



CONCENTRACIÓN POR FLOTACIÓN DE MINERALES QUE CONTIENEN TIERRAS RARAS: UNA REVISIÓN.

Oswaldo Pavez, Luis Valderrama, Bruno Zazzali

Departamento de Metalurgia – Universidad de Atacama – Av. Copayapu 485 – Copiapó.

RESUMEN

Los elementos de tierras raras son 17 elementos con números atómicos del 57 al 71, desde lantano hasta lutecio, más el itrio y escandio, que son químicamente similares. Las tierras raras son componentes de más de 250 minerales diferentes, de los cuales aproximadamente 55 son minerales típicos que contienen elementos de tierras raras. Actualmente, los principales minerales que se utilizan en la industria para obtener tierras raras son: monacita, bastnasita y xenotimio. En Chile, entre la Región de Antofagasta y del Biobío, se han encontrado sectores que presentan minerales portadores de tierras raras, así como también, se han detectado estos elementos en relaves y ripios. De este modo, la presencia de tierras raras en nuestro país podría significar la incorporación de una nueva alternativa para la minería con un potencial económico interesante. Con el propósito de contribuir al conocimiento sobre el beneficio de los minerales que contienen estos elementos, en el presente trabajo se realiza una revisión de los procesos de flotación que se aplican a nivel mundial, en el tratamiento de estos minerales.

ABSTRACT

Rare earth elements are 17 elements with atomic numbers from 57 to 71, from lanthanum to lutetium, plus yttrium and scandium, which are chemically similar. Rare earths are components of more than 250 different minerals, of which approximately 55 are typical minerals that contain rare earth elements. Currently, the main minerals used in the industry to obtain rare earths are: monacite, bastnasite and xenothym. In Chile, between the Antofagasta and Biobío Region, sectors that have rare earth-bearing minerals have been found, as well as these elements have been detected in tailings and rubble. Thus, the presence of rare earths in our country could mean the incorporation of a new alternative for mining with an interesting economic potential. With the purpose of contributing to the knowledge about the benefit of the minerals that these elements contain, in the present work a review of the flotation processes that are applied worldwide, in the treatment of these minerals is carried out.

1. INTRODUCCIÓN

Los tierras raras son producidos principalmente a partir de tres minerales levemente solubles ("salt type"): bastnasita, monacita y xenotimio. Los minerales levemente solubles se caracterizan por presentar una moderada solubilidad en agua y por sus enlaces iónicos. Se incluyen en este grupo, los carbonatos, fosfatos, sulfatos, tungstatos y algunos compuestos salinos. La separación selectiva de los minerales levemente solubles a partir de una mena que contiene varios de ellos, es difícil debido a la similitud entre las propiedades de superficie de los minerales. Por otra parte, debido al hecho de que estos minerales poseen una cierta solubilidad en agua, los iones constituyentes disueltos de uno o varios minerales pueden adsorberse sobre los otros minerales, tornando sus superficies aún más similares.

Las dificultades encontradas en la separación de minerales levemente solubles, pueden ser atribuidas a dos factores (1): 1) características químicas superficiales similares de los minerales, que puede resultar en adsorción no selectiva de los colectores; y 2) la precipitación no selectiva de los compuestos inorgánicos y orgánicos de esos minerales, que puede significar modificación en la superficie, de tal modo, que los minerales adquieren propiedades interfaciales similares.

Aplan et al. (2) señalaron los siguientes métodos para alcanzar la selectividad en la flotación de minerales levemente solubles: a) control de los iones determinantes de potencial; b) uso de cationes y colectores específicos; c) activación selectiva; d) depresión selectiva; e) modificación de la característica de la espuma; y f) dispersión selectiva.

