

## Комплекс ядерно-геофизических методов и аппаратуры для повышения эффективности разведки, добычи и переработки нерадиоактивного минерального сырья (на примере оловянных руд)

БАЛДИН С. А., ВОЛОЩУК С. Н., ЕГИАЗАРОВ Б. Г., ЗЕРНОВ Л. В., ЛУЧИН И. А., МАТВЕЕВ В. В., ПУХАЛЬСКИЙ Л. Ч., ЧЕСНОВОВ Н. И.

Перспективным направлением использования ионизирующих излучений в народном хозяйстве является разработка ядерно-физических методов и аппаратуры для решения актуальных задач повышения эффективности разведки, добычи и переработки минерального сырья. Наибольшие успехи в этой области достигнуты при экспресс-анализе урановых руд радиометрическим методом, основанном на регистрации естественного  $\gamma$ -излучения относительно простой аппаратурой [1]. При решении подобных задач для нерадиоактивного сырья используют регистрацию стимулированного излучения, возбуждаемого в веществе с помощью изотопных источников, ускорителей частиц различного вида, ядерных реакторов и т. п.

Одним из эффективных способов анализа вещества в прикладных задачах является рентгено-радиометрический метод (РРМ), заключающийся в возбуждении в веществе радиоизотопными источниками рентгеновского характеристического излучения и его последующей регистрации с помощью спектрометрической аппаратуры.

Энергетический спектр возбуждаемого излучения содержит наряду с рентгеновским характеристическим излучением искомого элемента характеристическое излучение от других элементов, входящих в состав руды, а также первичное рассеянное излучение. В связи с этим необходима чувствительность и экспрессность измерения в большинстве случаев может быть достигнута только при использовании относительно сложных по структуре и составу спектрометрических приборов с устройствами для автоматической обработки результатов измерений. Это существенно затрудняет применение ядерно-физических методов для комплексного анализа нерадиоактивного сырья в производственных условиях, хотя некоторые важные задачи в настоящее время успешно решаются этими методами.

Разработаны и внедрены ядерно-геофизические методы каротажа, опробования недробленого керна и руды в естественном залегании, анализа порошковых проб и т. п., в ряде случаев используются методы контроля отбитой руды, продуктов обогащения, пульпы и растворов. В то же время автоматизированные методы и аппаратура для экспресс-анализа и предварительной сортировки

в транспортных емкостях, сепарации в мелких порциях и кусках практически не исследованы и не применяются, хотя по отдельным вопросам есть публикации, отражающие постановку задачи, результаты лабораторных исследований и некоторые положительные опыты [2—4].

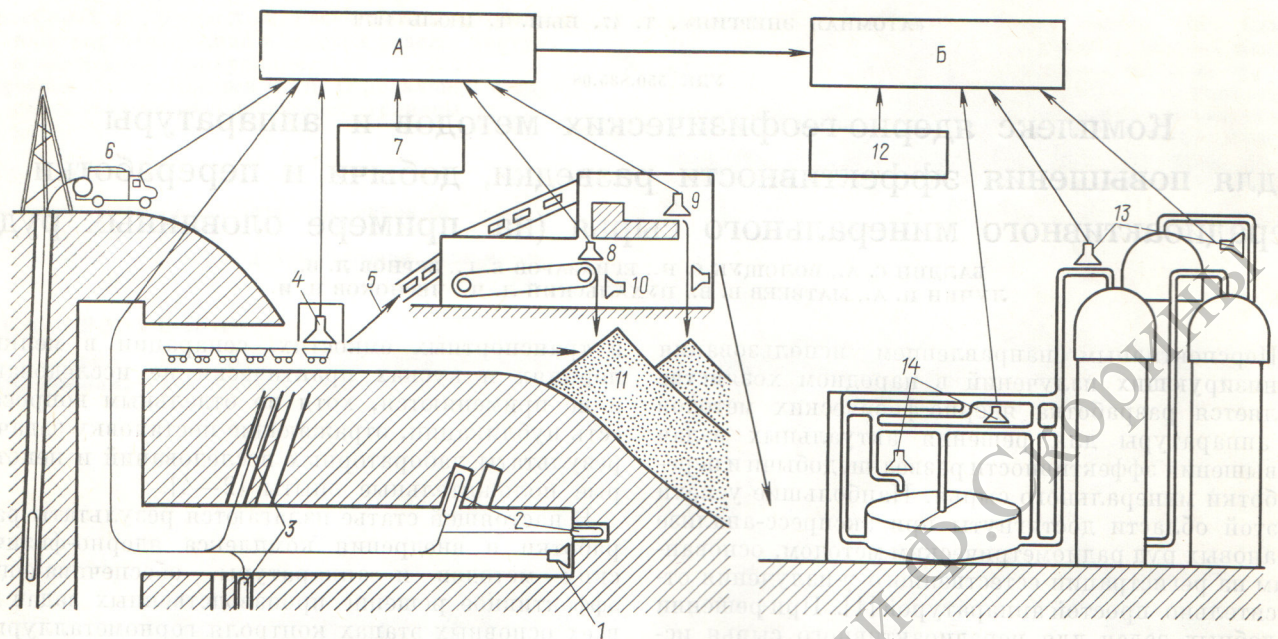
В настоящей статье излагаются результаты разработки и внедрения комплекса ядерно-физических методов и аппаратуры, обеспечивающих эффективное решение производственных задач на всех основных этапах контроля горнометаллургического производства олова. С учетом ядерно-физических характеристик олова и требований производства к аналитическому контролю в основу комплекса положены рентгено-радиометрический [3] и  $\gamma$ -резонансный методы анализа [5]. Последний используется в тех случаях, когда необходимо контролировать олово в форме касситерита либо проводить фазовый анализ на соединения олова и железа.

