

Лебедев А.Н., Кобзев А.С., Куличенко А.В. (ООО «Русское горно-химическое общество»)

СРАВНЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ОБОГАЩЕНИЯ БРУСИТОВОЙ РУДЫ РАДИОМЕТРИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ СЕПАРАЦИИ

*В статье приведены результаты испытаний по крупнокусковому обогащению бруситовой руды Кульдурского месторождения различными методами радиометрической сепарации: фотометрический, ближне-инфракрасный, рентгеноабсорбционный. Проведенные испытания показали, что руда Кульдурского месторождения обогатима всеми методами, однако оптимальным является рентгеноабсорбционная сепарация, которая позволяет получить высококачественные продукты из низко- и среднекачественного сырья. **Ключевые слова:** бруситовая руда, радиометрическое обогащение, рентгенорадиометрическая сепарация, фотометрическая сепарация, ближне-инфракрасная сепарация, рентгеноабсорбционная сепарация.*

Lebedev A.N., Kobzev A.S., Kulichenko A.V. (Russian Mining and Chemical Society)

COMPARISON OF EFFICIENCY OF BRUSITE ORE CONCENTRATION BY RADIOMETRIC SEPARATION METHODS

*The article presents the results of tests on large-lump dressing of brucite ore from the Kuldur deposit by various methods of radiometric separation: color sorting, near-infrared sorting, X-ray transmission. The tests carried out showed that the ore of the Kuldur deposit can be enriched by all methods, however, the optimal one is X-ray transmission separation, which makes it possible to obtain high-quality products from low- and medium-quality raw materials. **Keywords:** brucite ore, sensor-based sorting, X-ray fluorescent sorting, color sorting, optical sorting, near-infrared sorting, X-ray transmission sorting.*

Повышение пожарной безопасности используемых материалов в строительной и транспортной отраслях является основным трендом последних лет. Это обеспечивается применением трудногорючих пластиковых материалов, таких как кабели, фасадные панели, элементы интерьера и другие с высоким содержанием антипиренов — добавок, затрудняющих горение и снижающих количество и токсичность дыма.

Одним из перспективных видов антипирена является гидроксид магния $Mg(OH)_2$, который выполняет две функции: предотвращает развитие пламени и снижает количество выделяемого дыма. При нагревании он вызывает вспучивание поверхности пластикового изделия, выделяет воду в виде пара, поглощает тепло и создает защитную поверхность из оксида магния MgO , которая работает как теплоизолятор, препятствующий проникновению потока тепла внутрь изделия и оста- навливающий процесс горения.

Таблица 1
Требования к химическому составу бруситовой руды Кульдурского месторождения

Сорт руды	Содержание, %			
	MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
БРК-1	>64	<1,5	<1,5	<0,15
БРК-2	>64	<2,5	<2,0	<0,20
БРК-3	>62	<3,0	<3,0	<0,35
IV	>60	<4,0	<8,0	<1,00
V	>55	не лимит.	не лимит.	не лимит.

Производство гидроксида магния возможно двумя способами: синтетическим и из природного сырья. Сырьем для синтетического гидроксида магния являются продукты с относительно малым содержанием магния: магнезиты и серпентины, морская вода. Получаемые продукты отличаются высокой химической чистотой, эффективностью, но и очень высокой ценой. Гидроксид магния на основе природного сырья производится из относительно редкого минерала брусита, химическая формула которого $Mg(OH)_2$.

Единственное в России эксплуатируемое месторождение брусита — Кульдурское располагается в Облученском районе Еврейской Автономной области. Годовой объем добываемой руды составляет ~ 300–350 тыс. т. Вмещающие породы представлены магнезитом, доломитом, серпентинитом, кальцифирами, офикальцитами, железистыми сланцами. В пределах рудного тела встречаются дайки бостонитов и диоритовых порфиров. Примесными (вредными) компонентами руды являются CaO, SiO₂, Fe₂O₃. При эксплуатационной разведке и добыче в зависимости от содержания оксида магния и примесных компонентов выделяются пять сортов руды (табл. 1).

От качества перерабатываемой руды напрямую зависит качество получаемых товарных продуктов и область их применения (табл. 2). Руда сортов БРК-1, БРК-2 и БРК-3 пригодна для производства электротехнических периклазовых порошков и высококачественных огнеупорных изделий. Бруситовая руда IV-V может быть использована в агросекторе в качестве добавок удобрений и в металлургии в качестве флюса.