Una importante separación en flotación comercial de tierras raras, involucrando minerales levemente solubles, es la flotación de bastnasita en presencia de baritina y calcita en la mena de Mountain Pass-California. En ese sistema se utiliza un colector aniónico del tipo carboxilato y los agentes modificadores carbonato de sodio, ligno-sulfonato y, algunas veces, fluorsilicato

de sodio. Un ejemplo complejo de flotación de minerales portadores de tierras raras es la recuperación de esos minerales de la mena de Baiyun-Ebo (China), que se caracteriza por contener una gran cantidad de especies minerales. En esa mena, los principales minerales de tierras raras se encuentran inter crecidos íntimamente con minerales de hierro, fluorita y minerales de ganga, que incluyen, principalmente, carbonatos, silicatos, sulfatos y fosfatos. Debido a la liberación fina de los minerales portadores de tierras raras, la mayoría de ellos están en el producto de la molienda en tamaño inferior a 40 micrómetros, lo que torna complejo el procesamiento (3, 4).

En la flotación de minerales de tierras raras los colectores más usados son los ácidos grasos y sus jabones y, los ácidos hidroxámicos y sus sales. Otros colectores, que también han sido considerados, son los sulfonatos, sulfatos, sulfosuccinamatos, aminas y ácidos fosfóricos orgánicos.

Ácido oleico y ácidos hidroxámicos han sido muy usados como colectores en la separación de minerales de tierras raras en China (5). En Rusia los ácidos hidroxámicos son utilizados ampliamente en la flotación de minerales que contienen tierras raras, tántalo-niobio, tungsteno, etc. (6). Estudios desarrollados en Mountain Pass, por Fuerstenau et al. (7), mostraron que la flotación de bastnasita en presencia de minerales de ganga, tales como baritina y calcita, es más selectiva con colectores del tipo hidroxamatos que con ácidos grasos.

En la literatura se reportan como agentes modificadores para la flotación de minerales portadores de tierras raras: carbonato de sodio, ligno-sulfonato (sodio, amonio), fluorsilicato de sodio, sulfuro de sodio, silicato de sodio, fluoruro de sodio, oxalato de sodio y soda cáustica.

Considerando que recientemente se ha reportado la presencia de tierras raras en relaves y rípios de Plantas de ENAMI de la Región de Atacama y Coquimbo (8), lo cual indicaría que hay yacimientos en nuestro país que contienen estos elementos químicos, a través del presente trabajo se pretende contribuir al conocimiento de estos minerales, presentando una revisión sobre los procesos de flotación que se aplican para

su concentración y los colectores que se utilizan.

2. CONCENTRACIÓN DE MINERALES DE TIERRAS RARAS

Bastnasita

En Mountain Pass, los concentrados de bastnasita son producidos por flotación a partir de una mena de tierras raras cuya composición química se presenta en la tabla I. Un flujograma simplificado de la Molycorp/Unocal Plant-Mountain Pass, California, se muestra en la figura 1, en el cual se consideran el flujograma original y las modificaciones que se hicieron posteriormente. Las mayores alteraciones realizadas al flujograma fueron: la modernización del circuito de molienda, el aumento en el número de acondicionadores y la adición de un circuito de remolienda. Los reactivos usados inicialmente eran carbonato de sodio (hasta pH=8,95), Orzan (ligno-sulfonato), ácido oleico y un agente acondicionador, todos ellos adicionados juntos en el acondicionador y calentada la pulpa a la temperatura de 60 °C. Posteriormente, los modificadores usados fueron: fluorsilicato de sodio (0,5 kg/t), vapor de agua y carbonato de sodio (3-4

kg/t) hasta pH=8,8 (9). El éxito de esta operación se encuentra en la habilidad para separar bastnasita de cuarzo, baritina, calcita y estroncianita, que son los minerales que están asociados al mineral de tierras raras. Los tres últimos minerales tienen propiedades superficiales muy similares.

Morrice y Wong (10) investigaron métodos para el beneficiamiento del mineral de Mountain Pass. La flotación de la pulpa a 40-45 °C permitió la obtención de un concentrado final que contenía 58,7% TR₂O₃ con una recuperación de tierras raras de 67%. Estos resultados mostraron una economía de energía, ya que son comparables a los producidos por el método industrial comercial, en el cual la pulpa se calienta hasta hervir, antes de la flotación. Los mejores resultados obtenidos en el trabajo de Morrice y Wong se consiguieron con los siguientes reactivos: Westvaco L-5 (mezcla de ácido graso-ácido rosínico) como colector, Orzan 805 (ligno-sulfonato de amonio) y fluoruro de sodio como depresores y carbonato de sodio como modificador de pH. Un concentrado de baritina, conteniendo aproximadamente 70% de BaSO₄, se obtuvo al flotar los relaves de la flotación rougher de bastnasita.

