

EVALUATION OF GOLD AND COPPER DISTRIBUTION IN TECHNOLOGICAL PRODUCTS OF PORPHYRY COPPER ORE BENEFICIATION

Nikolay Nestorov, Mihail Petrov, Teodora Yankova, Irena Grigorova

University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: n.nestorov@mgu.bg

ABSTRACT. This paper presents the results of a comprehensive study on the content and distribution of copper and gold in technological products obtained from porphyry copper ores processing. Four consecutive sampling campaigns were carried out at ten sampling points within the regrinding and cleaner flotation circuits. Chemical characterisation of the samples was performed using ICP-AES, atomic absorption spectrometry, and fire assay, while particle size distribution was determined by sieve and sedimentation analysis. The results showed that copper and gold follow a common beneficiation trend, with the highest contents recorded in the froth products of the seventh cleaner flotation bank, averaging 24.03% Cu and 9.14 g/t Au. Comparison of the contents in products P1 and P9 showed that the gold content increased approximately 20-fold, whereas the corresponding increase for copper was about 17-fold. Gold also exhibited greater variability among the individual sampling campaigns. Size analysis revealed a higher relative proportion of gold in the <45 µm fraction. The results confirm the need for multiple sampling campaigns in order to achieve a reliable evaluation of gold distribution in the technological products.

Key words: porphyry copper ores, gold, copper, sampling, technological products.

ОЦЕНКА НА РАЗПРЕДЕЛЕНИЕТО НА ЗЛАТОТО И МЕДТА В ТЕХНОЛОГИЧНИ ПРОДУКТИ ОТ ОБОГАТЯВАНЕ НА МЕДНОПОРФИРНИ РУДИ

Николай Несторов, Михаил Петров, Теодора Янкова, Ирена Григорова
Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

РЕЗЮМЕ. Настоящата работа представя резултатите от комплексно изследване на съдържанието и разпределението на медта и златото в технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди. Проведени са четири последователни серии на опробване на десет точки от цикъла на досмилане и пречистна флотация. За химичното характеризиране на пробите са използвани ICP-AES, атомно-абсорбционна спектрометрия и тегловен пробирен анализ, а за определяне на разпределението по зърнометрични класи – ситов и седиментационен анализ. Установено е, че медта и златото следват обща тенденция на обогатяване, като най-високи съдържания са регистрирани в пенните продукти от 7^{-та} ред на пречистната флотация (средно 24,03% Cu и 9,14 g/t Au). Сравнението между съдържанията в продуктите П1 и П9 показва, че съдържанието на Au нараства приблизително 20 пъти, докато при Cu това съотношение е около 17. При златото е установена и по-голяма променливост на съдържанията в отделните серии на опробване. Зърнометричният анализ показва по-висок относителен дял на златото в класа <45 µm. Получените резултати потвърждават необходимостта от многократни серии на опробване за надеждна оценка на разпределението на златото в технологичните продукти.

Ключови думи: меднопорфирни руди, злато, мед, опробване, технологични продукти.

Въведение

При обогатяването на меднопорфирни руди все по-голямо значение придобива не само извличането на основния полезен компонент – медта, но и оценката на съпътстващите ценни компоненти, включително благородните метали (Aird et al., 2021; Agorhom et al., 2013). Порфирните находища представляват важен източник на мед, като тяхната икономическа стойност може съществено да нарасне при наличие на технологично извлекателно количество злато и сребро (Aird et al., 2021). Разпределението на благородните метали в такива системи е тясно свързано със сулфидните минерални асоциации, типа на минерализацията и характера на хидротермалните изменения (Aird et al., 2021).

Флотационното поведение на златото при обогатяване на меднопорфирни руди не е еднозначно и зависи от конкретните минераложки особености на рудата и от условията на преработка. Bulatovic (1997) отбелязва променливия състав на медно-златните порфирни руди и необходимостта от избор на подходящи технологични решения в зависимост от характеристиките на конкретния тип руди. Allan и Woodcock (2001) посочват, че самородното злато и електрумът са най-често срещаните форми на златото в рудите, като тяхното извличане чрез флотация зависи съществено от физичното състояние на златните частици – размер, форма, състав и наличие на срастъци.