Для доведения качества руды до потребительских требований на Кульдурском руднике применяется обогащение. Исходная руда направляется на дробильно-сортировочный комплекс (ДСК-1), где производится дробление исходной руды максимальной крупностью 800–600 мм до 200 мм и грохочение на фракции крупности 0–10; 10–30; 30–60 и 60–200 мм. Опыт эксплуатации показывает, что на ДСК-1 происходит незначительное повышение качества крупнокусковой фракции в результате избирательного измельчения при буровзрывной отбойке. Содержание CaO и SiO₂ в отсева (фракция 0–10 мм) в 1,26 и 1,48 раза выше, чем в исходной руде. Суточная производительность ДСК-1 составляет ~1000–1200 т. Усредненный гранулометрический состав руды после ДСК-1 приведен в табл. 3.

Таблица 2
Требования к качеству товарных продуктов Кульдурского рудника

Марка товарного продукта	Область применения	Содержание, %			
		MgO	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃
БК-1	Безгалогенные кабели, АКП панели	>65,5	<2,5	<1,5	<0,13
БК-2	Безгалогенные кабели, АКП панели, отбелка целлюлозы	>62,0	<2,5	<1,5	<0,30
БК-3	ПВХ-кабели, очистка сточных вод, десульфуризация дымовых газов	>62,0	<3,0	<3,0	<0,35
БКМ	Производство аммиачной селитры, НРК-удобрения, корма	>60,0	<4,0	<4,0	<0,50
БКМ-2	Производство сульфата магния и металлургия	>60,0	<4,0	<6,0	<0,50
Флюмаг	Металлургия	>58,0	<5,0	<6,0	<1,00

Таблица 3
Усредненный гранулометрический состав руды после ДСК-1

Фракция крупности, мм	Выход, %
60–200	43,0
30–60	27,4
10–30	13,2
0–10	16,4

Фракции крупности 0–10; 10–30; 30–60 мм являются товарными продуктами, которые направляются на отгрузку потребителям.

Фракция крупности 60–200 мм направляется на ДСК-2, где производится обогащение рентгенометрическим методом (РРС) с помощью четырехручьевых сепараторов СРФ 4-150 (3 ед.) и трехручьевого СРФ 3-300 (1 ед.), последующее дробление и грохочение обогащенного продукта на фракции крупности 0–10; 10–30 и 30–80 мм. Суточная производительность ДСК-2 составляет ~400–600 т.

Применение РРС в данной технологической схеме имеет ряд недостатков. Во-первых, на фракции крупности 60–200 мм пропускная способность по питанию одного ручья сепаратора составляет 1,5–1,8 т/ч. На более мелких

фракциях крупности производительность существенно ниже, что ограничивает экономически приемлемую глубину обогащения и в целом производительность предприятия.

Во-вторых, особенностью рентгенометрического метода является невозможность регистрации элементов с порядковым номером в таблице Менделеева ниже 20. В связи с этим разделительный признак рентгенометрических сепараторов для руд Кульдурского месторождения базируется на характеристическом излучении железа и кальция. Фактически применение данного метода не позволяет контролировать в товарной продукции содержание ценного компонента — MgO и одной из вредных примесей — кремния.

В-третьих, применяемые сепараторы СРФ оснащены пропорциональными счетчиками, которые по сравнению с полупроводниковыми детекторами характеризуются низкой чувствительностью и разрешающей способностью, в силу чего концентраты РРС имеют малые коэффициенты обогащения.

Анализ производственных показателей (рис. 1) свидетельствует, что с помощью РРС сепараторов возможно повышение качества низкосортного (БКМ, БКМ-2) и некондиционного питания на одну-две (реже три) марки. Однако при переработке высококачественного сырья эффективность сепарации снижается. В частности, менее чем в половине случаев возможно повысить качество питания марки БК-3 до БК-2, а повысить качество товарной продукции БК-2 до марки БК-1 применяемой технологией невозможно.

Данные факторы ограничивают возможность получения высококачественных продуктов, пригодных для производства антипиренов. Для решения данной проблемы с 2018 г. управляющей компанией Кульдурского бруситового рудника ООО «РГХО» решается задача по разработке максимально эффективной технологии обогащения брусита.