Tabla I. Composición química de la mena de Mountain Pass (10)

Componentes	%	Componentes	%	Componentes	%
OTR	7,5	MgO	2,7	S	3,9
BaSO ₄	21,2	Fe ₂ O ₃	2,2	Pb	0,3
SiO ₂	12,6	CO ₂	19,6	Th	0,02
CaO	18,5	P ₂ O ₅	0,5	Otros	1,0
SrO	4,5				

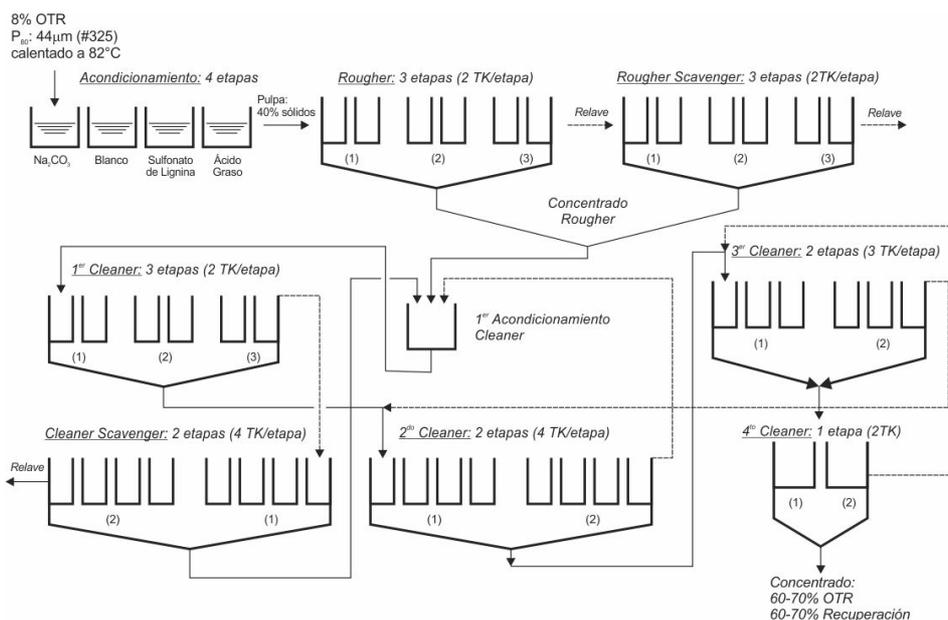


Figura 1. Diagrama de flujo simplificado para la recuperación de bastnasita en la Planta Molycorp/Unocal, Mountain Pass, California (9).

El papel del ligno-sulfonato en la flotación selectiva de bastnasita y baritina, empleando oleato de sodio como colector, fue estudiado a través de medidas de adsorción, técnicas electrocinéticas y pruebas de flotación por Gerdel y Smith (11). Los resultados obtenidos mostraron que el ligno-sulfonato funciona como depresor energético para baritina, siendo menor su efecto sobre la bastnasita. Estos autores sugirieron que el depresor probablemente se ajusta fácilmente a la estructura de la bastnasita. Así, resulta fácil la quimisorción del ligno-sulfonato en la baritina, actuando como un fuerte depresor de este mineral.

Por otra parte, Fuerstenau et al. (7), en una tentativa de encontrar un método de flotación alternativo para mejorar la recuperación y la ley del concentrado de la mena de Mountain Pass, concluyeron que se podían alcanzar mejores selectividades en esta mena empleando colectores del tipo hidroxamato (octil hidroxamato de potasio), si se comparaban con los del sistema corrientemente usado en la planta de flotación de Mountain Pass, que emplea como colector, ácidos grasos. Estos autores notaron que, a temperatura ambiente utilizando como colector ácidos grasos, la flotación es eficiente para los minerales

baritina, calcita y bastnasita, mientras que, al usar colectores de la familia de los hidroxamatos, se obtienen altas recuperaciones solamente para bastnasita, debido a que la adsorción de hidroxamatos es más selectiva en este mineral, que contiene cationes trivalentes de tierras raras, en relación a los minerales de ganga que presentan iones de metales alcalinotérreos divalentes (Ba^{2+} , Ca^{2+} y Sr^{2+}). Estos autores observaron también, que los hidroxamatos no solamente son colectores más selectivos que los ácidos grasos, a la temperatura ambiente, sino que también se tornan más selectivos a temperaturas más elevadas.

