

Код МРНТИ 53.37.13:53.37.33

Н.К. Нургабыл, *К.К. Мамырбаева
Satbayev University (г. Алматы, Казахстан)

ИССЛЕДОВАНИЕ СОРБЦИИ ЗОЛОТА АКТИВИРОВАННЫМ УГЛЕМ В ПРИСУТСТВИИ МЕТАЛЛОВ ПРИМЕСЕЙ

Аннотация. Целью настоящей работы является исследование сорбционных свойств сорбентов, полученных на основе активированного угля (NoritRO, АКВАСОРБ) и шунгита. Эксперименты по определению оптимального сорбента проводились с цианистым раствором состава, мг/л: *Au* – 11,66; *Ag* – 2,16; *Fe* – 0,68; *Cu* – 8,45; *Zn* – 8,12. Установлено, что при сорбции золота с использованием сорбентов NoritRO, АКВАСОРБ и сорбента на основе шунгита, наибольшим значением емкости обладает ионит марки NoritRO. Оптимальным значением pH среды для извлечения золота с NoritRO и АКВАСОРБ является 10, для сорбента на основе шунгита pH = 6. При проведении сорбции золота из многокомпонентного раствора с сорбентом NoritRO в 6 стадий степень извлечения золота достигает 96-99%.

Ключевые слова: золото, свободное золото, цианидное выщелачивание, сорбент, активированный уголь, извлечение, pH, примеси металлов.

Металдардың қоспалардың қатысуымен белсендірілген көмірмен алтынның сорбциясын зерттеу

Аннотация. Бұл жұмыстың мақсаты белсендірілген көмір (NoritRO, АКВАСОРБ) және шунгит негізінде алынған сорбенттердің сорбциялық қасиеттерін зерттеу болды. Оңтайлы сорбентті анықтау бойынша эксперименттер құрамның цианид ерітіндісімен жүргізілді, мг/л: *Au* – 11,66; *Ag* – 2,16; *Fe* – 0,68; *Cu* – 8,45; *Zn* – 8,12. NoritRO сорбенттерін, АКВАСОРБТЫ және шунгит негізіндегі сорбентті қолдана отырып, алтынды сорбциялау кезінде NoritRO маркалы ионит сыйымдылықтың ең үлкен мәніне ие екендігі анықталды. NoritRO және АКВАСОРБ бар алтынды алу үшін ортаның оңтайлы pH мәні 10, шунгит негізіндегі сорбент үшін pH = 6 болды. NoritRO сорбентімен нақты цианидті өнімді ерітіндіден алтынды 6 сатыда сорбциялау кезінде алтынды алу дәрежесі 96-99% жетеді.

Түйінді сөздер: алтын, бос алтын, цианидті шаймалау, сорбент, белсендірілген көмір, экстракция, pH, металл қоспалары.

Investigation of gold sorption by activated carbon in the presence of impurity metals

Abstract. The purpose of this work was to study the sorption properties of sorbents obtained on the basis of activated carbon (NoritRO, AQUASORB) and shungite. Experiments to determine the optimal sorbent were carried out with a cyanide solution of the composition, mg/l: *Au* – 11.66; *Ag* – 2.16; *Fe* – 0.68; *Cu* – 8.45; *Zn* – 8.12. It was found that when gold is sorbed using NoritRO sorbents, AQUASORB and a sorbent based on shungite, the ionite of the NoritRO brand has the highest capacity value. The optimal pH value of the medium for extracting gold from NoritRO and AQUASORB was 10, for a sorbent based on shungite, pH = 6. When gold is sorbed from a real cyanide productive solution with NoritRO sorbent in 6 stages, the degree of gold extraction reaches 96-99%.

Key words: gold, free gold, cyanide leaching, sorbent, activated carbon, extraction, pH, metal impurities.

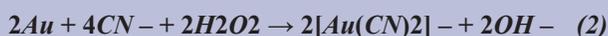
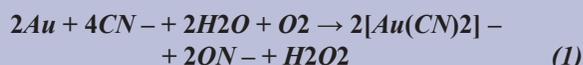
Введение

Золото благодаря уникальным свойствам находит широкое применение в электронной технике, ювелирном производстве, медицине, нанотехнологиях и т.д., кроме этого, его активно применяют как актив во всех странах мира.

В настоящее время с бурным развитием электронной промышленности, нанотехнологий и мировой нестабильностью резко возрос спрос на золото [1].

Казахстан обладает крупными запасами золота, по данным World Gold Council, на 1 июня 2022 года запасы золота в Казахстане составляли 373,4 т. Примерно 60% золота в стране сосредоточено в первичных месторождениях и 38% золота – в полиметаллических рудах. Однако, многие казахстанские месторождения относятся к бедным упорным золотосодержащим месторождениям с низкими содержаниями золота. Для поддержания объема производства золота в процесс все чаще вовлекается низкосортное золотосодержащее сырье. Извлечение золота из таких руд производится, главным образом, с использованием процесса цианирования с одновременным и/или последующим селективным рафинированием и концентрированием золота процессом ионного обмена (сорбцией) [2, 3]. Альтернативными реагентами выщелачивания являются тиомочевина, тиосульфат, галогенидные растворы и др. [4, 5].

При выщелачивании золотосодержащего концентрата цианидным раствором протекают следующие химические реакции, известные как уравнения Эльснера:



При взаимодействии с цианидным раствором золото окисляется кислородом воздуха и образует комплексный анион $[Au(CN)_2]^-$ со степенью окисления +1.