В зависимости от решаемых производственных задач используются полупроводниковые детекторы (ППД), сцинтилляционные и пропорциональные счетчики, а также изотопные источники из  $^{241}\text{Am}$ ,  $^{147}\text{Pm}$ ,  $^{119\text{m}}\text{Sn}$ . Состав разработанного аппаратного комплекса для контроля на различных стадиях горнометаллургического производства показан на рис. 1.

При поиске и разведке результаты рентгено-радиометрического опробования руды на месте залегания и недробленого керна, каротажа скважин, рентгено-радиометрического и  $\gamma$ -резонансного анализа порошковых проб (см. рис. 1, 1, 6, 7) используются для выделения перспективных участков и получения исходных данных при подсчете запасов.

На стадии добычи и предварительного обогащения руд с помощью рентгено-радиометрического опробования руды на месте залегания и недробленого керна, каротажа шпуров и скважин, экспресс-анализа и сортировки руд в транспортных емкостях, предварительного обогащения руд в мелких порциях и кусках, анализа порошковых проб рентгено-радиометрическим и  $\gamma$ -резонансным методами (см. рис. 1, 1—3, 6—9) получают исходные данные для подсчета запасов при детальной и эксплуатационной разведке, оптимизации процесса





Р и с. 1. Структура комплекса и функции контроля:

А — контроль за процессами разведки, добычи и сортировки; Б — контроль за процессами переработки; 1 — опробование; 2, 3 — картаж шпуров и скважин; 4 — экспресс-анализ на рудоконтрольной станции; 5 — сортировка; 6 — наземный картаж; 7 — лабораторный анализ проб, керн, штуфов; 8, 9 — порционная и покусковая сепарация; 10 — экспресс-анализ продуктов; 11 — хвосты; 12 — лабораторный анализ проб; 13, 14 — непрерывный контроль за процессами металлургии (контроль растворов) и обогащения (контроль пульпы) соответственно

добычи; создаются предпосылки для селективной выемки и оставления некондиционных руд в виде целиков и закладки, для уменьшения потерь и разубоживания, выделения некондиционной по содержанию олова части отбитой горной массы.

Для контроля и управления процессом переработки руд используются результаты рентгенометрического опробования руды на ленте транспортера, контроля за содержанием олова в твердой фазе пульпы и растворов в непрерывном режиме, рентгенометрические и  $\gamma$ -резонансные анализы проб на олово и сопутствующие ему компоненты (см. рис. 1, 10, 12—14). Полученные при измерениях данные позволяют определять содержание олова и сопутствующих элементов в рудах и продуктах их переработки.