En Baiyun Ebo (también conocida como Bayan Obo o Baotou) localizada en el interior de la República de China, se encuentra el mayor depósito de bastnasita. Este depósito, la mayor mineralización de tierras raras del mundo, contiene alrededor de 36 millones de toneladas de óxidos de tierras raras y está constituido por más de 100 minerales, siendo la bastnasita y la monacita los principales minerales portadores de tierras raras (se encuentran en proporción de 2:1 (12)). La composición química de la mena de Baiyun Ebo se presenta en la tabla II.

Debido a la compleja composición mineralógica y la liberación fina de los minerales portadores de tierras raras, la mayoría de ellos están en el producto de la

molienda en tamaño inferior a 40 micrómetros, la mena de Baiyun Ebo es más difícil de concentrar que la de Mountain Pass.

Tabla II. Composición química de la mena de Baiyun Ebo (datos de 1984) (12).

Componentes	%	Componente	%	Componente	%
		S		S	
OTR	7,00	SiO ₂	13,62	K ₂ O	0,12
Fetotal	30,80	Mn	0,15	Na ₂ O	1,53
FeS	28,30	CaO	17,02	BaO	2,08
FeO	2,48	MgO	0,48	S	0,78
F	9,13	Al ₂ O ₃	0,40	TiO ₂	0,51
P	1.02				

Esta compleja mena de tierras raras, después de ser molida se somete a las diferentes etapas de concentración: concentración magnética de baja intensidad, flotación colectiva, separación magnética de alta intensidad, flotación y concentración gravitacional. En la primera etapa se retira la magnetita. Posteriormente en la flotación colectiva, se separan los minerales fluorita, calcita y baritina (concentrado) y, los óxidos de hierro (relave). Los reactivos de flotación usados fueron: carbonato de sodio, para regular el pH a 10,3; silicato de sodio como depresor de los óxidos de hierro y silicatos; y sulfonato de sodio como colector. Los minerales de bastnasita y monacita se encuentran en el relave junto a los óxidos de

hierro. Este producto va a una separación magnética de alta intensidad para retirar la hematita, posteriormente, el producto no magnético se somete a flotación. En la etapa de flotación, la pulpa se acondiciona con Aquamollin, depresor de óxidos de hierro, y con el colector HOE-F1415, derivado del ácido fosfórico. El concentrado que se obtiene es menor al 56% de OTR. En la última etapa, el concentrado de tierras raras se somete a separación gravitacional alcanzándose un producto final de alrededor de 60% de OTR, pero con una recuperación no satisfactoria (12). En la figura 2 se muestra el flujograma simplificado de la concentración de la mena de tierras raras de Baiyun Ebo.

