

мере опытного участка СГД в западной части Бакчарского железорудного узла у с. Бакчар. Дополнительная проверка и уточнение полученных допустимых концентраций осуществляется путем использования уравнения связи между содержаниями химических элементов в речных водах и донных отложениях. Непосредственно для р. Галка допустимая концентрация железа в сточных водах, которые в перспективе могут поступать в результате добычи руды, составляет 2,27 мг/дм<sup>3</sup>.

Анализ результатов моделирования изменения концентраций железа в речных водах с помощью этого уравнения (аналитического решения одномерного стационарного уравнения диффузии) показал, что приближение к определенному уровню, соответствующему относительно устойчивому эколого-геохимическому состоянию, происходит буквально на протяжении нескольких метров. Судя по характеру изменения концентраций железа в донных отложениях, это объясняется выпадением из водной среды его малорастворимых соединений [3]. В случае существенного увеличения объема сточных вод время релаксации, безусловно, возрастет, а расстояние с повышенными концентрациями железа в донных отложениях — увеличится, но, скорее всего, ограничится четырехкилометровым участком (до с. Бакчар). Периодически повторяющаяся рекультивация дна (путем выемки верхнего слоя донных отложений) позволит минимизировать воздействие добычи осадочных железных руд, а общий уровень воздействия на водный объект будет в целом долгосрочный, локальный (до 4–5 км) и допустимый.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Голева, Р.В. Экологическая оценка потенциальной токсичности рудных месторождений / Р.В. Голева, В.В. Иванов, И.И. Куприянова и др. / Методические рекомендации. — М.: ВИМС, 2001 — 53 с.

2. Домаренко, В.А. Особенности распределения химических элементов в болотных экосистемах Восточного Васюганья / В.А. Домаренко, О.Г. Савичев, Е.В. Перегудина // Разведка и охрана недр. — 2017. — № 8. — С. 50–54.
3. Крайнов, С.Р. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец. — М.: Наука, 2004. — 677 с.
4. Лыготин, В.А. Долгосрочная изменчивость химического состава подземных вод Томской области / В.А. Лыготин, О.Г. Савичев, Ю.В. Макушин, О.А. Камнева // География и природные ресурсы. — 2012. — № 1. — С. 74 — 79.
5. РД 52.24.622-2001. Методические указания. Проведение расчетов фоновых концентраций химических веществ в воде водотоков. — М.: Росгидромет, 2001. — 68 с.
6. Савичев, О.Г. Оценка допустимого воздействия на водные объекты при разработке осадочных железных руд Бакчарского рудного узла (Томская область) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко, А.К. Мазуров // Геоинформатика. — 2014. — № 3. — С. 56–63.
7. Савичев, О.Г. Пространственно-временные изменения минерализации подземных вод в бассейне Средней Оби / О.Г. Савичев, О.А. Камнева // Разведка и охрана недр. — 2010. — № 11. — С. 67–70.
8. Савичев, О.Г. Поступление антропогенных веществ в воды р. Томь / О.Г. Савичев // Мелиорация и водное хозяйство. — 1998. — № 6. — С. 31–33.
9. Савичев, О. Г. Минералого-геохимические особенности донных отложений малых рек в междуречье рек Ло и Кау (Северный Вьетнам) / О.Г. Савичев, В.А. Домаренко., Е.В. Перегудина, Нгуен Ван Луен, М.В. Шалдыбин, А.В. Канаки // Известия ТПУ — 2017. — № 9. — Т. 328. — С. 102–113.
10. СП 33-101-2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. — М.: Госстрой России, 2004. — 72 с.
11. Benedini, M. Water Quality Modelling for Rivers and Streams. / M. Benedini, G. Tsakiris. — Dordrecht, 2013. — 288 p.
12. Loucks, D.P. Water Resources Systems Planning and Management. An introduction to Methods, Models and applications / D.P. Loucks, E. Van Beek. — Turin: UNESCO, 2005. — 680 p.

*Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 17-05-00042.*

© Домаренко В.А., Савичев О.Г., Перегудина Е.В., 2018

Домаренко Виктор Алексеевич // Viktor\_Domarenko@mail.ru  
Савичев Олег Геннадьевич // OSavichev@mail.ru  
Перегудина Елена Владимировна // pere-elena@mail.ru

## ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ

УДК 553.411.048 (571.53)

Карпенко И.А.<sup>1</sup>, Цымбалист С.И.<sup>2</sup>, Рябкин В.К.<sup>2</sup>, Литвинцев Э.Г.<sup>2</sup>, Куликов Д.А.<sup>1</sup>, Хашковская Т.Н.<sup>3</sup>, Ратнер В.Б.<sup>2</sup>, (1 — ФГУП «ЦНИГРИ», 2 — ФГБУ «ВИМС», 3 — ООО «Институт Гипроникель»)

### СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ ВКРАПЛЕННЫХ СУЛЬФИДНЫХ ПЛАТИНОВЫХ МЕДНО-НИКЕЛЕВЫХ РУД МОНЧЕГОРСКОГО РУДНОГО РАЙОНА

Описаны исследования, проведенные на пробе платинометаллических руд участка Пласт-330, крупностью —75+20 мм. Приведено технико-экономическое сравнение технологий с применением радиометрических и традиционных методов обогащения. Доказана эффективность применения рентгенорадиометрической сепара-

ции, позволяющей повысить сквозные технологические показатели по всей схеме переработки исследуемых руд. **Ключевые слова:** медно-никелевые руды, платиновые руды, предварительное обогащение, рентгенорадиометрическая сепарация, сепарация руд.

Karpenko I.A.<sup>1</sup> Tsymbalist S.I.<sup>2</sup>, Ryabkin V.K.<sup>2</sup>, Litvintsev E.G.<sup>2</sup>, Kulikov D.A.<sup>1</sup>, Hashkovskaya T.N.<sup>3</sup>, Ratner V.B.<sup>2</sup>

(1 — TSNIGRI, 2 — VIMS, 3 — Ltd. Gipro-nickel Institute)

### THE PERFECTION OF TECHNOLOGY FOR PROCESSING DISSEMINATED SULFIDE PLATINUM-COPPER-NICKEL ORES OF THE MONCHEGORSK ORE DISTRICT

Describes research conducted on a sample of ores platinum metal of the site Plast 330, particle size -75+20 mm. Given technoeconomic comparison of technologies with application of radiometric methods and technology with the use of traditional

methods of enrichment. Explained the high efficiency of x-ray radiometric separation, which allows to increase end-to-end technological parameters of the whole recycling scheme of the studied ores. **Keywords:** copper-nickel ore, platinum ore, roughing, X-ray radiometric separation, ore separation.

Участок Пласт 330 месторождения Вуручайвенч расположен в пределах массива горы Сопча, слагающего центральную часть Мончегорского пластообразного расслоенного интрузива ультраосновных и основных пород (рис. 1), основанием которого служат гнейсы архейского возраста. Нижние горизонты массива г. Сопча представлены преимущественно перидотитами, верхние — пироксенитами, средняя часть массива сложена переслаивающимися перидотитами, оливиновыми пироксенитами. Глубина залегания подошвы массива г. Сопча достигает 1170–1220 м от дневной поверхности.

Интрузивные породы г. Сопча содержат сульфидную минерализацию двух типов: вкрапленную, залегающую согласно расслоенности вмещающих пород, и жильную, секущую слоистость. Вкрапленная сульфидная минерализация развита в донной залежи массива (Донная залежь); в верхней части массива — от современной дневной поверхности до глубины 300–450 м (рудная залежь Пласт 330) и в висячем боку рудной залежи Пласт 330, на глубинах до 250–300 м.

Границы рудных залежей вкрапленных руд постепенные и устанавливаются по данным опробования. Руды бедные. Жильные руды — богатые, приурочены к крутопадающим трещинам, имеют четкие геологические границы, за которыми нередко развиваются ореолы бедных вкрапленных сульфидных руд. Залегают жильные руды между Донной залежью и рудной залежью Пласт 330, образуя жильную зону (рис. 2).

Все вкрапленные и жильные сульфидные руды комплексные, содержат повышенные, вплоть до промышленных, концентрации цветных (никель, медь, кобальт) и благородных (платина, палладий, золото, серебро) металлов.

Месторождение Вуручайвенч располагается вблизи (от 0.5 до 6 км) промплощадки комбината «Североникель» (рис. 1), где осуществляется полный производственный цикл по переработке руд аналогичного состава (обогащение, металлургия). Таким образом, положительное решение вопроса о промышленной отработке запасов вкрапленных (и жильных) руд месторождения Вуручайвенч позволит обеспечить комбинат «Североникель» собственной рудной базой на долгие (не менее 30–35 лет) годы.

Качество комплексных руд месторождения Вуручайвенч, морфология, условия залегания и масштабы рудных тел изучены достаточно надежно. В настоящее время наиболее актуальной представляется задача разработки прогрессивной технологии переработки этих руд, в первую очередь на стадии обогатительного передела.

