sciences. 2001. 647 p.

4. *Karmazin V.V.* Gold Mining in Russia in 19th and 20th Centuries and Advanced Technologies of Environmental Damage Recovery Caused by Gold Mining Practice / V.V.Karmazin, V.P.Myazin, O.I.Rybakova, V.A.Izmalkov, S.B.Tataurov // Moscow State Mining Institute. Moscow, 2000. 40 p.

5. *Karmazin V.V.* Theoretical and Experimental Studies into Segregation-Diffusion Concentration of Gold from Dump Waste Products / V.V.Karmazin, S.B.Tataurov, N.P.Karmazina, S.N.Rakhimov // Gold Mining Industry, 2009. N.4 (34). P. 6-12.

6. Underground and Heap Leaching of Uranium, Gold and Other Metals / Edited by M.I. Fazlullin. // Moscow: Ores and Metals «Publishing House», 2005. V.2. 407 p.

7. *Tataurov S.B.* Transformation and Processing of Gold-Bearing Raw Materials in Conditions of Permafrost Zone / Moscow: «Gornaya Kniga», 2008. 318 p.