Новыми разновидностями цианидного процесса являются способ извлечения золота непосредственно из цианистых рудных пульп с использованием специально разработанных ионитов. Насыщенный золотом сорбент затем отделяют от пульпы и перерабатывают в отдельном цикле с получением золотосодержащего продукта. В зависимости от характера перерабатываемой руды сорбция золота из пульп осуществляется двумя методами – после предварительного выщелачивания («сорбент в пульпе» или sorbent-in pulp, CIP) или одновременная сорбция с выщелачиванием руды («сорбент – в выщелачивании», sorbent-in leach, CIL). При кучном цианистом выщелачивании, данный метод называют «сорбент в растворах», sorbent-in-solution, CIS). На предприятиях часто используют два варианта сорбции: «пульповой» (CIP, CIL) и «растворный» (CIS) [6, 7, 8].

Для селективного извлечения золота из растворов выщелачивания применяются процессы ионного обмена, жидкостная экстракция, осаждение цинком и т.д.

Среди всех эффективным и широко используемым процессом селективного извлечения золота из растворов является сорбция золота активированным углем. Активированный уголь получают из различных углеродсодержащих прекурсоров (из древесины, различных углей, костных остатков животных, скорлупы кокосового ореха и т.д.) карбонизацией при высокой температуре (в интервале температуры 800-900 °С) с последующей активацией химическим способом или обработкой водяным паром. При этом формируется высокопористая прочная структура, которая обеспечивает его высокие сорбцион-

ные свойства, в зависимости от температурного режима обработки. Образование различных функциональных групп позволяет углю проявлять анионо- и катионообменные свойства [9, 10, 11]. При наличии примесей в растворе выщелачивания, содержащих различные активные ионы, эффективность процесса сорбции активированным углем может значительно снизиться, что, в свою очередь, может существенно понизить производительность всего предприятия. Поэтому на каждом предприятии золота актуальной проблемой является исследование сорбционных свойств сорбентов, а также влияние примесей на извлечение золота.

Целью настоящего исследования является исследование сорбции золота и примесей активированным углем из растворов выщелачивания месторождения Акбакай.

Материалы и методика

Объектом исследования являются продуктивный раствор, полученный выщелачиванием золотосодержащих проб месторождения Акбакай и сорбенты на основе активированного угля марок NoritRO, полученные из кокоса, Аквасорб и активированный уголь на основе шунгита.

Атомно-эмиссионный анализ проводился с применением спектрометра с индуктивно-связанной плазмой Optima 5100 DV, Perkin Elmer, рентгенфазовый анализ – электронно-зондовым микроанализатором марки Superprobe 733 фирмы JEOL, Япония, рентгенфлуоресцентный анализ – энергодисперсионном рентгенофлуоресцентном спектрометре X-Calibur SDD LE Xenometrix. Содержание металлов в растворе определялось атомно-абсорбционным спектрометром SavantAA с пламенным атомизатором, pH растворов – с помощью лабораторного иономера «рН-150 М» со стандартными электродами.

Методика сорбции в статическом режиме

Сорбцию золота осуществляли по методике: ионит с массой 1 г перемешивали с 500 мл продуктивного раствора, продолжительность составила сутки, т.е. 24 часа. После истечения времени сорбции ионита отделяли от раствора и его заливали новой порцией исходного цианидного раствора и в течение 24 часов продолжали перемешивать.

Исследования влияния примесей металлов на извлечение золота проводились в 6 циклах. После каждого цикла насыщения сорбента металлом раствор был проанализирован на содержание золота и металлов-примесей методами химического анализа и атомно-абсорбционной спектрометрии.

В статических условиях обменная емкость выбранных сорбентов определялась по формуле:

$$E(\text{COE}), \% = \frac{C_{\text{исх}} - C_{\text{равн}}}{C_{\text{исх}}} \cdot \frac{V}{m}, \quad (1)$$

где $C_{\text{исх}}$ – исходная концентрация металла в растворе, мг/дм³ или ммоль/дм³;

$C_{\text{равн}}$ – равновесная концентрация металла в растворе, мг/дм³ или ммоль/дм³;

m – масса сорбента, г;

V – объем раствора, дм³.

Результаты и дискуссия

Физико-химическими исследованиями проб месторождения Акбакай установлено, что содержание золота в руде составляет 3,73 г/т. Основными компонентами руды являются кремнезем 64,7%; глинозем 14,00%; оксиды кальция 5,73%, магния 5,61%, калия 3,41%, натрия 2,93%. Рудообразующими фазами являются пирит, арсенопирит.

Исследования по сорбции проводились с продуктивными растворами, полученными выщелачиванием проб золотосодержащего месторождения с содержанием основных компонентов, мг/л: Au – 11,66; Ag – 2,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45; Zn – 8,12, цианид натрия – 811; pH 10,18.

Физико-химическими исследованиями установлен следующий химический состав руды (таблица 1).