В мировой практике предприятия, добывающие магнезиальное сырье, для обогащения руды применяют рентгеноабсорбционный (ХРТ) [1, 3] и фотометрический (ФМС) [4, 5] методы сепарации. Следует отметить, что небольшие предприятия в Китае, добывающие бруситовые руды, применяют ручную

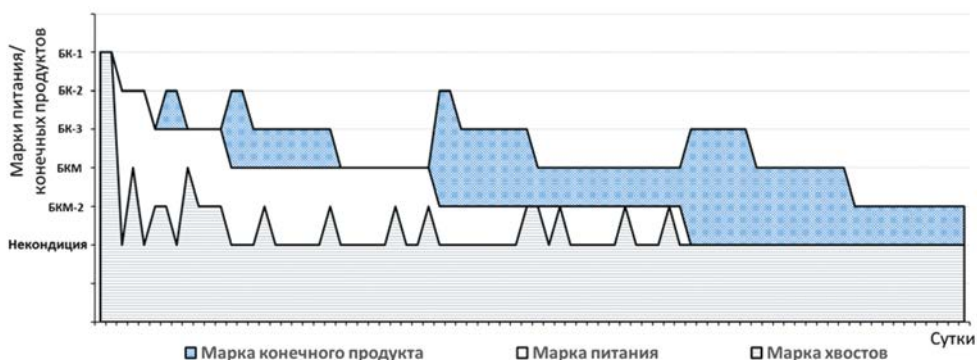


Рис. 1. Производственные показатели работы РРС. Данные упорядочены по качеству питания ДСК-2

рудоразборку. В рамках решения задачи разработки эффективной технологии ООО «РГХО» были выполнены испытания ближнеинфракрасным (near infrared, NIR), фотометрическим и рентгеноабсорбционным методами крупнокускового обогащения.

NIR сепарация

Ближнеинфракрасный метод сепарации базируется на различии поглощения минералами излучения в ближнеинфракрасном спектре (в области между 1300 нм и 2550 нм), которое изменяется в зависимости от наличия в кристаллической решетке минералов гидроксильной группы (ОН⁻), воды, карбонатов (СО₃²⁻) и т.д. Примерами NIR-детектируемых минералов являются: карбонаты — доломит, магнезит, кальцит; силикаты — хлориты, серпентиниты, амфиболы; сульфаты — гипс, алуниит, ярозит; гидроксиды — брусит, гетит. Метод применяется с конца 1990-х — начала 2000-х годов, однако уже получил широкое распространение при переработке вторичного сырья. Также как и ФМС данный метод чувствителен к чистоте поверхности материала.

Испытания NIR сепарации выполнялись на базе производителя оборудования BT-Wolfgang Binder GmbH (Австрия) на двух пробах (табл. 4) с предварительной промывкой питания сепарации.

Как следует из табл. 4, NIR сепарация позволяет только повысить содержание магния, однако содержание вредных примесей меняется незначительно. Следовательно, данный метод пригоден только для доводки продуктов без примесей.

Фотометрическая сепарация

Фотометрический метод сепарации основан на регистрации оптических характеристик материала и широко применяется с середины XX в. при переработке рудного, вторичного сырья и сельскохозяйственных культур. Данный

метод позволяет определять только поверхностные характеристики материала и требует промывки кусков руды от грязи, пыли, шламовых пленок, что весьма затруднительно в условиях отрицательных температур окружающей среды, которые характерны для большей части года в районе Кульдурского месторождения. Применительно к рудам Кульдурского месторождения признак разделения фотометрического метода базировался на различии цветовой окраски продуктивных и «пустых» по ценному компоненту минералогических разностей.

Таблица 4
Результаты NIR сепарации с промывкой питания

Проба	Продукт сепарации	Выход, %	Содержание, %			Марка	Извлечение MgO, %	K _{обг}	
			MgO	CaO	SiO ₂			CaO	SiO ₂
1	Концентрат	60,0	66,14	3,34	1,46	БКМ	61,4	0,87	0,62
	Хвосты	40,0	62,57	4,58	3,71	БКМ-2	38,6	1,19	1,57
	Исходный	100,0	64,72	3,83	2,36	БКМ	100,0		
2	Концентрат	46,1	65,85	3,48	1,30	БКМ	47,8	0,89	0,52
	Хвосты	53,9	61,42	4,30	3,57	БКМ-2	52,2	1,10	1,41
	Исходный	100,0	63,46	3,92	2,53	БКМ	100,0		