Исследования по обогатимости вкрапленных руд рудной залежи Пласт 330 осуществлялись с начала ее

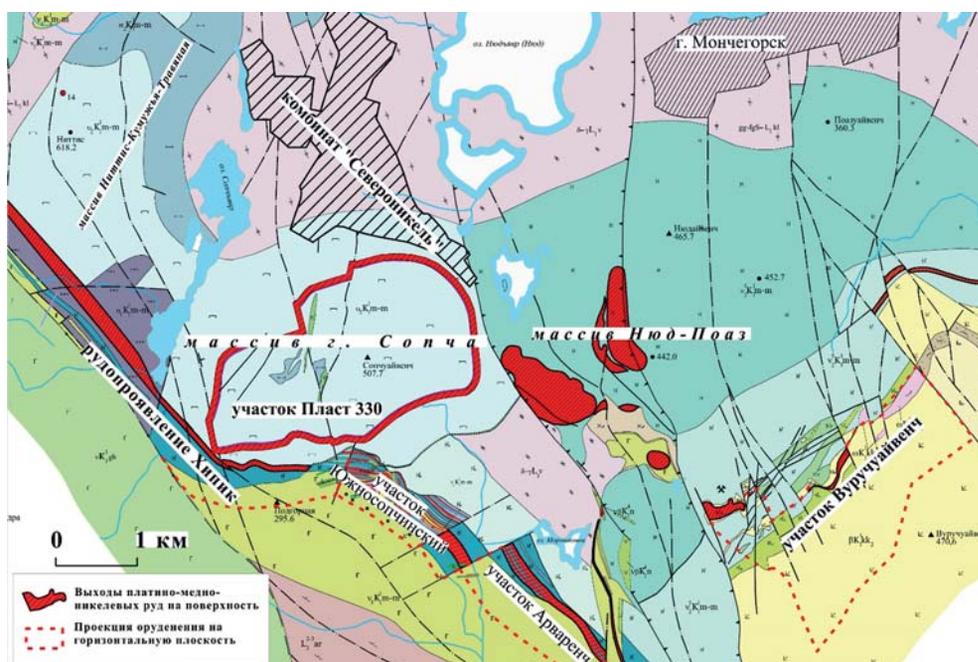


Рис. 1. Положение участков месторождения Вуручайвенч

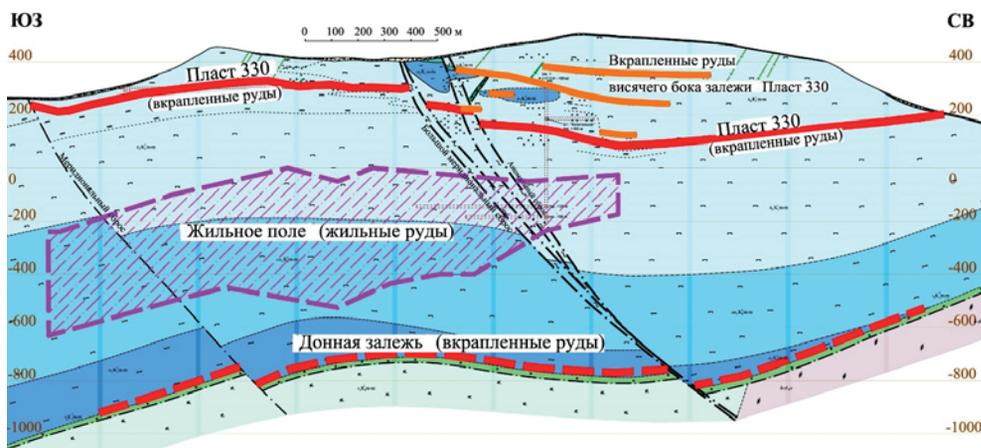


Рис. 2. Положение рудных зон в массиве горы Сопча

разведки (1935 г.) и частичной эксплуатации и продолжались до 1995 г. с перерывами. Основным процессом обогащения являлась флотация.

Второй этап технологических исследований охватывает период с 2008 по 2012 г. и характеризуется главным образом введением в технологический процесс предварительного обогащения руд методом радиометрической сепарации. Процессы радиометрического обогащения используют природное свойство раскрытия минерального сырья уже на стадии крупного дробления, реализуя эффекты взаимодействия различных видов излучения с веществом. Их достоинства — обогащение минерального сырья в широком диапазоне крупности от 350 до 5 мм, высокая селективность, относительно низкая себестоимость переработки руд, низкие капитальные и эксплуатационные затраты, экологическая безопасность.

Применение радиометрических методов целесообразно для относительно бедных руд, к числу которых относятся вкрапленные комплексные платино-медно-никелевые руды месторождения Вуручайвенч участка Пласт 330. В 2012 г. на рудах этого месторождения в ФГБУ «ВИМС» и ФГУП «ЦНИГРИ» были проведены технологические исследования с применением предварительного крупнокускового обогащения методом рентгенорадиометрической сепарации.

Исследуемый материал был представлен технологической пробой ТП-330-3. Проба составлена из керна восьми разведочных скважин в виде четырех частных проб с различным содержанием основного ценного компонента, характеризующих основные типы руд [2].

