

щью результатов этой работы. При этом можно использовать и методы, основанные на полученных результатах.

Библиографический список

1. Казаченко, Г.В. Кинематика увода гусеничного хода вследствие неравенства сил трения между гусеницами и несущим основанием. / Г.В. Казаченко. – Мн. : Горная механика и машиностроение, 2018. – С.
2. Опейко, Ф.А. Колесный и гусеничный ход. / Ф.А. Опейко. – Мн. : Изд-во Академии сельскохозяйств. наук БССР, 1960. – 228 с.
3. Давыдик, И.И. Исследование поворота гусеничного хода. – Дисс. ... канд. техн. наук. – Мн : 1970. – 211 с.
4. Казаченко, Г.В. Опорно-ходовые устройства горных машин. / Г.В. Казаченко, Г.А. Басалай, Е.В. Щерба : под общ. ред. В.Я. Прушака. – Мн. : Энергопринт, 2016. – 207 с.

УДК 622.014.2: 550.835.41

МОНИТОРИНГ СОДЕРЖАНИЙ СЕРЕБРА ПО СТЕНКАМ ЗАБОЕВ НА ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКАХ ТОО «КОРПОРАЦИЯ КАЗАХМЫС»

**Кан А.Н.¹, Сериков А.Е.¹, Ефименко С.А.¹, Ли Е.С.²,
Исатаева Ф.М.²**

¹ ТОО «Корпорация Казахмыс», Жезказган, Казахстан,

² Карагандинский государственный технический университет
г. Караганда, Казахстан,

Статья посвящена аппаратному обеспечению системы online управления попутной добычей серебра на шахтах ТОО «Корпорация Казахмыс». Базовый метод исследований – рентгенофлуоресцентный. Аппаратура - EDXRF спектрометр РПП-12Т с блоком обработки в виде смартфона. Объекты исследований – забои высотой до 8м; руда в навале отбитой горной массы; порошковые пробы руд. Месторождения – Жезказган и Жаман-Айбат. Обеспечено уверенное определение низких (1+ ррт) содержаний серебра.

ТОО «Корпорация Казахмыс», являясь флагманом цветной металлургии Казахстана по производству меди, входит также в число крупнейших производителей серебра в мире (275 т рафинированного серебра в 2015 году). В рудах всех медьсодержащих полиметаллических месторождений, разрабатываемых

ТОО «Корпорация Казахмыс», серебро является одним из основных сопутствующих рудных компонентов. Однако, содержания серебра в рудах большинства разрабатываемых месторождений не велики: на крупнейшем Жезказганском месторождении в среднем 15–18 ppm, а на месторождении Нурказган – всего 3 ppm.

В связи с тем, что роль серебра в экономике ТОО «Корпорация Казахмыс» постоянно растет, то ранг актуальнейшей приобрела задача организации online мониторинга содержаний серебра в действующих забоях, а также в забоях, подготавливаемых к добычным работам, на шахтах и карьерах Горно-обогатительного комплекса (ГОК) ТОО «Корпорация Казахмыс».

Дополнительную актуальность online мониторингу содержаний серебра придает то обстоятельство, что на стратиформном месторождении медистых песчаников Жезказган установлены линейная, обратная, концентрическая и вертикальная минералогические зональности распределения, как в плане отдельных горизонтов и в разрезе всей рудоносной толщи, так и отдельно взятых залежей, характерные не только для минералов меди, но и для минералов остальных основных и сопутствующих рудных компонентов, включая и серебро. Из-за наличия упомянутых минералогических зональностей очень сложно организовать (без данных online мониторинга) эффективное планирование добычи серебра. В частности, обыденными стали случаи, когда добычной забой выходит за контур балансовых медных руд и выводится из добычи, а затем результаты рентгенофлуоресцентного анализа пунктирно-бороздовых проб, отобранных с данного забоя, показывают, что содержание серебра в забое превышает (порой, намного) среднее содержание серебра по рудной залежи, горизонту, рудному полю шахты. То есть, данный забой экономически было бы целесообразно оставить в добыче, постоянно контролируя содержания серебра в нем. Но для реализации такой технологии необходимо иметь эффективный инструмент online мониторинга содержаний серебра. Создание и широкая производственная апробация такого инструмента и явились целью наших исследований.