Наред с минераложките особености, решаващо значение за надеждната технологична оценка има представителното опробване. Dominy и колектив (2018) подчертават, че програмите за опробване при определяне на извличането на златото трябва да бъдат представителни и целесъобразно разработени, като се прилага критична оценка на методите за вземане и подготовка на проби.

Lyman (2023) допълнително подчертава тази необходимост, като разглежда опробването на минерални технологични потоци като статистически процес, с множество източници на неопределеност – вариация на съдържанието във времето, различия в едрината и съдържанието на частиците, и такава свързана със самото опробване.

В по-широк геометалургичен контекст, в допълнение към класическите методи за опробване и лабораторен анализ, съвременните геофизични методи също могат да допринесат за по-пълното характеризиране на рудите, подлежащи на преработка. Както отбелязва Томова и колектив (2025), електротомографията и други геофизични техники предоставят информация за пространствената изменчивост и вътрешната структура на минералните суровини, като по този начин допринасят за по-надеждна интерпретация на техните свойства. В този смисъл геометалургичният подход съчетава данни от различен характер с цел по-надеждна оценка на поведението на суровината при обогатяване и по-добро обосноваване на технологичните решения.

Blannin и колектив (2021) демонстрират, че дори при съвременните методи за количествен минералогичен анализ (автоматизирана SEM-базирана минералогия) отчитането на статистическата неопределеност в практиката е рядко, и показват на примера на Au–Cu порфирно находище как недостатъчната представителност на извадката влияе върху количествените минералогични резултати.

Предвид изложеното, изследването на разпределението на златото и медта в продуктите от досмилане и пречистна флотация има значение както за текущия технологичен контрол, така и за обосноваване на връзката между минералогичните характеристики, представителността на опробването и реалното технологично поведение на ценните компоненти, налични в медно-златните порфирни руди.

В настоящата разработка са представени резултатите от комплексно изследване на технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди, с цел да се оцени разпределението на златото и медта в ключови възли на схемата на досмилане и пречистна флотация, въз основа на четири последователни серии на опробване и химичен анализ на десет контролни точки.

Материали и методика

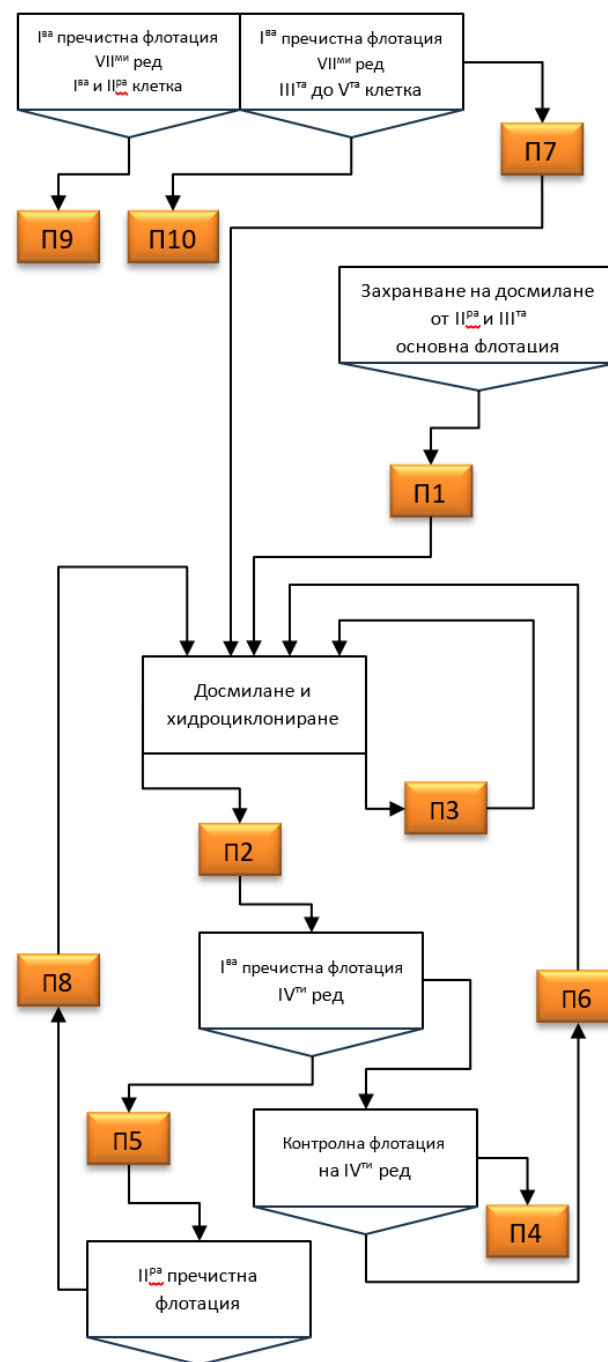
Изследванията са проведени върху технологични продукти от обогатителна фабрика, преработваща меднопорфирни руди. Опробвани са десет точки, обхващащи цикъла на досмилане и пречистна флотация: захранване на мелницата за досмилане (П1), слив (П2) и пясъци (П3) на хидроциклона от цикъла на досмилане, отпадък от 4-ти ред на пречистна флотация (П4), пенен продукт от 1-ва пречистка на 4-ти ред (П5), пенен продукт от контролна флотация на 4-ти ред (П6), камерен продукт от 7-ми ред на пречистна флотация (П7), камерен продукт от 2-ра пречистка (П8), пенен продукт от 1-ва и 2-ра клетка на 7-ми ред (П9) и пенен продукт от 3-та до 5-та клетка на 7-ми ред (П10).