Таблица 5
Результаты фотометрической сепарации с промывкой питания

Проба	Продукт сепарации	Выход, %	Содержание, %			Марка	Извлечение MgO, %	K _{обг}	
			MgO	CaO	SiO ₂			CaO	SiO ₂
1	Концентрат	68,7	65,94	1,37	0,59	БК-1	69,4	0,82	0,39
	Хвосты	31,3	63,74	2,33	3,60	БКМ	30,6	1,40	2,35
	Исходный	100,0	65,25	1,67	1,53	БК-3	100,0		
2	Концентрат	46,9	64,97	2,09	1,77	БК-3	47,3	0,85	0,74
	Хвосты	53,1	63,85	2,78	2,96	БК-3	52,7	0,13	1,23
	Исходный	100,0	64,38	2,46	2,40	БК-3	100,0		
3	Концентрат	46,9	66,24	0,75	1,59	БК-3	47,6	0,89	0,51
	Хвосты	53,1	64,30	0,90	3,94	БКМ	52,4	1,06	1,27
	Исходный	100,0	64,99	0,85	3,11	БКМ	100,0		

Таблица 6
Результаты фотометрической сепарации без промывки питания

Проба	Продукт сепарации	Выход, %	Содержание, %			Марка	Извлечение MgO, %	K _{обг}	
			MgO	CaO	SiO ₂			CaO	SiO ₂
1	Концентрат	81,1	66,04	1,59	0,76	БК-1	81,8	0,85	0,50
	Хвосты	18,9	63,08	3,00	4,72	БКМ-2	18,2	1,61	3,13
	Исходный	100,0	65,48	1,86	1,51	БК-3	100,0		
2	Концентрат	82,8	64,33	1,89	2,18	БК-3	83,0	0,91	0,92
	Хвосты	17,2	63,30	3,01	3,35	БКМ-2	17,0	1,44	1,41
	Исходный	100,0	64,15	2,08	2,38	БК-3	100,0		
3	Концентрат	75,4	65,47	1,11	2,41	БК-3	75,8	1,02	0,82
	Хвосты	24,6	64,15	1,03	4,54	БКМ-2	24,2	0,94	1,55
	Исходный	100,0	65,15	1,09	2,93	БК-3	100,0		

Таблица 7
Плотность наиболее распространенных минералов руд
Кульдурского месторождения

Минералы	Плотность, г/см ³
Брусит	2,3–2,4
Минералы группы серпентина	2,6–2,8
Доломит	2,8–2,9
Кальцит	2,7

Испытания фотометрического метода сепарации выполнялись в испытательном центре компании Mogensen (Германия) на трех лабораторных пробах в двух режимах: с промывкой и без нее (табл. 5 и 6).

На основании проведенных испытаний ФМС установлено, что данный метод позволяет выделять кремнийсодержащие продукты. Содержание MgO в концентрате сепарации повышается незначительно при достаточно высоких потерях его с хвостами сепарации. Применение промывки позволяет снизить потери MgO с хвостами, однако усложняет технологическую схему, требует более высоких операционных затрат и имеет сезонные ограничения, связанные с климатическими особенностями региона.

XRT сепарация

Рентгеноабсорбционный метод является проникающим и позволяет распознавать в куске скрытую минерализацию. Примером данного метода являются сканирующие системы, используемые службами безопасности при досмотре багажа в аэропортах. Метод применяется для предварительного обогащения алмазных, золотосодержащих, вольфрамовых и оловянных руд, угля и при переработке вторичного сырья [2, 6]. Технология не требует промывки и очистки поверхности кусков от грязи.

Признак разделения данного метода базировался на различии плотности минералов, слагающих руду и вмещающие породы (табл. 7). Как следует из табл. 7, плотность брусита ниже, чем «засоряющих» минералов.

Испытания проводились в испытательных центрах Steinert, Tomra Sorting (ФРГ) и ЗАО «Тране Текникк» (г. Электросталь, РФ).