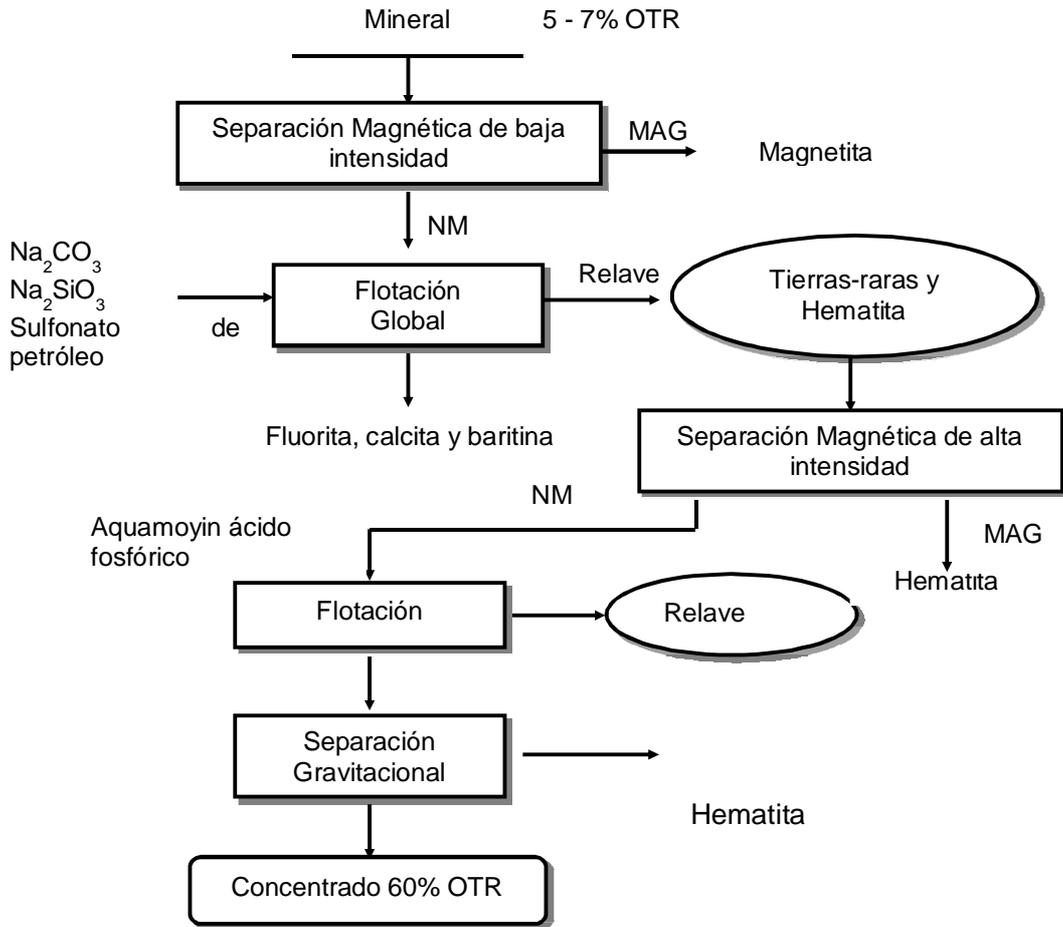


Figura 2. Diagrama de flujo simplificado de la concentración a escala industrial del mineral de Baiyun Ebo, China, en 1985 (12).

Jiake e Xiangyoung (13) propusieron una ruta alternativa para mejorar la concentración de esta mena de tierras raras, la cual les permitió obtener un concentrado con ley de 68% de OTR y una recuperación de 72,5%. De igual forma, Fangji, Juying y Xinglan (14) presentaron un esquema del proceso de flotación para el tratamiento de la mena compleja de Baotou. El producto molido (95% -74 micrómetros) fue sometido inicialmente a una flotación "bulk" con un colector del tipo ácido graso. Posteriormente, el producto, el cual contiene los minerales portadores de tierras raras (principalmente bastnasita y monacita), fluorita y otros minerales levemente solubles, se somete a lavado con agua. En una tercera etapa se considera el uso del colector H-205 (tipo hidroxamato) y de los agentes modificadores

metasilicato de sodio y carbonato de sodio, para la flotación de minerales de tierras raras. Se incluye en esta etapa una flotación rougher, una flotación scavenger y tres etapas cleaner. Una ley alta (OTR > 60%) y una ley secundaria (OTR > 30%) son obtenidas en los concentrados de los minerales portadores de tierras raras, con una recuperación total mayor a 72%. Los relaves, los cuales contienen principalmente fluorita y baritina, pueden ser tratados posteriormente.