Схема на проведените опробвания е показана на фиг. 1. Проведени са четири последователни серии на опробване в рамките на една работна смяна през четири последователни месеца - на 9 май, 5 юни, 19 юли и 8 август. За ръчното опробване са използвани пробовземачи от неръждаема стомана с дължина на отсекаателя 120 mm, ширина 8 mm и обем 0,5 l. За опробването на точки П9 и П10 е използвана сонда с дължина 2 m и обем 0,5 l, осигуряваща пробовземане от долния слой на флотационните клетки. За всяка точка е използван отделен прибор с цел предотвратяване на замърсяване на пробите.

Пробоподготовката включва обезводняване на пулповите проби чрез филтруване под налягане до получаване на кек, изсушаване в лабораторен сушилен шкаф при $105 \pm 5^\circ\text{C}$ до постоянна маса, хомогенизиране и съкращаване чрез ротационен делител, както и зърнометрична подготовка в рингова мелница с хавани от манганова стомана или в планетарна топкова мелница с ахатови хавани, в зависимост от вида на последващия анализ.

Химичните анализи са извършени по три аналитични метода. Съдържанията на 35 елемента са определени чрез ICP-AES в разтвор, получен след разлагане на пробата с царска вода. Съдържанието на злато в интервала 0,01-3 g/t

е определено чрез атомно-абсорбционна спектрометрия (AAS) след предварителна екстракция с органичен разтворител, а при съдържания над 3 g/t - чрез тегловен пробирен анализ с навеска 30 g, стапяне с флюс при 1100°C и купелуване при 950°C . Съдържанията на сребро и мед във всички проби са определени чрез AAS.



Фиг. 1. Схема на проведените опробвания на технологичните продукти

Зърнометричната характеристика на продуктите е определена чрез ситов и седиментационен анализ съгласно БДС 15443-82 и БДС ISO 2591-1:1997. Обособени са класите $>125\ \mu\text{m}$, $125-75\ \mu\text{m}$, $75-45\ \mu\text{m}$ и $<45\ \mu\text{m}$. За всяка зърнометрична класа са определени съдържанията на Cu, Au и Ag, въз основа на които са изчислени разпределенията на тези компоненти по класи.