Таблица 1

Химический состав руды месторождения Акбакай

Кесте 1

Кендердің химиялық құрамы Акбакай кен орны

Table 1

Chemical composition of the ore Akbakay deposit

Элемент, компонент	Массовая доля в пробе, %	Элемент, компонент	Массовая доля в пробе, %
SiO_2	68,70	Zn	0,00445
Al_2O_3	13,70	Cu	0,0054
CaO	5,38	As	0,241
MgO	2,47	Sb	<0,005
MnO	0,0071	Ba	0,036
P_2O_5	0,18	Bi	<0,005
K_2O	3,68	Cd	<0,0002
Na_2O	2,21	Cr	0,0096
TiO_2	0,73	Co	0,0012
$C_{\text{общ}}$	0,9	Mo	<0,0005
CO_2	2,71	Ni	<0,005
$Fe_{\text{общ}}$	3,06	Sr	0,015
$Fe_{\text{окисл}}$	2,55	Sn	<0,005
$Fe_{\text{сульф}}$	0,51	W	<0,01
$S_{\text{общ}}$	0,5	Hg	<0,003
$S_{\text{сульфат}}$	<0,25	Au , г/т	5,73
Pb	0,0044	Ag , г/т	1,22

Результаты химического анализа показывают, что руда на 94,27% состоит из литофильных минералов. Содержание благородных металлов золота и серебра составляют 5,73 и 1,22 г/т соответственно. Содержание мышьяка – 0,241.

Рентгендифракционным методом анализа установлено (таблица 2), что основными рудными фазами являются пирит, арсенопирит и лимониты, а породообразующими минералами являются кремнезем, полевые шпаты, кальцит, мусковит, хлориты и др. Железо в окисленной форме преобладает над сульфидной формой. В руде также присутствуют акцессорные минералы титана типа апатит.

Минеральный состав проб руды месторождения Акбакай
Акбакай кен орнының руда сынамаларының минералды құрамы
Mineral composition of ore samples from the Akbakai deposit

Таблица 2

Кесте 2

Table 2

Минерал, группа минералов	Массовая доля, %	Минерал, группа минералов	Массовая доля, %
Породообразующие минералы		Рудообразующие минералы	
Кварц	44,0	Пирит	0,8
Полевые шпаты	30,5	Арсенопирит	0,5
Кальцит	6,1	Оксиды/гидроксиды Fe	0,9
Мусковит	9,0	Акцессорные (минералы Ti, апатит)	1,5
Хлорит	6,7	Итого:	100

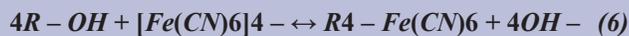
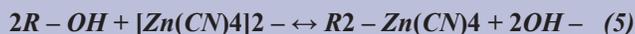
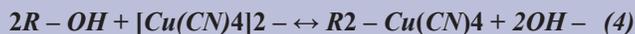
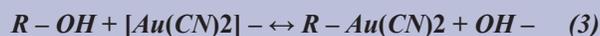
В руде в сотых и тысячных долях присутствуют окисленные и сульфидные меди, цинк. Полезным компонентом в пробе руды месторождения Акбакай является золото.

Известно, что для выщелачивания золота из такого вида сырья эффективно применять гравитационное обогащение с последующим процессом цианидного выщелачивания.

Для извлечения золота из продуктивных растворов, полученных выщелачиванием, эффективно применять сорбцию с активированными углями, выбор которой является важной проблемой на каждом месторождении золота.

Для выбора эффективного ионита проведены эксперименты по сорбции из модельных растворов с активированными углями NoritRO, Аквасорб и сорбента на основе шунгита.

Извлечение металлов сорбцией проводилось из модельного раствора цианида натрия с содержанием мг/л: Au – 11,66; Ag – 22,16; Fe – 0,68; Cu – 8,45; Zn – 8,12, цианид натрия – 811; pH 10,18. При сорбции цианистых комплексов металлов из растворов ионитами и/или активированными углями протекают реакции анионного обмена, которые описываются нижеследующими уравнениями:



При сорбции металлов необходимо учесть устойчивость цианистых комплексов целевых металлов и металлов примесей, соразмерность ионных радиусов анионов и пор сорбента, взаимодействие между цианистыми комплексами металлов с функциональными группами сорбентов, энергию притяжения между ионами и т.д. В зависимости от таких факторов определяется конечное количество сорбированных ионов в анионите и/или в активированном угле.

В результате проведения экспериментов по сорбции в статическом режиме определены статическая обменная

емкость сорбентов-активированных углей марок NoritRO, аквасорб и сорбента на основе шунгита. Полученные результаты приведены в таблице 3.

Результаты сорбции золота в статическом режиме
Статикалық режимде алтын сорбциясының нәтижелері

Таблица 3

Кесте 3

Table 3

Results of gold sorption in static mode

Сорбенты	COE, мг/г
Активированный уголь NoritRO	0,88
Аквасорб	0,63
Активированный уголь на основе шунгита (СШ)	0,32

Из полученных данных видно, что самым наибольшим значением COE обладает активированный уголь марки NoritRO, затем последует активированный уголь Аквасорб. Наихудшие результаты по COE показал активированный уголь на основе шунгита: его значение почти в 2,75 раза ниже, чем у сорбента NoritRO, и в несколько раз ниже, чем у Аквасорба.

Далее были исследованы влияние продолжительности процесса сорбции и значения pH на извлечение золота с сорбентами NoritRO, Аквасорб и СШ. Результаты приведены на рис. 1 и 2.

Изучение сорбционной активности сорбентов от продолжительности процесса сорбции показали (рис. 1), что статистическая обменная емкость активированного угля марки NoritRO по сравнению сорбентом марки Аквасорб была выше. Полное насыщение сорбента ионами золота в количестве 99% для сорбента NoritRO достигается за 120 минут, тогда как сорбент Аквасорб за это время адсорбирует всего 85% золота. Активированный уголь на основе шунгита уступает по статической обменной емкости вышеназванным сорбентам почти в 2 раза и за 60 минут сорбционное извлечение золота составило 51%, а за 160 минут всего 52%.