Согласно исследований, выполненных Кряжевым С.Г. [1], руда представлена в различной степени измененными пироксенитами вплоть до полнопроявленных тальк-амфибол-карбонатных метасоматитов без первичных магматических минералов. Рудная минерализация присутствует повсеместно в количестве от 0.1 до 3 %, редко более.

Основными полезными компонентами в руде являются никель, медь, благородные металлы и кобальт. Никель присутствует в сульфидной и неизвлекаемой флотационными методами силикатной и оксидной формах. Сульфидный никель представлен собственными минералами (пентландит, миллерит), изоморфно содержится в пирротине. Силикатный никель присутствует в виде изоморфной примеси и тончайших включений сульфидов в силикатах: амфиболах, тальке, хлорите. Некоторое количество никеля содержится в виде изоморфной примеси в хромите и магнетите. Главным минералом меди является халькопирит, с которым связано 65 % металла. В менее значительных количествах присутствуют халькозин и борнит (30 %), оксидная и самородная медь (5 %). Кобальт содержится в пентландите, пирите и миллерите.

Благородные металлы в руде представлены собственными минералами в виде тонкой сульфидной вкрапленности размером до 20–70 мкм. Главные минералы благородных металлов — теллурувисмутиды платины и палладия, более редкие — сульфиды платины (брег-

гит, куперит, сперрилит, котульскит), золото, серебро и интерметаллиды палладия и платины.

При предварительном обогащении руды основным фактором, определяющим показатели процесса, служит неравномерность содержаний полезных компонентов в кусках. Изучение неравномерности (контрастности) проводилось на представительной выборке из 100 кусков с оценкой показателей по основным ценным компонентам (Ni, Cu, Pd, Pt, Au). Для количественной оценки степени неравномерности использовался показатель М, предложенный В.А. Мокроусовым [4]. Этот показатель для перечисленных компонентов изменяется в достаточно узких пределах — от 0,75 до 0,80. По существующей классификации руды данной пробы относится к категории контрастных.

Выбор методов сепарации и формирование разделительных признаков с оценкой их эффективности проводились на той же, что и для изучения контрастности, выборке кусков с использованием специально приспособленной, моделирующей геометрию камеры сепаратора измерительной аппаратуры, условно называемой «аппаратурой признака разделения» (АПР) [5].

Оценивалась эффективность рентгенорадиометрического (РРС), магнитометрического (ММС), индукционного радиорезонансного (ИРМ) методов сепарации, а также возможность обогащения по плотности (ОП).

При испытаниях РРС оценивалась эффективность разделительных признаков ( $\Theta_n$ ) по никелю  $\eta$  (Ni), меди  $\eta$  (Cu), железу  $\eta$  (Fe), а также поликомпонентного признака никель-медь  $\eta$  (Ni-Cu). Параметры разделения формировались в виде спектральных отношений, зарегистрированных в соответствующих энергетических интервалах импульсов, характеризующих интенсивность флуоресцентного излучения определяемых компонентов и рассеянного от анализируемой среды излучения радиоизотопного источника  $^{109}\text{Cd}$  [8].

Испытания ММС и ИРМ проводились с целью выделения магнитной и электропроводной фракций, которые в рудах данного типа характеризуются повышенной концентрацией никеля и меди.

При сопоставлении эффективностей признаков разделения установлено, что РРС по всем показателям —  $\eta$  (Ni),  $\eta$  (Cu),  $\eta$  (Fe),  $\eta$  (Ni-Cu), обеспечивает наиболее высокую эффективность разделения по основным ценным компонентам, включая благородные

**Таблица 1**  
Результаты оценки корреляционных связей между основными ценными компонентами

| Элемент                          | Au   | Pd   | Pt   | Cu   | Fe   | Ni   |
|----------------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Коэффициент корреляции, отн. ед. |      |      |      |      |      |      |
| Au                               | 1.00 |      |      |      |      |      |
| Pd                               | 0.64 | 1.00 |      |      |      |      |
| Pt                               | 0.65 | 0.99 | 1.00 |      |      |      |
| Cu                               | 0.49 | 0.74 | 0.74 | 1.00 |      |      |
| Fe                               | 0.47 | 0.74 | 0.76 | 0.59 | 1.00 |      |
| Ni                               | 0.61 | 0.92 | 0.93 | 0.79 | 0.74 | 1.00 |