Резултати и дискусия

Съдържание на медта в технологичните продукти

Данните за съдържанието на мед (Cu) в технологичните продукти при четирите серии на опробване са представени в Таблица 1. В захранването на мелницата за досмилане (П1) и в слива на хидроциклона (П2) са установени близки средни съдържания - съответно 1,43% и 1,36%, докато в пясъците на хидроциклона (П3) съдържанието е по-високо (2,63%), което показва концентриране на медсъдържащата минерализация в по-едрия продукт.

Таблица 1. Съдържание на Cu (%) в технологичните продукти при четирите серии на опробване

Продукт	Опробване				Средно	Min –Max
	1	2	3	4		
	09.05	05.06	19.07	08.08		
П1	1,095	1,630	1,665	1,340	1,43	1,095-1,665
П2	1,230	1,500	1,551	1,170	1,36	1,170-1,551
П3	1,598	3,100	3,500	2,340	2,63	1,598-3,500
П4	0,033	0,088	0,056	0,030	0,05	0,030-0,088
П5	6,230	9,540	10,46	12,760	9,75	6,230-12,760
П6	0,389	0,584	1,230	0,632	0,71	0,389-1,230
П7	0,478	0,770	0,133	0,163	0,39	0,133-0,770
П8	0,460	0,479	1,930	0,451	0,83	0,451-1,930
П9	24,920	23,060	23,84	24,300	24,03	23,060-24,920
П10	19,920	13,360	16,95	21,080	17,83	13,360-21,080

В отпадъка от 4-ти ред на пречистната флотация (П4) съдържанието на Cu е устойчиво ниско (средно 0,05%), докато в пенните продукти то нараства значително. Най-високи стойности са отчетени в П9 и П10 - съответно 24,03% и 17,83%, като П9 се отличава с по-висока стабилност между отделните опробвания. Получените резултати показват ясно изразено обогатяване на медта в пенните продукти и ефективно обедняване на отпадъка.

Междинните продукти от пречистната флотация (П6, П7 и П8) се характеризират с по-ниски съдържания на Cu в сравнение с крайните пенни продукти. При третото опробване се наблюдава повишение на съдържанието, най-ясно изразено при П8, където Cu достига 1,930%, което може да се свърже с временни колебания в технологичния режим или с промяна в характеристиките на захранването.

Съдържание на златото в технологичните продукти

Данните за съдържанието на злато (Au) в технологичните продукти при четирите серии на опробване са показани в Таблица 2. В захранването на мелницата за досмилане (П1) и в слива на хидроциклона (П2) са констатирани близки средни съдържания на злато - съответно 0,45 и 0,51 g/t. По-високо съдържание е отчетено в пясъците на хидроциклона (П3) - средно 1,29 g/t, което показва концентриране на златосъдържащата минерализация в по-едрия продукт на класификацията.

Таблица 2. Съдържание на Au (g/t) в технологичните продукти при четирите серии на опробване

Продукт	Опробване				Средно	Min–Max
	1	2	3	4		
	09.05	05.06	19.07	08.08		
П1	0,374	0,664	0,414	0,337	0,45	0,337–0,664
П2	0,603	0,614	0,490	0,316	0,51	0,316–0,614
П3	1,140	1,900	1,050	1,050	1,29	1,050–1,900
П4	0,069	0,082	0,080	0,056	0,07	0,056–0,082
П5	2,690	3,880	2,580	2,720	2,97	2,580–3,880
П6	0,520	0,562	1,150	0,637	0,72	0,520–1,150
П7	0,418	0,559	0,182	0,261	0,36	0,182–0,559
П8	0,516	0,293	0,846	0,426	0,52	0,293–0,846
П9	8,420	12,450	7,400	8,300	9,14	7,400–12,450
П10	7,400	6,000	6,300	8,900	7,15	6,000–8,900

В отпадъка от 4-ти ред на пречистната флотация (П4) съдържанието на Au остава ниско - средно 0,07 g/t.

Най-високи стойности са установени в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация - средно 9,14 g/t за П9 и 7,15 g/t за П10. В сравнение с медта, при златото се наблюдават по-изразени вариации на съдържанията в отделните серии на опробване, особено в П9, което показва по-голяма променливост на този компонент в технологичните продукти.