Monacita

La monacita normalmente puede ser recuperada como un subproducto en la separación de estaño y titanio en las arenas de playa y, en algunos casos, depósitos tipo placer. Un flujograma generalizado del

proceso de concentración para la separación de ilmenita, leucoxeno, monacita, circonita, cuarzo y magnetita se muestra en la figura 3. Los flujogramas pueden ser muy diferentes de una planta a otra debido al alto grado de variación que presenta la mineralogía de las arenas de playas y depósitos del tipo placer (los cuales pueden contener 30 o más minerales diferentes) y a la selección de los equipamientos de la concentradora. A pesar de lo señalado, la mayoría de los circuitos tiene varios puntos en común. La concentración inicial se realiza en espirales, canaletas estranguladas, canaletas de impacto, conos Reichert o jigs (15). El concentrado del mineral pesado se somete a limpieza en una planta en seco. Algunas remociones adicionales de cuarzo y magnetita, se están presentes, son frecuentemente realizadas en húmedo. El producto es secado y enviado a separación electrostática de alta tensión para la remoción del material conductor. Esta separación es seguida de una separación magnética de alta intensidad que utiliza correas cruzadas o separadores del tipo rodillo inducido. Varias etapas, con el aumento sucesivo de la fuerza magnética, son usadas para la remoción de productos de baja susceptibilidad magnética. Si está presente xenotima, ésta se remueve de modo similar a la monacita, ya que ella es magnética y no conductora.

Un flujograma para la recuperación de monacita, wolframita y casiterita a partir de relaves de flotación de molibdenita se desarrolló, hace más de 50 años, por la Climax Co. para su mina de Amax. El flujograma incluía concentración gravitacional, separación magnética y flotación. El proceso de flotación para monacita se basa en la patente de

Cuthbertson (16). En este esquema, el colector utilizado es el acetato de amina de coco (Armac C), mientras que, el depresor para wolframita/minerales oscuros ("black minerals") es el almidón gelatinizado. Ácido sulfúrico se adiciona para alcanzar un pH=1,4 y la pulpa se calienta a 35 °C. El flujograma utilizado por la Climax Co fue posteriormente modificado (figura 4). Los cambios introducidos son discutidos en las referencias (17, 18).

Estudios de flotación de casiterita y de minerales de tierras raras fueron realizados por Wakamatsu (19), los resultados obtenidos se resumen en la tabla III. Se observa que los mejores resultados se obtuvieron cuando se utilizó sulfonato policíclico como colector y oxalato como activador.

La utilización de oleato de sodio y ácido oleico como colector en la flotación de monacita ha sido reportada en la literatura. Viswanathan et al. (20) investigaron la flotación selectiva de monacita de arenas de playa estudiando las condiciones para separar monacita de ilmenita, rutilo, granada, circonita, sillimanita y cuarzo. Los resultados obtenidos mostraron que, con el uso de silicato de sodio como depresor, en la presencia de oleato de sodio, rutilo, ilmenita, zircón y sillimanita son completamente deprimidos, granada flota solamente 50%, mientras que, la flotación de monacita es completa. Dixit y Biswas (21) realizaron estudios para esclarecer la flotación de ilmenita, monacita y circonita con la adsorción del oleato en esos minerales. Estos autores encontraron que tanto la adsorción como la flotación son dependientes del pH, obteniéndose un valor máximo de ambos procesos en un mismo valor de pH.