**Таблица 2**  
**Пределные показатели сепарации при разделении по  $\eta$  (Cu),  $\eta$  (Ni) и  $\eta$  (Fe),  $\eta$  (Ni-Cu),  $\alpha$ ,  $\Delta Qm$**

| Признак разделения | Наименование продукта | Выход, % | Содержание |         |         |       |         | Извлечение, % |       |       |       |       |
|--------------------|-----------------------|----------|------------|---------|---------|-------|---------|---------------|-------|-------|-------|-------|
|                    |                       |          | Ni, %      | Pd, г/т | Pt, г/т | Cu, % | Au, г/т | Ni            | Pd    | Pt    | Cu    | Au    |
| $\eta$ (Cu)        | Хвосты                | 38,98    | 0,07       | 0,18    | 0,03    | 0,08  | 0,02    | 9,71          | 10,70 | 11,14 | 16,08 | 11,36 |
|                    | Концентрат            | 61,02    | 0,44       | 0,94    | 0,17    | 0,28  | 0,08    | 90,29         | 89,30 | 88,86 | 83,92 | 88,65 |
| $\eta$ (Ni)        | Хвосты                | 37,52    | 0,05       | 0,14    | 0,03    | 0,08  | 0,01    | 6,88          | 7,96  | 8,67  | 15,33 | 10,30 |
|                    | Концентрат            | 62,48    | 0,44       | 0,95    | 0,17    | 0,27  | 0,07    | 93,12         | 92,04 | 91,33 | 84,67 | 89,70 |
| $\eta$ (Fe)        | Хвосты                | 37,95    | 0,06       | 0,16    | 0,03    | 0,08  | 0,02    | 7,56          | 9,45  | 9,47  | 14,67 | 11,59 |
|                    | Концентрат            | 62,05    | 0,44       | 0,94    | 0,17    | 0,28  | 0,07    | 92,45         | 90,55 | 90,53 | 85,33 | 88,41 |
| $\eta$ (Ni-Cu)     | Хвосты                | 37,22    | 0,05       | 0,14    | 0,03    | 0,08  | 0,01    | 6,95          | 8,08  | 8,83  | 14,97 | 10,66 |
|                    | Концентрат            | 62,78    | 0,43       | 0,94    | 0,17    | 0,27  | 0,07    | 93,05         | 91,92 | 91,17 | 85,03 | 89,34 |
| $\Delta Qm$        | Хвосты                | 38,86    | 0,06       | 0,14    | 0,03    | 0,08  | 0,01    | 7,55          | 8,62  | 9,11  | 15,58 | 10,93 |
|                    | Концентрат            | 61,14    | 0,45       | 0,96    | 0,17    | 0,28  | 0,08    | 92,45         | 91,38 | 90,89 | 84,42 | 89,07 |
| $\alpha$           | Хвосты                | 34,59    | 0,08       | 0,19    | 0,04    | 0,10  | 0,02    | 9,81          | 9,96  | 10,52 | 17,33 | 10,49 |
|                    | Концентрат            | 65,41    | 0,41       | 0,88    | 0,16    | 0,26  | 0,07    | 90,19         | 90,04 | 89,48 | 82,67 | 89,51 |
| Исходный класс     |                       | 100,00   | 0,29       | 0,64    | 0,12    | 0,20  | 0,05    | 100,0         | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

**Таблица 3**  
**Сравнительные технологические показатели рентгенорадиометрической сепарации исследуемой пробы руды и флотационного обогащения**

| Продукт  | Выход  | Содержание |       |       |         |         |         | Извлечение, % |       |       |       |       |       |
|--|--------|------------|-------|-------|---------|---------|---------|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
|  |        | Ni, %      | Cu, % | Co, % | Pd, г/т | Pt, г/т | Au, г/т | Ni            | Cu    | Co    | Pd    | Pt    | Au    |
| Технологические показатели рентгенорадиометрического обогащения                                  |        |            |       |       |         |         |         |               |       |       |       |       |       |
| Обогащенный продукт РРС  | 67,55  | 0,390      | 0,226 | 0,016 | 0,830   | 0,138   | 0,055   | 90,380        | 89,88 | 82,28 | 90,79 | 91,09 | 88,41 |
| Хвосты РРС   | 32,45  | 0,086      | 0,053 | 0,007 | 0,176   | 0,028   | 0,015   | 9,620         | 10,12 | 17,72 | 9,21  | 8,91  | 11,59 |
| Технологические показатели флотационного обогащения исходной руды                                |        |            |       |       |         |         |         |               |       |       |       |       |       |
| Концентрат   | 2,55   | 6,000      | 4,360 | 0,163 | 16,300  | 2,250   | 0,730   | 52,86         | 65,53 | 32,15 | 67,01 | 56,14 | 44,32 |
| Хвосты   | 97,45  | 0,140      | 0,060 | 0,009 | 0,210   | 0,046   | 0,024   | 47,14         | 34,47 | 67,85 | 32,99 | 43,86 | 55,68 |
| Технологические показатели флотационного обогащения обогащенного продукта РРС (от исходной руды) |        |            |       |       |         |         |         |               |       |       |       |       |       |
| Концентрат   | 2,74   | 6,000      | 4,410 | 0,172 | 15,480  | 2,200   | 0,740   | 56,69         | 71,10 | 35,88 | 68,41 | 59,10 | 48,28 |
| Хвосты   | 97,26  | 0,129      | 0,051 | 0,009 | 0,201   | 0,043   | 0,022   | 43,31         | 28,90 | 64,12 | 31,59 | 40,90 | 51,72 |
| Исходная руда  | 100,00 | 0,290      | 0,170 | 0,013 | 0,620   | 0,102   | 0,042   | 100,0         | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |

металлы (0,83–0,99), что подтверждается данными оценки корреляционной связи между ними (табл. 1).