Подобно на Cu, при междинните продукти П6, П7 и П8 се наблюдават сравнително ниски съдържания на Au, но при третото опробване е отчетено едновременно повишение и в трите продукта. Това може да се дължи на временни изменения в технологичния режим, на различия в минераложките характеристики на постъпващия материал или с комбинираното влияние на няколко фактора.

Съдържание на сребро в технологичните продукти

Данните за съдържанието на сребро (Ag) в технологичните продукти са обобщени в Таблица 3. При значителна част от продуктите (П2, П3, П4, П6, П7 и П8) в отделни серии на опробване са отчетени стойности под границата на определяне (<1 g/t), което ограничава възможността за надеждна количествена оценка.

Най-високи съдържания на сребро са установени в пенните продукти от 7-ми ред - средно 31,65 g/t за П9 и 24,18 g/t за П10. В пенния продукт от 1-ва пречистка на 4-ти ред (П5) средното съдържание е 12,67 g/t. Тази тенденция съответства на наблюдаваното обогатяване на Cu и Au в същите продукти. Характерно е, че при П10 изменчивостта на съдържанието на Ag между опробванията е по-ниска (21,80–26,60 g/t) в сравнение с П9 (25,00–41,80 g/t), което е в съответствие с установената по-висока изменчивост на Au в П9. Наличието на стойности под границата на определяне в междинните и отпадъчните продукти показва, че сребро, подобно на златото, се концентрира предимно в крайните пенни продукти на пречистната флотация.

Таблица 3. Съдържание на Ag (g/t) в технологичните продукти при четирите серии на опробване

Продукт	Опробване				Средно	Min–Max
	1	2	3	4		
	9.05	05.06	19.07	08.08		
П1	2,23	5,50	1,60	1,00	2,58	1,00–5,50
П2	2,20	14,70	1,70	<1	–*	–*
П3	<1	5,20	2,40	<1	–*	–*
П4	<1	2,20	<1	<1	–*	—*
П5	8,08	17,40	13,50	11,70	12,67	8,08–17,40
П6	2,93	3,50	<1	<1	–*	–*
П7	2,20	2,80	<1	<1	–*	–*
П8	3,90	2,80	7,20	<1	–*	–*
П9	34,80	41,80	25,00	25,00	31,65	25,00–41,80
П10	26,60	21,80	23,20	25,10	24,18	21,80–26,60

* Средните стойности и интервалите не са изчислени поради наличие на стойности под границата на определяне (<1 g/t).

Разпределение на Си и Ау по зърнометрични класи

Данните за разпределението на Си и Ау по зърнометрични класи в ключовите технологични продукти са изложени в Таблица 4.

Таблица 4. Разпределение на Си и Ау по зърнометрични класи в ключови технологични продукти (средни стойности)

Продукт	Класа, μm	Добив, %	Разпределение на Си, %	Разпределение на Ау, %
ПЗ (1 серия)	>125	59,0	32,2	51,1
	125-75	26,7	42,1	25,6
	75-45	5,8	18,2	12,1
	<45	8,6	7,5	11,1
П5 (средно, 4 серии)	>125	5,3	4,7	4,7
	125-75	18,2	18,7	18,4
	75-45	12,2	13,7	15,3
	<45	64,3	62,9	61,6
П9 (средно, 3 серии)	>125	19,9	17,2	14,2
	125-75	26,3	28,3	23,7
	75-45	16,1	17,7	15,7
	<45	37,6	36,8	46,4
П10 (средно, 4 серии)	>125	7,5	6,6	6,1
	125-75	22,3	22,8	17,9
	75-45	16,2	18,2	12,8
	<45	54,0	52,4	63,1

В пясъците на хидроциклона (ПЗ) златото е концентрирано предимно в класа >125 μm , в който са съсредоточени 51,1% от общото му количество, като този клас представлява 59,0% от масата на продукта.

Медта, за разлика от златото, е концентрирана предимно в класа 125-75 μm , в който се съдържат 42,1% от общото количество Си, като този клас представлява 26,7% от масата на продукта. Това различие в разпределението на двата компонента по класи предполага различия в едрината и/или в разкриването на златоносните и медсъдържащите минерални фази в продукта на класификацията.