Задача online мониторинга содержаний меди, свинца и цинка по стенкам горных выработок, в отбитой горной массе, по шламу эксплуатационно-разведочных скважин шахт и карьеров в ГОК давно решена. Для этого сейчас используются энергодисперсионные рентгенофлуоресцентные (EDXRF) носимые спектрометры

РПП–12 (4 элемента: Cu, Pb, Zn, Fe) и РПП–12РИ (12 элементов: Cu, Zn, Pb, Fe, Ba, K, Ca, Ti, Mn, Ni, As, Sr). В обеих модификациях спектрометров в качестве источника возбуждения рентгеновских флуоресценций элементов используются радиоактивные источники закрытого типа плутоний–238. В РПП–12 используется пропорциональный детектор излучений, в РПП–12РИ – высокоскоростной кремниевый дрейфовый детектор (SDD) [1–4].

Для решения задачи online мониторинга содержаний серебра спектрометры РПП–12 и РПП–12РИ не подходят, так как радионуклид плутоний–238 способен возбудить рентгеновские флуоресценции линий К–серий элементов только до ниобия ($Z=41$), а серебро имеет $Z=47$. В спектрометре РПП–12РИ можно использовать радионуклид америций–241, но его основная линия (60 кэВ) слишком далека от К–края поглощения серебра (25,5 кэВ) и требуемой чувствительности измерений по серебру невозможно будет обеспечить. Единственный выход – использование рентгеновских трубок в качестве источника первичного возбуждающего излучения.

Определение содержаний серебра, начиная от 1+ ppm (с учетом руд бедных серебром месторождений) рентгенофлуоресцентным методом – это чрезвычайно сложная научная и производственная задача. На Жезказганском месторождении эта задача осложнена тем, что из–за горизонтального и пологого залегания рудных залежей забой необходимо опробовать вертикальными сечениями высотой до 8 м. Мировой парк носимых EDXRF спектрометров не предлагает ничего (кроме спектрометров ТОО «Аспап Гео»), способного эффективно и безопасно работать на таких высоких объектах.

ТОО «Аспап Гео» (Алма–Ата), – основной поставщик EDXRF спектрометров для корпорации, – разработало по нашему техническому заданию носимый EDXRF спектрометр РПП–12Т, позволяющий проводить мониторинг руд на серебро в навале отбитой горной массы, керне скважин и по стенкам подземных горных выработок (при крутом падении рудных тел) (см. рис. 1А.) Спектрометр оснащен опцией «РФА порошковых проб».

Для обеспечения возможности проведения исследований в условиях высоких забоев шахт Жезказганской производственной площадки базовый вариант спектрометра РПП–12Т был серьезно модернизирован (рис. 1Б): изменена конструкция датчика прибора с целью повышения защиты тонких бериллиевых окон SDD детектора и рентгеновской трубки от воздействия не-

ровной поверхности руды; добавлены: защитное кольцо; ножки-держатели кольца; узел крепления штанг к датчику, комплект из 2 – 3 метровых штанг (позволяет опробовать забои высотой до 4 – 5 м; на более высокие забои надо заказывать дополнительные штанги).



А. РПП–12Т (базовый)

Б. РПП–12Т (шахтный)

Рис. 1 – Варианты EDXRF спектрометра РПП–12Т

РПП–12Т обеспечивает проведение опробования забоев на 34 элемента: Cu, Zn, Pb, Ag, Cd, As, Se, Ba, Fe, Mo, Mn, Ti, V, Cr, Co, K, Ca, Ni, Ga, Br, Rb, Sr, Zr, Y, In, Pd, Nb, Sn, Sb, Te, Bi, W, Th, U. При этом, площадь обзора поверхности объекта опробования составляет 4 – 5 см²; экспозиция измерения в одной точке наблюдения – от 5 с; пределы обнаружения для большинства рудных элементов находятся в диапазоне от $n \cdot 10^{-4} \%$ до $n \cdot 10^{-3} \%$.

У РПП–12Т есть ещё одно важное преимущество: устройством регистрации и обработки является обычный смартфон последнего поколения с операционной системой Android и ударопрочным корпусом. Эта новация обеспечивает высокое быстродействие, гибкость программного обеспечения, возможность голосового управления прибором, а также дополнительные возможности документирования результатов опробования (фотографирование забоя, определение координат, оперативную передачу данных при наличии сети).

У конкурентов используются портативные (карманные) персональные компьютеры, гораздо более громоздкие и менее производительные (сравните: цифровой процессор 533 МГц в спектрометре NITON XL3t GOLDD и четырехъядерный процессор смартфона Samsung Galaxy S5 с тактовой частотой 2,5 ГГц – цифры несопоставимые). Датчик и устройство регистрации и обработки не связаны кабелем (используется bluetooth), чем значительно повышена безопасность процесса опробования забоя – оба оператора независимы друг от друга в передвижении, а оператор на смартфоне всегда находится не у забоя, а под защитой охранного целика.