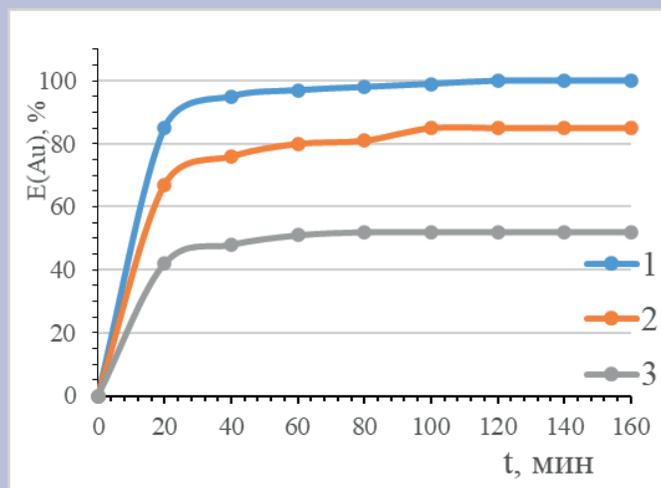


Рис. 1. Кинетические кривые извлечения золота из цианидных растворов различными сорбентами.

Сурет 1. Әр түрлі сорбенттермен цианидті ерітінділерден алтынды бөліп алудың кинетикалық қисықтары.

Figure 1. Kinetic curves of gold extraction from cyanide solutions by various sorbents.

Результаты исследования влияния pH на показатели процесса сорбции сорбентами NoritRO, Аквасорб и СШ показали (рис. 2), что сорбенты NoritRO и Аквасорб хорошо извлекают золото при всех значения pH раствора. Максимальное значение степени извлечения достигается при pH равном 10 и составляют 100 и 85% соответственно. С увеличением pH от 10 до 14 показатели сорбции Аквасорб и NoritRO снижаются и составляют 90 и 70% соответственно. Изменение pH сильно влияет на сорбционные свойства активированного угля на основе шунгита – его сорбционные свойства улучшаются при сильноокислотной области, при pH 2 извлечение золота составило 64%, затем с повышением pH от 2 до 6 показатели сорбции резко падают, т.е. в среде с pH, равном 6, сорбция золота из раствора практически не идет. Дальнейшее повышение pH раствора от 6 до 14 приводит к улучшению сорбционных свойств и степень извлечения золота увеличивается с 0 до 52%.

На основе полученных результатов экспериментов по изучению влияния различных параметров для дальнейших исследований в качестве оптимального сорбента золота был выбран сорбент NoritRO.

Исследования влияния примесей металлов на извлечение золота сорбентами марки NoritRO проводились с использованием раствора вышеприведенного состава. Результаты приведены на таблице 4.

Как показывают результаты, все примеси сорбируются активированным углем из-за его высокой сорбционной емкости. Однако, при увеличении продолжительности сорбции до 2-х суток содержание примесей металлов в сорбенте снижается. Это подтверждает вывод о том, что ионы примесей металлов замещаются ионами золота и извлекаются в раствор [11].

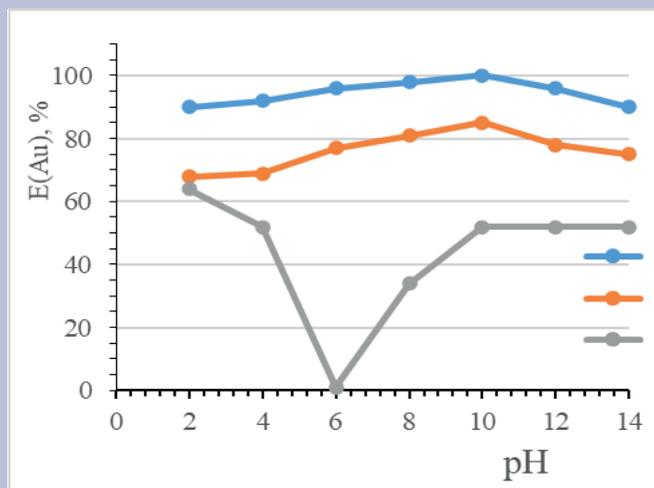


Рис. 2. Влияние pH среды на извлечение золота из цианидных растворов различными сорбентами.

Сурет 2. Әр түрлі сорбенттермен цианид ерітінділерінен алтын алуға қоршаған ортаның pH әсері.

Figure 2. The effect of the pH of the medium on the extraction of gold from cyanide solutions by various sorbents.

Таблица 4

Результаты извлечения металлов сорбентами на основе активированных углей

Кесте 4

Белсендірілген көмір негізіндегі сорбенттермен металдарды бөліп алу нәтижелері

Table 4

Results of metal extraction by sorbents based on activated carbons

Продолжительность сорбции, мин	Извлечение металлов примесей, %				
	Au	Ag	Fe	Cu	Zn
30	75,2	66,1	12,4	9,2	7,5
60	90,3	85,2	14,8	11,4	9,2
90	92,1	88,2	15,6	13,2	10,1
120	96,8	89,3	16,2	15,1	12,1
150	96,7	90,4	18,7	13,2	9,7
180	97,6	91,5	26,3	10,3	5,6
1440	98,7	97,5	14,7	7,4	4,2
2880	99,5	98,6	10,2	5,1	4,0

Далее было изучено влияние числа стадии сорбции на сорбционную способность ионита NoritRO примесей серебра, меди, железа и цинка из цианистого раствора. Результаты приведены ниже на рис. 3-4.