В пенните продукти П5, П9 и П10 преобладаващата част както от медта, така и от златото е съсредоточена в най-фината класа <45 μm . При П5 в тази класа са концентрирани 62,9% от Си и 61,6% от Ау, при П9 – 36,8% от Си и 46,4% от Ау, а при П10 – 52,4% от Си и 63,1% от Ау. Характерно е, че при П9 и П10 делът на златото в най-фината класа е по-висок от дела на медта, което показва по-изразено концентриране на златото във фините фракции. Тази тенденция може да се свърже с по-финото присъствие на част от златото и с особеностите на неговото разкриване в изследваните продукти.

Сравнение между съдържанията на Си, Ау и Ag в технологичните продукти

Съпоставката на данните от Таблица 1, 2 и 3 показва, че медта, златото и среброто следват обща тенденция на обогатяване по технологичната верига. И при трите компонента най-високи съдържания са установени в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация (П9 и П10), докато в отпадъка от 4-ти ред (П4) стойностите са най-ниски или, при Ag, в отделни случаи са под границата на определяне. Това потвърждава, че крайните пенни продукти представляват основната зона на концентриране на ценните компоненти в разглежданата схема.

При Си и Ау се наблюдава ясно изразено нарастване на съдържанията от захранването към крайните пенни продукти. Сравнението между П1 и П9 показва, че съдържанието на Ау в П9 е приблизително 20 пъти по-високо от това в П1, докато при Си това съотношение е около 17, което показва по-интензивно концентриране на златото в крайния пенен продукт.

При Ag също са установени най-високи средни съдържания в П9 и П10, съответно 31,65 и 24,18 g/t, което съответства на установената обща тенденция на обогатяване. Съществена разлика между компонентите се наблюдава по отношение на тяхната изменчивост между отделните серии на опробване. При медта съдържанията в крайните пенни продукти са сравнително устойчиви, докато при златото и среброто се наблюдават по-широки колебания, най-изразени при П9. Това показва, че поведението на благородните метали в технологичните продукти е по-променливо и следва да бъде проследявано с повишено внимание. Наблюдаваната повишена изменчивост на съдържанията на благородните метали може да бъде свързана и с хетерогенния характер на рудния материал и пространствените вариации в неговите физико-механични свойства. Подобни зависимости са установени и от Grigorova (2020), която показва, че различията в литоложкия състав и свързаните с тях физични характеристики, идентифицирани чрез електротомография, водят до съществена пространствена променливост на параметрите, оказващи влияние върху последващите технологични процеси.

Данните за зърнометричното разпределение допълнително показват, че в крайните пенни продукти

златото е представено с по-висок относителен дял в най-фината класа <45 μm в сравнение с медта. Това може да се свърже с особеностите на присъствието и разкриването на златото в изследваните продукти и да обясни по-високата променливост на неговото съдържание.

Като цяло получените резултати показват, че макар Cu, Au и Ag да следват обща закономерност на концентриране, благородните метали се характеризират с по-голяма изменчивост и изискват по-внимателен технологичен контрол.

Заклучение

Проведените изследвания показват закономерно концентриране на медта, златото и среброто по технологичната верига, като най-високи съдържания и на трите компонента са установени в пенните продукти от 7-ми ред на пречистната флотация. Най-ясно изразено е обогатяването в продукт П9, в който са отчетени най-високите средни съдържания на Cu, Au и Ag.

Сравнението между захранването на мелницата за досмилане (П1) и пенния продукт от 1-ва и 2-ра клетка на 7-ми ред (П9) показва, че съдържанието на Au нараства приблизително 20 пъти, докато при Cu това съотношение е около 17. Това показва по-интензивно концентриране на златото в крайния пенен продукт в сравнение с медта.

При златото и среброто е установена по-голяма изменчивост в отделните серии на опробване, в сравнение с медта, което налага повишено внимание при технологичния контрол на благородните метали. В междинните и отпадъчните продукти при среброто, в редица случаи са отчетени стойности под границата на определяне, което допълнително затруднява количествената оценка на неговото разпределение.