В рудничных приборах для каротажа, опробования недробленого керна и руды на месте залегания используются сцинтилляционные блоки детектирования с тонким кристаллом из иодистого натрия. Порог чувствительности при рентгенометрическом опробовании составил 0,05%, при каротаже — 0,07%. По результатам сопоставления рентгенометрического опробования с традиционным бороздовым средняя квадратическая погрешность определения содержания олова составила от  $\pm 32$  (для класса содержаний менее 0,1%) до  $\pm 13$  (для класса содержаний более 0,5%). Относительная средняя квадратическая погрешность по данным сопоставления каротажа с лабораторными анализами керновых проб равна

$\pm 30\%$  для класса содержаний менее 0,1%. Следует отметить, что погрешность традиционного геологического опробования  $\pm 40—60\%$ . Производительность опробования составляет не менее 20 м в смену, производительность каротажа — не менее 100 м в смену на прибор. К настоящему времени с использованием РРМ опробовано более 30 км стенок горных выработок и прокарировано более 10 км скважин, пробуренных из подземных горных выработок.

В установках для экспресс-анализа, сортировки и сепарации руд в транспортных емкостях, мелких порциях и кусках используются блоки детектирования с кремниевыми ППД (площадь чувствительной поверхности  $\sim 250 \text{ мм}^2$ ). Время рентгенометрического анализа одной вагонетки составляет 15—20 с, производительность — более 300 вагонеток в смену. На этой установке проанализировано в производственном режиме более 300 тысяч вагонеток. Себестоимость экспресс-анализа рудной массы в вагонетке рентгенометрическим методом примерно в 3 раза ниже себестоимости горстего опробования при резком повышении производительности измерений, обеспечивающем автоматизацию сортировки.

Блок облучения и детектирования установки с охлаждаемыми полупроводниковым детектором и четырьмя изотопными источниками  $^{241}\text{Am}$  в защитных устройствах с коллиматорами показан на рис. 2.



Таблица 1

Усредненные показатели покусковой сепарации

Технологическая проба	Общая масса, т	Класс крупности, мм	Средний выход класса, %	Сред. ее содержание олова (химический анализ), %	Хвосты			Концентрат			Коэффициент обогащения, отв. ед.
					выход от класса, %	выход от исходной руды, %	содержание олова, %	выход от класса, %	выход от исходной руды, %	содержание олова, %	
1	69,6	63—100,	13,6	0,138	50,0	6,8	0,071	50,0	6,8	0,185	1,45
		100—200	17,4	0,176	44,0	7,7	0,060	56,0	9,7	0,267	1,52
2	48,0	63—100,	14,4	0,096	85,0	12,2	0,055	15,0	2,2	0,328	3,4
		100—200	18,0	0,130	79,0	14,2	0,072	21,0	3,8	0,348	2,7
3	7,74	20—32,	8,5	0,174	63,0	5,4	0,100	37,0	3,1	0,310	1,72
		32—63	15,6	0,220	81,0	12,6	0,070	19,0	3,0	0,860	3,9

Исследования, проведенные на установке для сепарации в мелких порциях и кусках в производственном режиме, показали принципиальную и техническую возможность рентгенорадиометрического обогащения. Установлено, что содержание олова в кусках или порциях определяется с погрешностью 30—40%, достаточной для эффективного разделения руд по содержанию, а чувствительность анализа позволяет проводить сортировку в порционном и кусковом режимах с производительностью 5—15 т/ч и более в зависимости от крупности сортировки материала (табл. 1).

Измерительная часть установки для сепарации руды показана на рис. 3, на котором видна нижняя часть блока детектирования с полупроводни-

ковым детектором и четырьмя изотопными источниками, расположенными попарно по обе стороны от детектора. Обе установки для предварительного рентгенорадиометрического обогащения работают в автоматическом режиме и оснащены процессорами-анализаторами для обработки информации по заданному алгоритму, а также устройствами контроля и управления внешними исполнительными механизмами. Следует отметить, что установки для бесконтактной автоматической сортировки и сепарации руд на основе РРМ реализованы и опробованы в промышленных условиях впервые.