Определение содержания металлов в растворе после каждого этапа сорбции проводилось химическим и атомно-абсорбционным спектрометрическим методами анализа. Результаты экспериментов приведены на рис. 5-6.

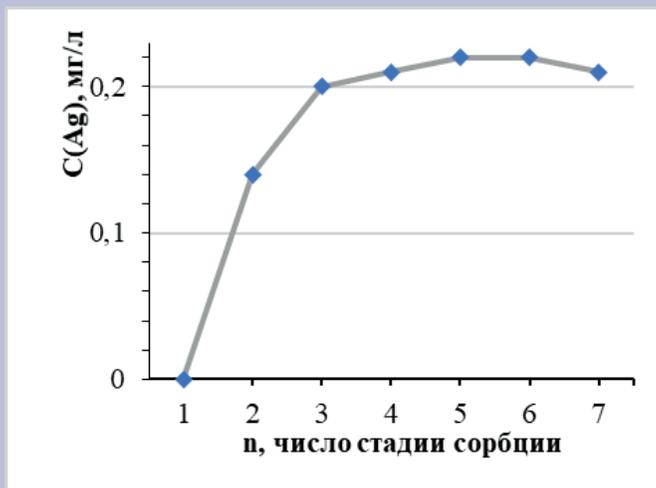


Рис. 3. Зависимость концентрации серебра в растворе от цикла сорбции.

Сурет 3. Ерітіндідегі күміс концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі.

Figure 3. Dependence of the silver concentration in solution on the sorption cycle.

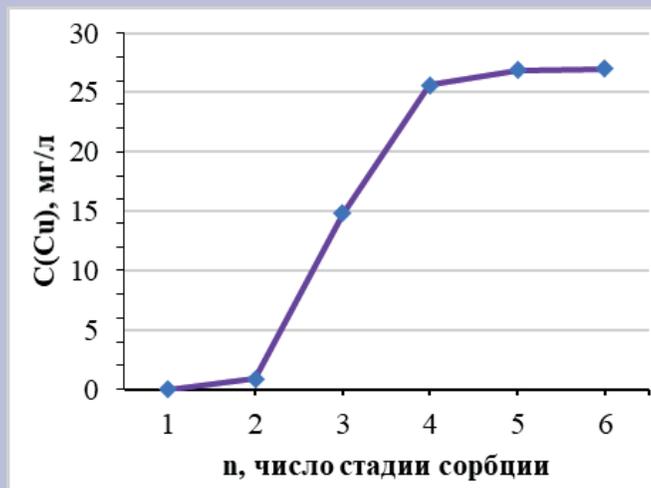


Рис. 4. Зависимость концентрации меди в растворе от цикла сорбции.

Сурет 4. Ерітіндідегі мыс концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі.

Figure 4. Dependence of the copper concentration in solution on the sorption cycle.



Рис. 5. Зависимость концентрации железа в растворе от цикла сорбции.

Сурет 5. Ерітіндідегі темір концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі.

Figure 5. Dependence of the concentration of iron in solution on the sorption cycle.

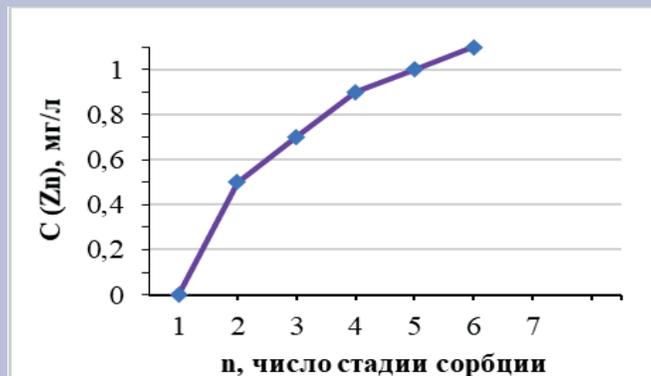


Рис. 6. Зависимость концентрации цинка в растворе от цикла сорбции.

Сурет 6. Ерітіндідегі мырыш концентрациясының сорбция цикліне тәуелділігі.

Figure 6. Dependence of zinc concentration in solution on the sorption cycle.

Как показали результаты наших исследований, выбранный активированный уголь хорошо извлекает наряду с ионами золота ионы примесей металлов – серебра, меди, железа и цинка. В последующие стадии, т.е. начиная со второй стадии сорбции наблюдается вытеснение примесей металлов и замещение ионами золота из структуры активированного угля, что заметно при определении концентрации примесей в растворе. Среди всех ионов примесей плохо вытесняются ионы меди и серебра, что подтверждается выводами приведенных исследований [12]. Но, несмотря на это, использованный в экспериментах активированный уголь показал высокую селективность к золоту и серебру.