В процессе изучения представительной выборки кусков с помощью АПР определены предельные технологические показатели сепарации руды (табл. 2) [3, 7]. Как видно, РРС по  $\eta$  (Ni), а также РРС по  $\eta$  (Cu-Ni) обеспечивают практически одинаковые и наиболее высокие показатели обогащения с получением хвостов, содержащих 0,05 % Ni, 0,08 % Cu и 0,18 г/т суммы платиноидов при выходе 37,22–37,52 % и извлечении 6,88–15,33 %.

Испытания РРС всего объема керновой пробы крупностью –75+20 мм проводились с использованием более простого в практическом применении признака разделения  $\eta$  (Ni) на сепараторе нового поколения СРФ 1-100 производства ООО «СибРадос» с полупроводниковым Si-pin детектором (площадь чувствительного слоя 25 мм<sup>2</sup>), отличающимся высоким энергетическим разрешением линий Cu, Ni, Co.

В процессе испытаний из руды, содержащей 0,29 % Ni, 0,17 % Cu и 0,76 г/т суммы платиноидов, выделены отвальные хвосты с содержанием 0,086 % Ni, 0,053 % Cu и 0,22 г/т суммы платиноидов при выходе 32,45 % и весьма незначительных потерях с ними ценных компонентов 8,91–11,59 % (табл. 3).

При расчете технологических показателей сепарации выход отсева (–20 мм) был принят, исходя из справочных данных, равным 13,5 % [6], а содержание ценных компонентов в этом классе принято условно на уровне содержания в исходной руде.

Последующие флотационные исследования проводились в ООО «Институт Гипроникель» параллельно на исходной руде и на обогащенном продукте РРС, составленном из концентрата РРС и отсева. Опыты по флотации выполнялись в замкнутом цикле по единой схеме обогащения с получением концентрата одного и того же качества, определенного в соответствии с рекомендациями ТЭО временных разведочных конди-

**Таблица 4**  
**Фазовый состав Ni продуктов РРС**

| Продукт        | Выход, % | Содержание, %     |                  |                  | Извлечение, %     |                  |                  | Ni <sub>Sf</sub> / Ni <sub>Si</sub> |
|----------------|----------|-------------------|------------------|------------------|-------------------|------------------|------------------|-------------------------------------|
|                |          | Ni <sub>общ</sub> | Ni <sub>Sf</sub> | Ni <sub>Si</sub> | Ni <sub>общ</sub> | Ni <sub>Sf</sub> | Ni <sub>Si</sub> |                                     |
| Концентрат РРС | 67,55    | 0,39              | 0,320            | 0,070            | 90,42             | 96,10            | 71,18            | 4,6                                 |
| Хвосты         | 32,45    | 0,086             | 0,027            | 0,059            | 9,58              | 3,90             | 28,82            | 0,46                                |
| Руда           | 100,00   | 0,29              | 0,225            | 0,066            | 100,00            | 100,00           | 100,00           | 3,41                                |

**Таблица 5**  
**Сравнение основных технико-экономических показателей проекта по вариантам обогащения руды**

| Показатели  | Технологические процессы обогащения |                |                |
|---|-------------------------------------|----------------|----------------|
|   | Флотация                            | РРС + флотация | РРС + флотация |
| Производительность рудника (по руде), тыс, т/год                  | 2100                                | 2100           | 2950           |
| Производительность ОФ (по руде), тыс, т/год                       | 2100                                | 1500           | 2100           |
| Эксплуатационные расходы на 1 т руды, всего, руб,<br>в том числе: | 1917,9                              | 1829,4         | 1746,0         |
| себестоимость основного обогатительного цикла                     | 274,5                               | 201,6          | 190,8          |
| себестоимость РРС   |                                     | 20,1           | 19,5           |
| Стоимость товарной продукции среднегодовая, всего, млн руб,       | 5293                                | 5029           | 6857           |

ций на уровне 6 % Ni. Сопоставление полученных технологических показателей указывает на более высокое сквозное извлечение Ni (56,69 %), Cu (71,10 %) и платиноидов (48,28–68,41 %) из обогащенного продукта РРС по сравнению с показателями, полученными из исходной руды: извлечение Ni (52,86 %), Cu (65,53 %), платиноидов (44,32–67,01 %) (табл. 3).