В РПП–12Т применено мощное программное обеспечение, позволяющее: а) использовать фундаментальные алгоритмы для учёта матричных эффектов (в том числе и для рассеянного излучения), учитывающие изменение геометрических условий измерений при вариациях вещественного состава и плотности анализируемых руд; б) точно определять функцию отклика каждого детектора, а также спектральный состав возбуждающего излучения; в) очищать спектр от двойных и тройных наложений; г) восстанавливать спектр вторичного излучения с учётом зависимости относительных интенсивностей характеристических линий от вещественного состава, что обеспечивает точное нахождение истинных интенсивностей аналитических линий элементов.

Для выяснения способности спектрометра РПП–12Т реально решать задачи online мониторинга содержания серебра в рудах был проведен многоэтапный цикл исследований.

Во–первых, на керне разведочных скважин по следующей программе: а) рентгенофлуоресцентное опробование (РФО) метровых интервалов керна в ящиках в непрерывном режиме (датчик спектрометра РПП–12Т перемещался вдоль интервала керна) при экспозиции измерений 20 сек/м; б) РФО метровых интервалов керна с шагом наблюдений 10см (10 точек/м) и 20см (5 точек/м) с экспозицией измерений 10с и 5с для каждого шага наблюдений; в) контрольное РФО метровых интервалов керна для режимов измерений, указанных в пунктах а) и б). Контрольное РФО (пункт б) проводилось с небольшой сдвижкой. Результаты исследований приведены в таблице 1. В данную таблицу не включены интервалы керна с низкими (< 3 ppm) содержаниями серебра, а также не включены результаты РФО с шагом наблюдения 5 см.

Таблица 1 – Спектрометр РПП–12Т. Результаты РФО кернa скважины на серебро (ppm): Осн. – основное РФО, Контр. – контрольное РФО

№№ инт.	x/a	Режимы РФО кернa					
		Непрерывный		10 точек/м			
				10 с		5 с	
Осн.	Контр.	Осн.	Контр.	Осн.	Контр.		
41	3,7	4,2	4,2	3,2	3,7	2,6	3,5
42	4,7	5,4	4,3	3,5	4,2	4,2	3,6
40	5,2	5,5	4,9	5,6	4,5	3,8	5,1
61	8,5	9,2	8,2	7,8	7,0	6,6	7,0
47	15,4	16,2	15,5	13,9	16,4	12,6	13,5
55	16,1	17,4	15,8	16,5	17,1	18,0	15,9
56	20,2	17,7	23,4	15,7	19,0	23,0	21,4
48	37,0	45,3	43,1	40,4	45,0	41,6	38,9
50	46,1	44,1	44,5	44,6	45,4	41,3	43,5
52	17,2	17,1	17,9	16,6	16,0	17,3	18,1
Средн.	17,41	18,21	18,18	16,78	17,83	17,09	17,05
σ, %		4,60	4,42	3,62	2,41	1,85	2,10

Во-вторых, на рудных эталонных штуфах. В таблице 2 приведен отчет о результатах РФО эталонного штуфа № 51 с минимальным содержанием серебра. На штуфе в разных точках выполнялось пять измерений по 10 с каждое. Режим РПП–12Т – «Естество».

В-третьих, на грубо измельченных вагонных пробах. Пробы (по 5–6 кг каждая) отобраны с двух составов руды (карьер «Кресто–7») на Жезказганской обогатительной фабрике №1 и измельчены до класса –50 мм. На каждой пробе произведено 35–40 измерений с экспозицией 10 с. Режим измерений – «Естество». Результаты РФО: медь – 3,03% и 2,28% (x/a – 2,98% и 2,39%), серебро – 57,5 ppm и 37,7 ppm (x/a – 52,5 ppm и 39,4 ppm), кадмий – 4,1 ppm и 6,3 ppm (x/a – 4,4 ppm и 5,9 ppm).

В-четвертых, на геологических порошковых проб руд с использованием опции «Анализ проб». Режим измерений – «Порошок». Экспозиция измерений – 30 с. Результаты исследований приведены в таблице 3.