Результаты испытаний в компании Steinert (табл. 8) показали, что XRT метод позволяет существенно снизить содержание CaO и получить продукцию высокого качества при достаточно высоком выходе. Однако пробы, на которых проводились испытания, характеризовались низким содержанием SiO₂, что не позволило оценить эффективность сепарации по данному компоненту. С целью определения эффективности метода XRT по удалению SiO₂ были проведены дополнительные испытания в компании Tomra (табл. 9). Данные испытания показали возможность удаления из руды вредных примесей. Однако исходная проба характеризовалась малым содержанием MgO. С целью проверки возможности решения обеих технологических задач (повышение содержания MgO и снижение содержания вредных примесей) были проведены контрольные испытания на сепараторе Tomra в испытательном центре компании Тране Текникк (табл. 10). Как следует из таблицы, проведенные испытания показали возможность как повышения качества концентрата, так и удаления вредных компонентов.

Таблица 8
Результаты XRT сепарации в испытательном центре Steinert

Проба	Продукт сепарации	Выход, %	Содержание, %			Марка	Извлечение MgO, %	K _{обг}	
			MgO	CaO	SiO ₂			CaO	SiO ₂
1	Концентрат	84,6	65,71	1,50	0,65	БК-1	87,3	0,58	0,87
	Хвосты	15,4	52,39	9,19	1,16	Неконд	12,7	0,55	1,55
	Исходный	100,0	63,82	2,59	0,75	БК-3	100,0		
2	Концентрат	78,1	64,86	1,75	1,19	БК-1	79,6	0,52	0,60
	Хвосты	21,9	59,29	9,60	4,91	Неконд	20,4	2,83	2,49
	Исходный	100,0	63,62	3,39	1,97	БКМ	100,0		

Таблица 9
Результаты XRT сепарации в испытательном центре Tomra

Проба	Продукт сепарации	Выход, %	Содержание, %			Марка	Извлечение MgO, %	K _{обг}	
			MgO	CaO	SiO ₂			CaO	SiO ₂
1	Концентрат	66,5	60,03	1,09	1,99	БК-3	73,1	0,38	0,30
	Хвосты	33,5	43,93	6,31	15,81	Неконд	26,9	2,22	2,38
	Исходный	100,0	54,63	2,84	6,63	БКМ-2	100,0		
2	Концентрат	46,3	60,43	0,83	1,69	БК-3	50,1	,32	0,31
	Хвосты	53,7	51,87	4,08	8,63	Неконд	49,9	1,59	1,59
	Исходный	100,0	55,83	2,57	5,42	БКМ-2	100,0		

Таблица 10
Результаты XRT сепарации на оборудовании Tomra в ИЦ Тране Текникк

Продукт сепарации	Выход, %	Содержание, %			Марка	Извлечение MgO, %	K _{обг}	
		MgO	CaO	SiO ₂			CaO	SiO ₂
Концентрат	87,2	66,30	2,03	1,40	БК-1	89,9	0,68	0,62
Хвосты	12,8	50,77	9,40	8,06	Неконд	10,1	3,16	3,57
Исходный	100,0	64,31	2,98	2,26	БК-3	100,0		

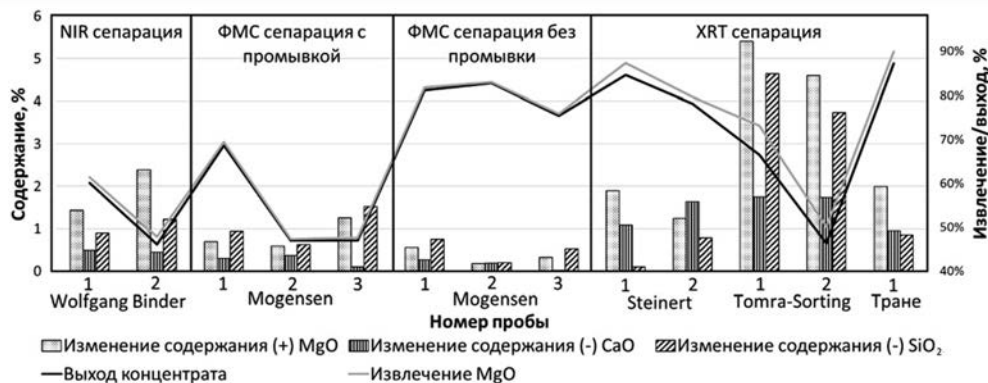


Рис. 2. Сравнение результатов испытаний методами NIR, ФМС и XRT сепарации

Выводы

Проведенные испытания показали, что руда Кульдурского месторождения обогатима фотометрическим, ближнеинфракрасным и рентгеноабсорбционным методами сепарации. Сравнение результатов испытаний NIR, ФМС и XRT методов сепарации приведено на рис. 2. Столбцы характеризуют изменение содержания основных компонентов в обогащенном продукте относительно питания сепарации.