Рентгенорадиометрические и рентгеноабсорбционные приборы и установки для непрерывного

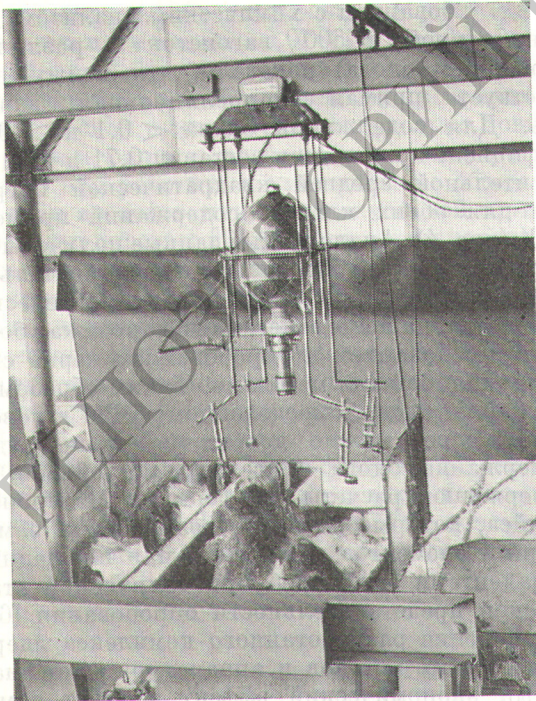


Рис. 2. Блок облучения и детектирования с полупроводниковым детектором на рудоконтрольной станции

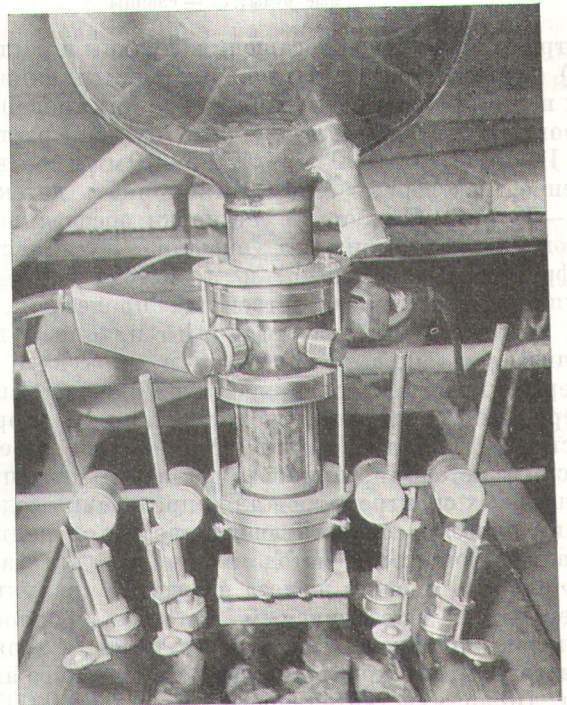
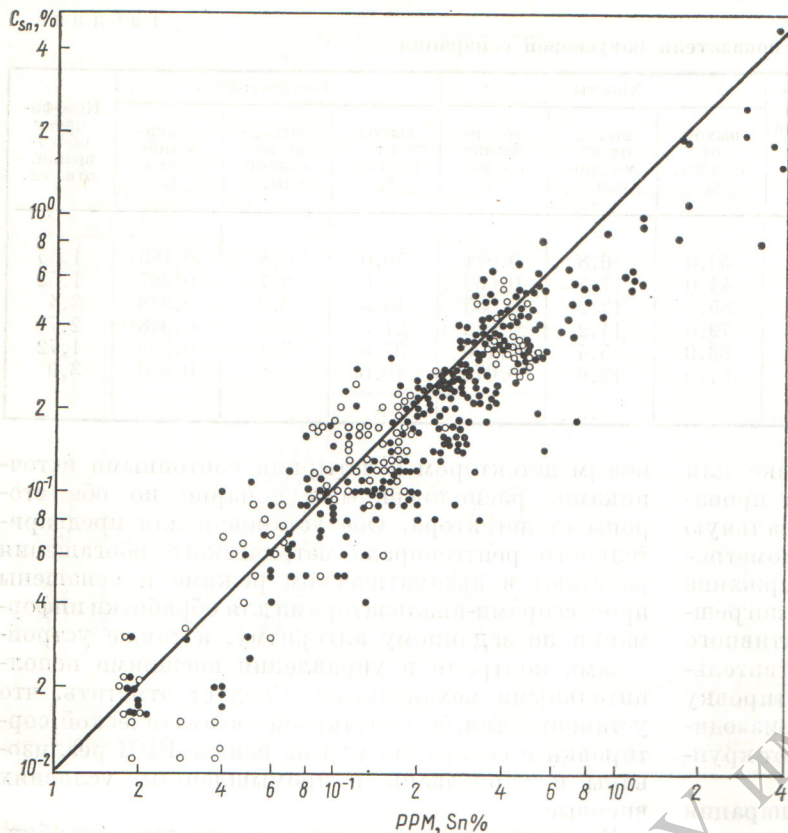