Полученный эффект — прирост извлечения по Ni (3,83 %), Cu (5,57 %), Pd (1,40 %), Pt (2,96 %) и Au (3,96 %), объясняется тем, что в результате РРС в продуктах изменяется соотношение сульфидной и неизвлекаемой силикатной формы ценных минералов. В частности для никеля это соотношение в обогащенном продукте РРС составляет 4,6, а для хвостов РРС — 0,46 (табл. 4).

Результаты ICP MS анализов показали, что в концентрат предварительного радиометрического обогащения извлекается 90 % Ni, 96 % Cu, 92 % Pd и около 100 % Au.

Таким образом, проведенные исследования показали возможность эффективного использования радиометрических методов для предварительного обогащения комплексных платино-медно-никелевых руд для решения таких задач, как сокращение количества и повышение качества руды, поступающей на глубокое обогащение.

Следует отметить, что представленные в табл. 3 показатели радиометрической сепарации, рассчитанные с учетом условно принятого содержания полезных компонентов в «отсеве» (класс -20 мм), равным среднему в исходной руде, занижены, поскольку в мелких классах происходит обогащение сульфидами при дроблении руды.

При обогащении проб вкрапленных руд периода 2008–2012 гг. по традиционной флотационной схеме получен значительный разброс технологических показателей по извлечению полезных компонентов при высоких содержаниях в хвостах (никель 0,15–0,18 %), что указывает на нестабильность технологических свойств руды, главным образом в связи с вариациями фазового состава никельсодержащих минералов — первичных и вторичных (силикатов, сульфидов, оксидов). Применение рентгенорадиометрической сепарации позволит стабилизировать состав продуктов РРС, так как разброс содержания общего никеля, по которому идет сепарация, существенно меньше вариаций фазового состава.

Оценка экономической эффективности радиометрической сепарации выполнена Петраш Н.Г. (ЦНИГРИ) при различных вариантах решений по руднику и обогатительной фабрике и представлена в табл. 5.

При традиционной схеме переработки методом флотации производительность обогатительной фабрики и рудника идентичны (согласно ТЭО 2012 г. — 2100 тыс. т руды в год). В случае применения РРС сокращается объем руды, подаваемой на глубокое обогащение (примерно на 30 %). Соответственно производительность обогатительной фабрики должна составить 1500 тыс. т руды в год. Эксплуатационные расходы на переработку 1 т руды (добыча, обогащение, металлургия) при применении предварительного обогащения сокращаются на 88,5 руб. (4,6 %), в том числе на стадии обогатительного передела — на 72,9 руб. (26,5 %).

При сохранении производительности фабрики на уровне 2100 тыс. т для переработки на ней не исходной товарной руды, а концентрата РРС, производительность рудника должна составлять 2950 тыс. т руды в год. В этом случае годовая стоимость товарной продукции увеличивается на 1564 млн руб. (29,5 %) в сравнении с первоначальным вариантом переработки (флотацией). Эксплуатационные расходы на 1 т руды при этом снижаются на 171,9 руб. (9 %), в том числе на обогатительном переделе — на 83,7 руб. (30,5 %).

Таким образом, целесообразность введения в технологический процесс предварительного обогащения методом рентгенорадиометрической сепарации (РРС) вкрапленных руд месторождения Вуручайвенч не вызывает сомнений. Вместе с тем показатели РРС требуют уточнения. В первую очередь необходимо получить достоверную характеристику гранулометрического

состава товарной руды, уточнить с учетом экономических требований величину порога разделения.

Перед практическим использованием комплексной технологии обогащения руд участка Пласт 330 необходимо проведение дополнительных исследований на кусковом, а не на керновом материале, а также на пробах с разных участков рудного тела с различной долей неизвлекаемого никеля.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Кряжев, С.Г. Глубинное строение и процесс формирования континентальной коры северо-восточной части Балтийского щита / С.Г. Кряжев и др. // Геохимия. — 2011. — № 1. — С. 101–107.
2. Методические рекомендации № 102 «Отбор технологических проб при геологоразведочных работах на рудные полезные ископаемые» — М.: НСОМТИ ВИМС, 2014.
3. Методические рекомендации № 103 «Оценка обогатимости руд черных и легирующих металлов методами крупнокусковой сепарации». — М.: НСОМТИ ВИМС, 2014.
4. Мокроусов, В.А. Теоретические основы радиометрического обогащения радиоактивных руд / В.А. Мокроусов, Г.Р. Гольбек, О.А. Архипов. — М.: Недра, 1968. — 172 с.
5. Мокроусов, В.А. Радиометрическое обогащение нерадиоактивных руд / В.А. Мокроусов, В.А. Лилеев. — М.: Недра, 1979. — С. 31 — 50.
6. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы / Под редакцией О.С. Богданова, В.А. Олевского. 2-е изд. — М.: Недра, 1982. — 105 с.
7. Требования к изучению радиометрической обогатимости минерального сырья при разведке месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых. — М.: ГКЗ РФ, 1993. — 26 с.
8. Якубович, А.Л. Ядерно-физические методы анализа и контроля качества минерального сырья / А.Л. Якубович, В.К. Рябкин. — М.: Недра, 2007. — 206 с.