Золотосодержащая руда состава (таблица 1) месторождения Акбакай поступает на гравитационное обо-

гащение, где степень обогащения составляет 53-56%. Концентрат далее направляется на цианидное выщелачивание, в результате которого извлекается от 69,42 до 78,33% золота. При цианидном выщелачивании руд месторождения Акбакай получают продуктивный раствор состава, мг/л: золото 500-600 мг/л, железо 80-90 мг/л, медь – 0,40-0,50 мг/л, серебро – 100-150 мг/л. Процесс сорбции проводится с использованием сорбента NoritRO с содержанием твердой фазы 40%, продолжительностью цикла 8 часов.

Цикл процесса сорбции происходит на установке Pumpcell Plant компании Kemix, где любой чан может быть первым или последним. Система питания сорбции спроектирована с расчетом подачи пульпы в любой из чанов сор-

бции. То есть головной чан сорбции отсекается для вывода золотосодержащего угля, и питание сорбции переводится в следующий чан. После вывода золотосодержащего угля с головного чана и перекачки в него обеззолоченного угля после десорбции, данный чан становится хвостовым (последним). В системе Pumpcell межкаскадный грохот, насос для угля и агитатор пульпы встроены в один механизм только с одним первичным приводом. Всего установлено шесть резервуаров Pumpcell, каждый из которых имеет полезный объем 78 м³ и общий объем составляет 468 м³, общее время сорбции или контакта составляет 1,5 часов. Каждый резервуар содержит 2 тонны активированного угля, что составляет одну порцию элюирования. С целью компенсировать сокращенное время контакта с углем, его концентрация в каждом резервуаре увеличивается до 50 г/л. Пульпа, выходящая с установки Pumpcell, характеризуется содержанием золота в растворе не выше 0,02 мг/л, серебра – 0,2-0,3 мг/л, меди – 10-15 мг/л, железа – 50-65 мг/л. Это показывает высокую степень сорбции золота и сорбционной активности сорбента NoritRo.

Насыщенный уголь собирается из резервуаров Pumpcell для дальнейшего элюирования. Из первого резервуара Pumpcell извлекается 2 тонны насыщенного угля, который после сбора будет направлен для дальнейших этапов обработки. Когда насыщенный уголь извлекается, его заменяют восстановленным углем из цикла элюирования или из печи для термической регенерации угля. Хвостовая пульпа процесса под действием силы тяжести стекает на контрольный грохот для угля. Подрешетный продукт гро-

хота откачивается в цикл обезвреживания от цианидов для следующей стадии обработки.

Заключение

Для переработки золота из руд месторождения Акбакай эффективно применять цианидное выщелачивание. Физико-химическими исследованиями установлено, что руда содержит свободное золото и основные золотосодержащие минералы, такие как пирит, арсенопирит, лимониты. Содержание золота и серебра составляют 5,73 и 1,22 г/т соответственно. Содержание мышьяка в руде очень низкое и составляет всего 0,043%. Основными минералами пустой породы в руде являются кремнезем, глинозем, полевой шпат, слюды, хлориты и др.

Сорбционное извлечение золота с различными сорбентами (активированными углями различных марок) показали, что эффективность сорбента падает в следующем порядке NoritRO > Аквасорб > СШ, степень извлечения золота с сорбентов NoritRO составляет 99%. На показатели степени извлечения золота влияет pH среды и продолжительность сорбции. Эксперименты по извлечению золота с активированным углем NoritRO из цианидного раствора, содержащего примеси металлов, такие как серебро, медь, железо, цинк показали, что при сорбции все примеси металлов извлекаются сорбентом, но в последующих циклах они вытесняются цианидным комплексом золота.

При сорбции золота из продуктивных растворов на месторождении Акбакай сорбентом NoritRO степень извлечения составляет 95-96%. Содержание в пульпе после сорбции не превышает 0,02 мг/л.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Beladi H. Цены на золото, культурные факторы и пандемия Covid-19: международный анализ. / H. Beladi, C.T. Trinh, C. Chao. // Исследования в области международного бизнеса и финансов. 2023. Т. 66. Ст. №102051 (на английском языке)
2. Gui Q. / Извлечение золота с использованием альтернатив цианиду: Ультразвуковое упрочнение и его кинетика обучения. / Q. Gui, L. Fu, Y. Hu, H. Di, M. Liang, S. Wang, L. Zhang. // Разработка полезных ископаемых. 2022. Т. 191. Ст. №107939 (на английском языке)
3. Staunton W.P. Углерод в пульпе при переработке золотой руды, под ред. Адамса М., издательство Elsevier: Амстердам, Нидерланды, 2016, С. 515-552 (на английском языке)
4. Sun C. Обзор процесса извлечения золота с использованием нецианидных выщелачивателей: основы, достижения и проблемы, связанные со щелочными серосодержащими выщелачивателями. / C. Sun, X. Zhang, J. Kou, Y. Xing. // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2020. Т. 27. С. 417-431 (на английском языке)
5. Sousa R. Систематический обзор устойчивой добычи золота из необработанных руд с использованием альтернативных реагентов для выщелачивания. / R. Sousa, M.J. Regufe, A. Fiuza, M.M. Leite, A. Futuro. // Добывающая промышленность и общество. 2022. Т. 9. Ст. №101018 (на английском языке)
6. Yefremova S.V. Углеродный сорбент на основе специального мелкодисперсного кокса для извлечения золота, химии твердого топлива. / S.V. Yefremova, A.A. Kablanbekov, K.K. Anarbekov, L.V. Bunchuk, Y.I. Sukharnikov, N.I. Bogdanovich, A.Z. Terlikbaeva, A.A. Zharmenov. // Химия твердого топлива. 2019. Т. 53. С. 208-213 (на английском языке)
7. Fleming S.A. Факторы, влияющие на скорость выщелачивания и адсорбции цианида золота на активированном угле, и их влияние на конструкцию систем CIL и CIP. / S.A. Fleming, A. Mezei, E. Bourricaudy, M. Canizares, M. Ashbury. // Minerals Engineering. 2011. Т. 24 (6). С. 484-494 (на английском языке)
8. Soleimani M. Активированная твердая оболочка абрикосовых косточек: перспективный адсорбент для извлечения золота. / Soleimani M., Kaghazchi T. // Китайский журнал химической инженерии. 2008. Т. 16. С. 112-118 (на английском языке)