Рис. 3. Блок облучения и детектирования установки для сепарации руд с полупроводниковым детектором





Р и с. 4. Сопоставление результатов экспресс-анализа оловянных руд в вагонетках (PPM) и валового опробования ( $C_{Sn}$ , химический анализ): ● — скарпные руды; ○ — сланцы

контроля продуктов обогащения (пульпы и растворов) основаны на использовании скитилляционных и полупроводниковых блоков детектирования. Порог чувствительности анализа пульпы и растворов ППДО,00 1—0,003 мас. % и 5—10 мг/л соответственно, растворов скитилляционным детектором—70 мг/л. Приборы и установки обеспечивают вывод информации на внешние устройства (цифropечать, самописец) и в систему контроля и управления производственным процессом.

К разработанным лабораторным приборам для анализа порошковых проб руд и продуктов их переработки относятся приборы для определения содержания общего и окисного олова (в форме касситерита) рентгенорадиометрическим и  $\gamma$ -резонансным методами, приборы на основе полупроводниковых спектрометров для определения содержания олова и сопутствующих элементов рентгенорадиометрическим методом, приборы для фазового анализа олова и железа в рудах и продуктах переработки  $\gamma$ -резонансным методом. Точность анализов порошковых проб не уступает, а в ряде случаев и превосходит точность химического анализа. Порог чувствительности составляет 0,005—0,02 % общего олова и олова в форме касситерита.

Ниже приведены средние квадратические отно-

сительные отклонения результатов анализа  $\gamma$ -резонансным методом содержания олова в форме касситерита от результатов химического анализа:

Класс содержания олова, %	Число определений	Отклонение, %
0,05	454	$\pm 58,4$
0,05—0,1	405	$\pm 27,3$
0,1—0,25	447	$\pm 16,2$
0,25—1	229	$\pm 11,2$
1	88	$\pm 5,2$

Результаты сопоставлений по другим видам анализов порошковых проб на олово и попутные компоненты также показали высокую точность и чувствительность рентгенорадиометрических анализов. Всего проанализировано примерно 300 тысяч проб. Производительность анализов — 100—120 анализов на прибор в смену.

Известно, что РРМ обладает малой глубиной, не превышающей нескольких миллиметров, в связи с чем важнейшей задачей исследований была оценка представительности и точности результатов анализов при каротаже, опробовании на месте залегания и в особенности экспресс-анализов в транспортных емкостях. Сопоставление результатов определения содержания олова в поверхностном слое руды, загруженной в вагонетки, РРМ и валовым опробованием с химическим анализом отобранных проб (> 500 вагонеток с различным содержанием олова) показало, что между ними существует прямая корреляционная зависимость. Для содержания олова < 0,1 и > 0,1 % коэффициент корреляции составил 0,71 и 0,82 при относительной средней квадратической погрешности для обоих классов содержаний примерно  $\pm 30$  % (рис. 4). Аналогичные данные получены при сопоставлении результатов по представительным объемам исследований рентгенорадиометрического опробования на месте залегания и каротажа с бороздовым опробованием и опробованием керна скважин традиционными методами. Таким образом, по содержанию олова, определенному РРМ в поверхностном слое, можно достаточно точно судить о содержании олова в исследуемом объеме, что подтверждают расчеты по формуле Матерона — де Вийса, которые показали возможность замены объемных элементов линейными или площадными эквивалентами этих проб при сохранении статистической представительности опробования [6].