В-пятых, на государственных стандартных образцах руд (ГСО) с использованием опции «Анализ проб». Режим измерений – «Порошок». Экспозиция измерений – 30 с. В таблице 4 приведены результаты исследований (по ГСО–3029 даны также аттестованные содержания серы, оксида кремния и молибдена).

Таблица 2 – Отчет о результатах РФО эталонного штуфа № 51

Номер точки	Содержания элементов					
	Cu %	Ag ppm	Zn %	Pb %	Cd ppm	Fe %
1	0,13	2,3	0,51	0	38,7	1,50
2	0,14	2,3	0,49	0	38,1	1,52
3	0,15	1,0	0,49	0	38,2	1,59
4	0,14	2,4	0,48	0	38,2	1,52
5	0,14	2,1	0,50	0	35,0	1,47
Средн.	0,14	2,0	0,49	0	37,6	1,52
Аттест.	0,15	2,2	0,48	0	37,0	1,54

Таблица 3 – Результаты РФО порошковых проб

Эл	Ме-тод	Номер пробы								\bar{C}
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Cu %	х/а	0,68	0,88	1,43	0,84	3,65	7,68	7,13	3,95	3,28
	рфа	0,62	0,91	1,34	0,82	3,61	8,03	7,17	4,02	3,32
σ , %		8,8	3,4	6,3	2,4	1,1	4,6	0,6	1,8	1,03
Ag	х/а	2,4	6,1	10,2	15,1	22,0	46,7	94,6	174,4	44,88
	рфа	2,9	5,5	8,5	13,1	21,4	45,6	98,3	176,6	44,97
σ , %		20,8	9,8	16,7	13,2	2,7	2,4	3,9	1,3	0,20

Таблица 4 – Результаты РФО ГСО руд

ГСО	Вид анализа	Содержание элементов, % (* – ppm)				
		Cu	Pb	Zn	Ag*	Cd*
2887	РПП12Т	0,537	0,0356	0,0121	8,6	6,9
	х/а	0,55	0,037	0,011	9,3	не атт.
2888	РПП2Т	1,533	0,1019	0,0243	24,6	7,1
	х/а	1,55	0,103	0,023	25,9	не атт.
2889	РПП12Т	3,149	1,8866	0,786	34,9	70,2
	х/а	3,16	1,90	0,80	35,0	71,0
2891	РПП12Т	40,31	2,24	2,879	701,5	286,5
	х/а	40,40	2,25	2,89	707,7	290,0
3029	РПП12Т	0,30	1,54	68,36(Si)	1,9	89(Mo*)
	х/а	0,30	1,59	68,09	2,1	86

Проведенными исследованиями было доказано, что спектрометр РПП–12Т реально обеспечивает проведение эффективного online мониторинга содержаний серебра в керне разведочных скважин, по стенкам горных выработок, в отбитой горной массе, в порошковых пробах руд в диапазоне содержаний серебра от 1+ ppm. Горняки и геологи получили высокоэффективный инструмент. Сейчас на РФО руд на серебро ежедневно используются 8 спектрометров РПП–12Т.

Библиографический список

1. A. Nigmatullin, A. N. Kan, S. A. Yefimenko, V. Onyshchuk, O. Shabatara. *Geophysical online monitoring of copper ores for silver's detection at Kazakhmys Corporation LLC // X IIIth International conference "Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects". Geoinformatics 2019. 13-16 May 2019, Kyiv, Ukraine (DOI: 10.3997/2214-4609.201902095).*

2. Nigmatulin A.M., Abdрахманова Z.T., Kan A.N., Yefimenko S.A. *Nuclear-geophysical technologies of «on-line» control of the chemical composition of copper-containing polymetallic ores //Resource and resource-saving technologies in minerals mining and processing. Multi-authored monograph. – Petrosani. Romania: UNIVERSITAS Publishing, 2018. 162 – 179 s.*

3. Нигматулин А.М., Абдрахманова З.Т., Кан А.Н., Ефименко С.А. *Рентгенофлуоресцентный мониторинг содержаний серебра в рудах месторождения Жезказган // Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей. Десятые научные чтения памяти Ю.П.Булашевича. Материалы конференции. Екатеринбург: ИГФ УрО РАН. 2019. – С. 190 – 194*

4. Yefimenko S.A., Issatayeva F.M., Zhelayeva N.V. *Technologies of «on-line» quality control of ores and their processing products at Kazakhmys corporation LLP // Innovative development of resource-saving technologies for mining. Multi-Authored monograph. – Sofia: Publishing House «St. Ivan Rilski», 2018. – P. 245–268.*