9. Jia and Steele C.J. Механизм адсорбции частиц золота и серебра на активированных углях. / Jia and C.J. Steele, I.P. Hayward, K.M. Thomas. // Углерод. 1998. Т. 36. С. 1299-1308 (на английском языке)
10. Van Deventer, Bazhko J., Yahorava V. Сравнение ионообменных смол, селективных по отношению к золоту, и активированного угля для извлечения золота из медных растворов для выщелачивания золота. // Конференция ALTA 2014 по золоту и драгоценным металлам, Мельбурн, Австралия, ALTA Металлургический сервис, 2014. – С. 18 (на английском языке)
11. Dai A. Обзор технологий извлечения цианида меди для цианирования медьсодержащих золотосодержащих руд. / A. Dai, P. Simons, A. Breuer. // Инженерное дело в области добычи полезных ископаемых. 2012. Т. 25. С. 1-13 (на английском языке)
12. Sayiner B. Влияние цианидов серебра, никеля и меди на адсорбцию золота на активированном угле в растворах цианидного выщелачивания. / B. Sayiner, N. Acarkan. // Физико-химические проблемы переработки полезных ископаемых. 2014. Т. 50. С. 277-287 (на английском языке)

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Beladi H. Алтын бағасы, мәдени факторлар және Covid-19 пандемиясы: халықаралық талдау. / H. Beladi, C.T. Trinh, C. Chao. // Халықаралық бизнес және қаржы саласындағы зерттеулер. 2023. Т. 66. Мақ. №102051 (ағылшын тілінде)
2. Gui Q. Пайдалану арқылы алтын алу цианидке балама: ультрадыбыстық қатайту және оның оқу кинетикасы. / Q. Gui, L. Fu, Y. Hu, H. Di, M. Liang, S. Wang, L. Zhang. // Пайдалы қазбаларды игеру. 2022. Т. 191. Мақ. №107939 (ағылшын тілінде)
3. Staunton W.P. Алтын кенін өңдеу кезіндегі пульпадағы көміртегі, ред. Адамс М., Elsevier баспасы: Амстердам, Нидерланды, 2016, Б. 515-552 (ағылшын тілінде)
4. Sun C. Цианидті емес ликсивианттарды қолдану арқылы алтын алу процесін шолу: сілтілі күкірті бар ликсивианттармен байланысты негіздері, жетістіктері және проблемалары. / C. Sun, X. Zhang, J. Kou, Y. Xing. // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2020. Т. 27. Б. 417-431 (ағылшын тілінде)
5. Sousa R. Баламалы сілтілеу реагенттерін қолдана отырып, өңделмеген кендерден тұрақты алтын өндіруге жүйелі шолу. / R. Sousa, M. J. Regufe, A. Fiúza, M.M. Leite, A. Futuro. // Өндіруші өнеркәсіп және қоғам. 2022. Т. 9. Мақ. №101018 (ағылшын тілінде)
6. Yefremova S.V. / Алтын қатты отын алу үшін арнайы ұсақ дисперсті кокс негізіндегі көміртекті сорбент. S.V. Yefremova, A.A. Kablanbekov, K.K. Anarbekov, L.V. Bunchuk, Y.I. Sukharnikov, N.I. Bogdanovich, A.Z. Terlikbaeva, A.A. Zharmenov. // Қатты отынның химиясы. 2019. Т. 53. Б. 208-213 (ағылшын тілінде)
7. Fleming C.A. Белсендірілген көмірдегі алтын цианидінің шаймалау және адсорбция жылдамдығына әсер ететін факторлар және олардың CIL және CIP жүйелерінің дизайнына әсері. / C.A. Fleming, A. Mezei, E. Bourricaudy, M. Canizares, M. Ashbury. // Minerals Engineering. 2011. Т. 24 (6). Б. 484-494 (ағылшын тілінде)
8. Soleimani M. Өрік шұңқырларының белсендірілген қатты қабығы: алтынды алу үшін перспективалы адсорбент. / M. Soleimani, T. Kaghazchi. // Қытайдың химиялық инженерия журналы. // 2008. Б. 16. Б. 112-118 (ағылшын тілінде)
9. Jia and Steele C.J. / Белсендірілген көмірдегі алтын мен күміс бөлшектерін адсорбциялау механизмі. / Jia and C.J. Steele, I.P. Hayward, K.M. Thomas. // Көміртек. 1998. Т. 36. Б. 1299 -1308 (ағылшын тілінде)
10. Van Deventer, Bazhko J., Yahorava V. Алтынға селективті ион алмастырғыш шайырлар мен алтынды шаймалау үшін мыс ерітінділерінен алтын алу үшін белсендірілген көмірді салыстыру. // Алтын және бағалы металдар бойынша 2014 ALTA конференциясы, Мельбурн, Австралия, ALTA металлургиялық қызмет, 2014. – Б. 18 (ағылшын тілінде)
11. Dai A. Құрамында мыс бар алтын кендерін цианидтеу үшін мыс цианидін алу технологияларына шолу. / A. Dai, P. Simons, A. Breuer. // Тау-кен саласындағы инженерия. 2012. Т. 25. Б. 1-13 (ағылшын тілінде)
12. Sayiner B. Күміс, никель және мыс цианидтерінің цианидті шаймалау ерітінділеріндегі белсендірілген көмірдегі алтынның адсорбциясына әсері. / B. Sayiner, N. Acarkan. // Пайдалы қазбаларды өңдеудің физика-химиялық мәселелері. 2014. Т. 50. Б. 277-287 (ағылшын тілінде)