Применение разработанного комплекса ядерно-геофизических методов и аппаратуры дает значительный экономический эффект за счет замены традиционных методов анализа и опробования ядерно-геофизическими методами и изменения тех-



Распределение горнорудной массы по интервалам содержания олова на основании экспресс-анализа руд в вагонетках рентгенорадиометрическим методом, %

Интервал содержания олова	Среднее содержание	Выход руды	Выход олова	Интервал содержания олова	Среднее содержание	Выход руды	Выход олова
0—0,10	0,04	33,5	7,6	0,30—0,40	0,34	8,8	17,0
0,10—0,15	0,12	18,3	12,9	0,40—0,60	0,51	6,8	19,7
0,15—0,30	0,21	37,4	39,3	0,60	0,89	0,9	4,5

нологии разведки, добычи и переработки оловянных руд. Так, стоимость ядерно-геофизического анализа порошковых проб в 6—8 раз ниже химического, стоимость ядерно-геофизического опробования на месте залегания в 5—6 раз ниже бороздового и т. д. Уже в настоящее время эффект от использующихся в производстве приборов комплекса составил около 1 млн. руб.

Применение каротажа скважин и шпуров, опробования на месте залегания позволяет заменить большую часть бурения с отбором керна на более производительное и дешевое бескерновое бурение, уменьшить объем отбойки горной массы за счет оставления в недрах части некондиционных руд в виде целиков, создает предпосылки для селективной добычи, уменьшения разубоживания и потерь. Введение в технологию добычи экспресс-анализа и сортировки руд в транспортных емкостях, предварительного обогащения в мелких порциях и кусках позволяет выделить 20—40% отвальных хвостов с содержанием олова 0,06—0,08%, что дает возможность уменьшить объем и увеличить в 1,2—1,5 раза содержание олова в руде, направляемой на дальнейшую переработку. Например, при отработке одного из экспериментальных блоков с использованием ядерно-геофизических методов в недрах оставлено в виде целиков 5,6% руды с содержанием олова ~0,08%, по данным экспресс-анализа руд в вагонетках при граничном содержании 0,1% выделено 33% хвостов с содержанием олова 0,04%, коэффициент обогащения при этом составил 1,37 (табл. 2), а при граничном содержании 0,15% выделено 51,8% хвостов с содержанием олова 0,07% и коэффициентом обогащения 1,61.

Предварительное обогащение руд в мелких порциях и кусках позволяет дополнительно повысить содержание олова в руде, направляемой на дальнейшую переработку, и уменьшить ее объем. Как показали исследования, при покусковой сортировке руд крупностью 32—200 мм рентгенорадиометрическим методом выделяется 15—25% хвостов (от исходной руды, посланной на обогащение) с содержанием олова 0,05—0,08%. Техничко-экономические расчеты и результаты промышленной эксплуатации комплекса показывают, что суммарный эффект от его внедрения составляет 2—3 руб. на 1 т руды.

**Выводы.** Разработан, опробован и внедрен в промышленную эксплуатацию комплекс ядерно-геофизических методов и аппаратуры для поиска, разведки, добычи и переработки бедных оловянных

руд, охватывающий весь производственный цикл. Внедрение комплекса существенно повышает технико-экономические показатели производства в целом, позволяет использовать более производительную технологию добычи, переработки руд и создавать автоматизированные системы управления производством. Применение в комплексе аппаратуры с ЦПД в сочетании с анализаторами-процессорами позволило впервые в практике горного и обогатительного производства создать автоматические рентгенорадиометрические установки для бесконтактного экспресс-анализа, сортировки и предварительного обогащения бедных оловянных руд в транспортных емкостях, мелких порциях и кусках. Структура комплекса, схематические принципы построения аппаратуры и метод измерения обеспечивают возможность его использования при решении аналогичных задач для других видов нерадиоактивного сырья, таких, как руды молибдена, вольфрама, цинка, меди и другие руды, в том числе комплексные.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пухальский Л. Ч., Шумилин М. В. Разведка и опробование урановых месторождений. М., «Недра», 1977.
2. Очкур А. П. и др. Гамма-методы в рудной геологии. Л., «Недра», 1976.
3. Леман Е. П. и др. Ядерная геофизика в рудной геологии. Л., изд. НИО «Геофизика», 1977.
4. Татарников А. П. Ядернофизические методы обогащения полезных ископаемых. М., Атомиздат, 1974.
5. Гольданский В. И. и др. Гамма-резонансные методы и приборы для фазового анализа минерального сырья. М., Атомиздат, 1974.
6. Карлье Э. Методика количественной оценки месторождений урана. М., Атомиздат, 1961.

Поступила в Редакцию 30.01.79