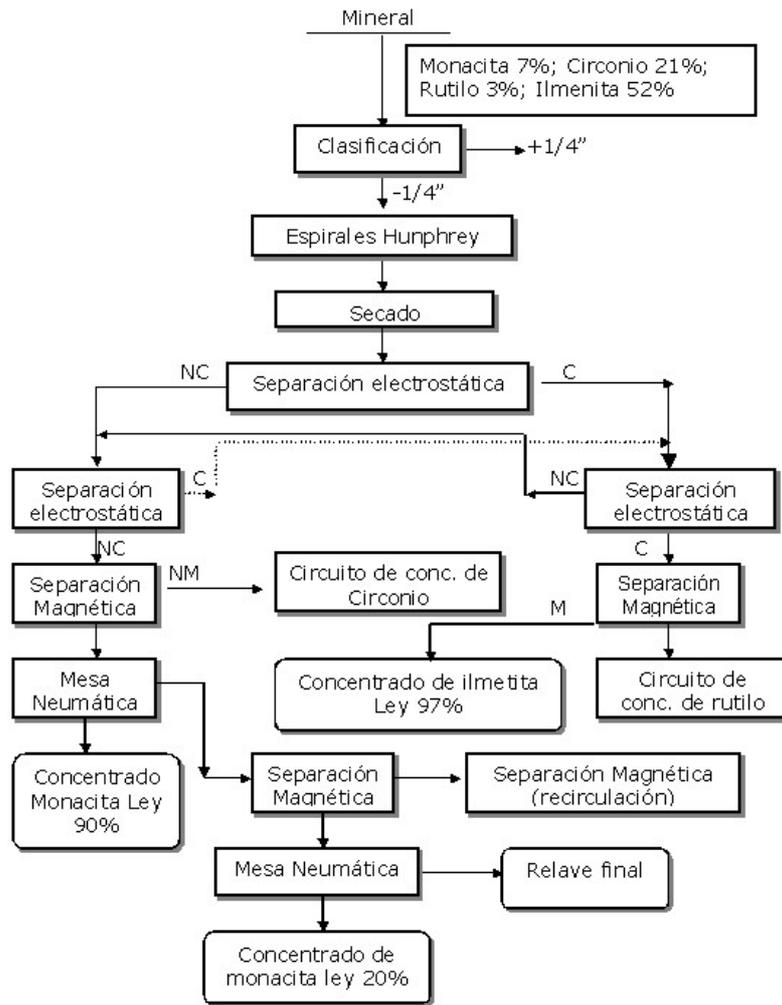


Figura 3. Diagrama de flujo generalizado del tratamiento de arenas de playa para la recuperación de ilmenita, leucoxeno, monacita y circonita (9).

En el caso de la monacita y la ilmenita el valor máximo en la flotación se alcanzó en torno de un determinado pH, mientras que, el zircón flotó en un amplio rango de pH y con una dosificación menor de colector. Estudios de las condiciones de separación por flotación de monacita en el sistema monacita/circonita empleando ácido oleico, dodecil sulfato de sodio y cloruro de dodecil amonio como colectores y sulfuro de sodio como agente modificador, fueron estudiadas por Abediu (22). Este autor demostró que al utilizar sulfuro de sodio es posible tornar selectiva la flotación de monacita en la

presencia de ácido oleico. El éxito de la flotación selectiva de monacita fue atribuida a la activación notoria que produce en este mineral, la presencia de sulfuro de sodio. Por otra parte, Salatic y Moiset (23) estudiaron mediante flotación la separación de monacita de niobio-tantalita utilizando ácido oleico como colector. La flotación de monacita se torna selectiva al usar oxalato de sodio como depresor de niobio-tantalita en pH=11,2. Estos autores también estudiaron la aplicación de silicato de sodio y fluorsilicato de sodio, los cuales fueron poco selectivos para la flotación de monacita.