© Коллектив авторов, 2018

Карпенко Игорь Алексеевич // soteo@yandex.ru  
Цымбалист Сергей Игоревич // ooox1@yandex.com  
Рябкин Виктор Константинович // rmo-vims@mail.ru  
Литвинцев Эдуард Георгиевич // rmo-vims@mail.ru  
Куликов Данила Алексеевич // soteo@yandex.ru  
Хашковская Татьяна Николаевна // tnhas@nikel.spb.ru  
Ратнер Вадим Борисович // rmo-vims@mail.ru

УДК (696.6+628.9 622.143) (075.8)

Башкуров А.Ю. (МГРИ-РГГРУ)

### МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ПОГРУЖНЫМ НАСОСНЫМ АГРЕГАТОМ

В работе предложена структура управления режимом работы скважинного насосного агрегата, обеспечивающая экономию электроэнергии и ресурсосбережение, исключая абразивное воздействие песка на лопатки насоса за счет плавного регулирования скорости электродвигателя. Целью работы является создание модели системы управления погружным насосным агрегатом. **Ключевые слова:** насосный агрегат, частотно-регулируемый привод.

Bashkurov A.Yu. (MGRI-RGGRU)

### SIMULATION OF THE CONTROL SYSTEM OF THE SUBMERSIBLE PUMP UNIT

*Proposed management structure and mode of operation of the downhole pump unit, ensuring energy saving and resource saving, eliminating the abrasive effect of sand on the blades of*

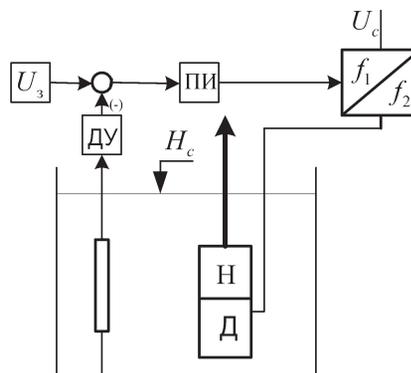
*the pump due to variable regulation of the speed of the motor. The aim of this work is to create a model of the control system of the submersible pump unit. Keywords: pumping unit, variable frequency drive.*

Функционирование скважин характеризуется переменным притоком, сопровождающимся изменением статического напора  $H_c$ . Переменный уровень жидкости в скважине связан с потерями электроэнергии. Таким образом, возникает необходимость стабилизации уровня жидкости на высоких отметках.

В современных отечественных и зарубежных системах регулирование режимов работы насосных установок осуществляется посредством автоматизированного регулируемого электропривода [1]. В таких системах регулируемым параметром является уровень жидкости в скважине, значение которого выбирается исходя из следующих соображений. С энергетической точки зрения уровень следует поддерживать на самой высокой отметке, т.к. это уменьшает статическую высоту подъема жидкости. Однако при этом следует учитывать величину притока в скважину, т.к. высоко заявленный уровень может не соответствовать притоку жидкости. Это может привести к сбою системы автоматической стабилизации уровня жидкости. Схема стабилизации уровня жидкости в скважине рассмотрена на примере системы, изображенной на рис. 1, а процесс стабилизации — на рис. 2.

Процесс стабилизации уровня жидкости в скважине рассмотрен на напорных характеристиках трубопровода и насоса. Допустим, что в некоторый момент времени насос работает с угловой скоростью  $\omega_1$  и обеспечивает подачу  $Q_1$  и напор  $H_1$ . Этому режиму соответствует уровень жидкости в резервуаре или скважине  $h_{зад}$  и приток  $q_1$ . Предположим, что в следующий момент времени приток изменится в сторону уменьшения и станет равным  $q_2$ . Тогда из-за несоответствия притока и откачки  $q_2 < Q_1$  уровень воды в скважине снизится на некоторое значение  $\Delta h$ .

Таким образом, увеличится статическая составляющая напора, а характеристика трубопровода займет положение D. При этом подача насоса уменьшится до



**Рис. 1. Схема стабилизации уровня жидкости в скважине:**  $U_3$  — сигнал задания по уровню жидкости; ПИ — пропорционально-интегральный регулятор; ДУ — преобразователь датчика уровня; Н — насосная часть агрегата; Д — двигательная часть агрегата