Как следует из рис. 2, концентраты XRT сепарации характеризуются более высоким изменением содержания ценного (MgO), так и примесных (CaO и SiO₂) компонентов. При сопоставимом изменении содержания ценного и примесных компонентов XRT метод имеет более высокий выход обогащенного продукта (XRT сепарация в Тране Текникк и NIR сепарация). При сопоставимом выходе обогащенного продукта (ФМС без промывки и XRT) результаты XRT сепарации характе-

ризуются большим изменением содержания ценного и примесных компонентов в обогащенном продукте. При этом метод позволяет получить высококачественный продукт марки БК-1 из низко- и среднекачественных марок (БКМ-2, БКМ).

ЛИТЕРАТУРА

1. Аксельрод, Л.М. Обогащение магнетита Саткинского месторождения рентгенодифракционным методом / Л.М. Аксельрод, М.Ю. Турчин, М.И. Назмиев, Е.В. Мануйлова, И.И. Галиханов. // Новые огнеупоры. — 2016. — № 6. — С. 8–12.
2. Кобзев, А.С. Радиометрическое обогащение минерального сырья / А.С. Кобзев. — М.: Издательство «Горная книга», 2015. — 125 с.
3. Уфимцева, Н. Рентген сменил суспензию / Н. Уфимцева // Магнетитовец. — 2017. — № 15. (6316). — С. 5.
4. Galos, K. Magnesite and magnesia / E. Lewicka (Ред.) Market analysis of selected raw materials for the ceramic and glass industries in Poland over the years 1990–2012 / K. Galos. — Krakow: Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energi PAN, 2014. — 127 с.
5. Pre-beneficiation & Main beneficiation // Grecian magnesite.com URL: <http://www.grecianmagnesite.com/company/production-process/pre-beneficiation-main-beneficiation> (дата обращения: 30.04.2020).
6. Robben, Ch. Sensor-Based Ore Sorting Technology in Mining — Past, Present and Future / Ch. Robben, H. Wotruba // Minerals. — 2019. — Vol. 9 — № 9. URL: <https://www.mdpi.com/2075-163X/9/9/523/htm> 523 (дата обращения: 12.05.2020).

© Лебедев А.Н., Кобзев А.С., Куличенко А.В., 2021

Лебедев Алексей Николаевич // ALebedev@brucite.plus,
Кобзев Алексей Сергеевич // kobzev@brucite.plus,
Куличенко Александр Владимирович // AKulichenko@brucite.plus

УПРАВЛЕНИЕ И ЭКОНОМИКА

УДК 553.43

Смольникова А.В., Лаптева А.М. (ФГБУ «ВИМС»)

МИРОВАЯ МЕДНАЯ ПРОМЫШЛЕННОСТЬ В УСЛОВИЯХ РОСТА СПРОСА НА МЕТАЛЛ — ВОЗМОЖНОСТИ И ПЕРСПЕКТИВЫ

В статье рассмотрена структура мирового потребления меди, выполнен анализ различных прогнозов потребления меди, дана характеристика рудничного производства меди по странам. На основании анализа данных по более чем 275 разрабатываемым и подготавливаемым к эксплуатации месторождениям сделан прогноз производства меди в период до 2035 г. и баланса спроса и предложения меди на мировом рынке в этот период. Показано, что до 2030 г. при любых прогнозируемых темпах

потребления меди ее дефицита на рынке не ожидается; также маловероятен дефицит и в дальнейшей перспективе. **Ключевые слова:** медь, потребление, производство, проекты освоения, прогноз, «зеленые» технологии.

Smolnikova A.V., Lapteva A.M. (VIMS)

WORLD COPPER INDUSTRY UNDER CONDITIONS OF GROWING CONSUMPTION: OPPORTUNITIES AND PROSPECTS

The article examines the structure of world copper consumption, analyzes the forecasts of copper consumption, gives a characteristic of copper mining by country. Based on the analysis of data on more than 275 developed and prepared for exploitation copper deposits, a forecast of copper production in the period up to 2035 and the balance of supply and demand of copper in the world market during this period was made. It is shown that until 2030, at any projected rates of