Данните за зърнометричното разпределение показват по-висок относителен дял на златото в класа <45 μm в крайните пенни продукти, което може да се свърже с особеностите на неговото присъствие и разкриване. Получените резултати потвърждават необходимостта от многократни серии на опробване за получаване на представителна информация, особено при оценка на съдържанията на златото и среброто в технологичните продукти.

Провеждането на подобни изследвания има съществено значение за практиката на обогатяването на меднопорфирни руди, тъй като осигурява надеждна основа за оценка на разпределението на основните и съпътстващите ценни компоненти в отделните технологични потоци.

Чрез съчетаване на представително опробване, химичен анализ и зърнометрична характеристика се създават условия за по-точен технологичен контрол, за идентифициране на възможни загуби на ценни компоненти и за обосноваване на мерки за оптимизиране на процеса. Това е особено важно при благородните метали, при които дори относително малки колебания в разпределението

могат да имат съществено технологично и икономическо значение.

Благодарности. Статията е в изпълнение на Проект BG05SFPR001-3.004-0002-C01 „Развитие и усъвършенстване на професионалното и интердисциплинарно образование в техническите и икономически науки и повишаване на научноизследователския капацитет на добивната промишленост чрез проектна докторантура“, финансиран от програма „Образование“, съфинансирана от Европейския съюз.

Литература

- Agorhom, E., Skinner, W., Zanin, M. (2013) Influence of gold mineralogy on its flotation recovery in a porphyry copper-gold ore, *Chemical Engineering Science*, 99, 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2013.05.037>
- Aird, H., Purcell, C., DeWitt, N., Matthews, J., Capurro, T., Claiborne, J., Bermudez, J., Meisel, Z. (2021). Gold-and silver-bearing assemblages in the Ann-Mason copper porphyry deposit, Yerington, Nevada, *Ore Geology Reviews*, 138, Article № 104339. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104339>
- Allan, G.C., Woodcock J.T. (2001). A review of the flotation of native gold and electrum, *Minerals Engineering*, 14(9), 931-962. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(01\)00103-0](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(01)00103-0)
- Bulatovic, S.M. (1997). Flotation behaviour of gold during processing of porphyry copper-gold ores and refractory gold-bearing sulphides, *Minerals Engineering*, 10(9), 895-908. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(97\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(97)00072-1)
- Blannin, R., Frenzel, M., Tuşa, L., Birtel, S., Ivăşcanu, P., Tim Baker, T., Gutzmer, J. (2021). Uncertainties in quantitative mineralogical studies using scanning electron microscope-based image analysis, *Minerals Engineering*, 167, Article № 106836. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.106836>
- Dominy, S., O'Connor, L., Glass, H., Purevgerel S., Xie, Y. (2018). Towards Representative Metallurgical Sampling and Gold Recovery Testwork Programmes, *Minerals*, 8(5), 193. <https://doi.org/10.3390/min8050193>
- Grigorova, M., Geophysical and mining technologies for increasing efficiency in Han Krum open pit mine, Bulgaria. Proc., 20(1.2) - XXth International Multidisciplinary Scientific GeoConference, 2020, Albena, Bulgaria (111-118).
- Lyman, G., (2023). Sampling Theory for Mineral Process Flows, *Minerals*, 13(7), 922. <https://doi.org/10.3390/min13070922>
- Tomova, M., Kisyov, A., Tsankov, C. (2025). Geophysical monitoring of Chelopech tailings storage facility conditions using electrical resistivity tomography. *Review of the Bulgarian Geological Society*, 86(3), 147–150. <https://doi.org/10.52215/rev.bgs.2025.86.3.147>
- БДС 15443:1982: Руди и концентрати на цветни метали. Ситов и седиментационен метод за определяне на зърнометричния състав.
- БДС ISO 2591-1:1997: Ситов анализ. Част 1: Методи, използващи лабораторни сита от метална телена тъкан и перфорирана метална плоча.