REFERENCES

1. Beladi H. Gold prices, cultural factors, and Covid-19 pandemic: An international analysis. / Beladi H., Trinh C.T., Chao C. // Research in International Business and Finance. 2023. V. 66. Art. №102051 (In English)

2. *Gui Q. Gold extraction using alternatives to cyanide: Ultrasonic reinforcement and its leaching kinetics. / Gui Q., Fu L., Hu Y., Di H., Liang M., Wang S., & Zhang L. // Minerals Engineering. 2022. V. 191. Art. №107939 (In English)*
3. *Staunton W.P. Carbon-in-pulp, In Gold Ore Processing, ed.: Adams, M., Elsevier: Amsterdam, Netherlands, 2016, P. 515-552 (In English)*
4. *Sun C. A review of gold extraction using noncyanide lixivants: Fundamentals, advancements, and challenges toward alkaline sulfur-containing leaching agents. / Sun C., Zhang X., Kou J., Xing Y. // Int. J. Miner. Metall. Mater. 2020. V. 27. P. 417-431 (In English)*
5. *Sousa R. A systematic review of sustainable gold extraction from raw ores using alternative leaching reagents. / Sousa R., Regufe M. J., Fiúza A., Leite M.M., Futuro A. // The Extractive Industries and Society. 2022. V. 9. Art. №101018 (In English)*
6. *Yefremova S.V. / Carbon sorbent based on special fine coke for the extraction of gold. / Yefremova S.V., Kablanbekov A.A., Anarbekov K.K., Bunchuk L.V., Sukharnikov Y. I., Bogdanovich N.I., Terlikbaeva A.Z., Zharmenov A.A. // Solid Fuel Chem. 2019. V. 53. P. 208-213 (In English)*
7. *Fleming C.A. Factors influencing the rate of gold cyanide leaching and adsorption on activated carbon, and their impact on the design of CIL and CIP circuits. / Fleming C.A., Mezei A., Bourricaudy E., Canizares M., Ashbury M. // Minerals Engineering. 2011. V. 24 (6). P. 484-494 (In English)*
8. *Soleimani M. Activated hard Shell of apricot stones: a promising adsorbent in gold recovery. / Soleimani M., Kaghazchi T. // Chinese Journal of Chemical Engineering. 2008. V. 16. P. 112-118 (In English)*
9. *Jia and Steele C.J. Mechanism of adsorption of gold and silver species on activated carbons. / Jia and Steele C.J., Hayward I.P., Thomas K.M. // Carbon. 1998. V. 36. P. 1299-1308 (In English)*
10. *Van Deventer, Bazhko J., Yahorava V. Comparison of Gold-Selective Ion Exchange Resins and Activated Carbon for the Recovery of Gold from Copper Gold Leach Liquors. // ALTA 2014 Gold – precious metals Conference, Melbourne, Australia, ALTA Metallurgical Service, 2014. – P. 18 (In English)*
11. *Dai A. A review of copper cyanide recovery technologies for the cyanidation of copper containing gold ores. / Dai A., Simons P., Breuer A. // Mining Engineering. 2012. V. 25. P. 1-13 (In English)*
12. *Sayiner B. Effect of silver, nickel, and copper cyanides on gold adsorption on activated carbon in cyanide leach solutions. / Sayiner B., Acarkan N. // Physico-chemical problems of mineral processing. 2014. V. 50. P. 277-287 (In English)*

Сведения об авторах:

Нургабыл Н.К., магистрант кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), nazerke.nurgaby1@stud.satbayev.university; <https://orcid.org/0009-0004-2319-7114>

Мамырбаева К.К., доктор Ph.D, ассоциированный профессор кафедры «Металлургические процессы, теплотехника и технология специальных материалов» Satbayev University (г. Алматы, Казахстан), k.mamyrbayeva@satbayev.university; <https://orcid.org/0000-0002-1094-5345>

Авторлар туралы мәліметтер:

Нұргабыл Н.К., Satbayev University «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасының магистранты (Алматы қ., Қазақстан)

Мамырбаева К.К., Ph.D докторы, Satbayev University «Металлургиялық процестер, жылу техникасы және арнайы материалдар технологиясы» кафедрасының қауымдастырылған профессоры (Алматы қ., Қазақстан)

Information about the authors:

Nurgabyl N.K., master's student of the Department «Metallurgical Processes, Heat Engineering and Technology of Special Materials» Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)

Mamyrbayeva K.K., Doctor Ph.D., Associate Professor of the Department of «Metallurgical Processes, Heat Engineering and Technology of Special Materials» Satbayev University (Almaty, Kazakhstan)