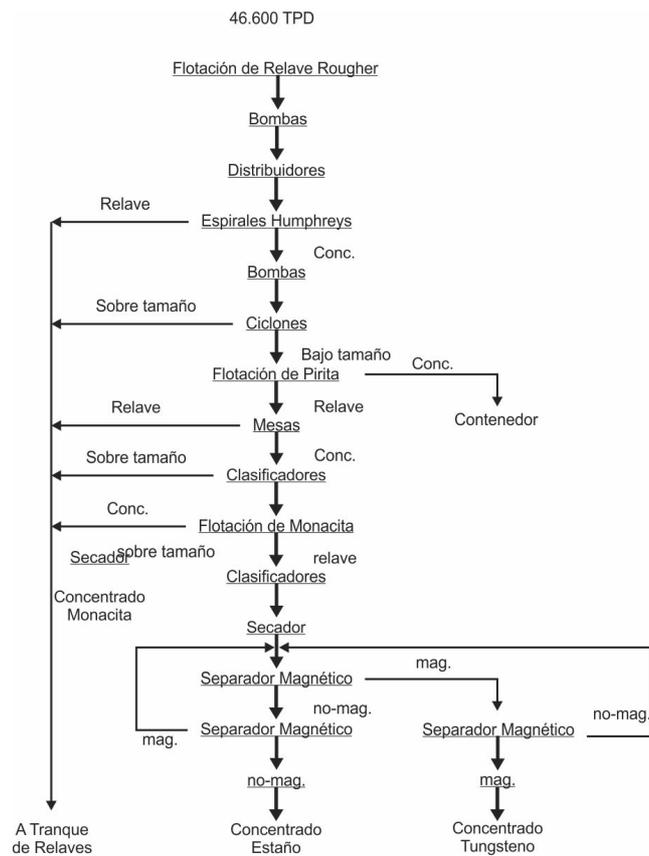


Figura 4. Diagrama de flujo modificado para la recuperación de subproductos en la Usina de Climax (18).

Tabla III. Flotación de un concentrado que contiene 50% de monacita usando colectores del tipo carboxilato y sulfonato (19).

Colector	Cantidad (kg/t)	Recuperación de monacita (%)	Contenido de monacita (%)
Ácido oleico	1,0	78,1	70,0
	2,9	98,0	85,0
Aeropromoter 710	6,6	80,0	80,0
	8,5	99,5	92,5
Alquil sulfonato R-166	1,7	85,4	82,1
	3,1	99,8	92,1
Sulfonato policíclico R-231	0,8	78,7	58,0
	1,5	89,8	64,2
	1,5	92,0	82,1 (a)
R-231 (b)	0,7	99,9	91,0 (d)
R-231 (c)	0,7	99,6	83,0
R-260 H (b)	0,8	97,9	92,4
R-260 H (c)	0,8	99,8	85,1
R-276 F (b)	3,0	85,0	90,5
R-276 F (c)	3,0	89,3	90,0

Uso de espumante Aerofroth – 70 en una cantidad igual a $\frac{1}{4}$ de la dosis del colector.

Activación con oxalato.

Modificación a través de amidos.

Una flotación recleaner usando la mitad de la cantidad de colector lleva a la obtención de 97% de monacita.

En las pruebas (b) y (c) el uso de espumante es optativo.

Nota. Tanto las condiciones experimentales de las pruebas, como las características de los colectores R-260 H y R-276 F no fueron especificadas por Wakamatsu (19).

Xenotimio

La flotación de xenotimio en función del pH empleando oleato de sodio, dodecil sulfato de sodio y acetato de dodecil amonio como colectores, fue estudiada por Wakamatsu (19). En este estudio se observaron dos máximos en la flotación de xenotimio con oleato de sodio, en los pH 3,5 y 8. Cuando se usó dodecil sulfato de sodio la xenotimio flotó bien alrededor del pH=2, mientras que, al emplear acetato de dodecil amonio como colector la xenotimio tuvo buena respuesta en el rango de pH alcalino comprendido entre 9 y 12. El comportamiento particular de cada colector en la flotación de xenotimio se debe, probablemente, a los mecanismos de adsorción de los colectores en la superficie de este mineral. La flotación de la mena primaria de Pitinga (AM) en Brasil, con reservas estimadas de 146.900 toneladas de óxidos de tierras raras, ha sido estudiada por varios investigadores (24, 25, 26, 27). La Mineração Taboca buscó desarrollar un método adecuado que le permitiera la separación del producto mixto de xenotimio-circonita. Sin embargo, esa separación se ha mostrado difícil, debido a que ambos minerales presentan propiedades físicas y superficiales, similares. Scorzelli y Torem

(24) a través de pruebas de micro flotación mostraron que las características de xenotimio y circonita son muy similares. Pequeños rangos de moderada selectividad fueron encontrados en pH entre 8,0 y 8,5 empleando ácido oleico y Procol DA911 (93,6% de flotabilidad para xenotimio y 53,3% para circonita) y en el rango entre 5,0 y 6,0 para ácido oleico y metasilicato de sodio (42,9% de flotabilidad para xenotimio y 95,9% para circonita). Pereira y Peres (27) desarrollaron pruebas de micro flotación en un tubo de Hallimond modificado con muestras puras de xenotimio y circonita, en la presencia de hidroxamato como colector y de cinco reactivos como depresores. Estos autores también determinaron el potencial zeta de estos minerales en la presencia de un electrolito de soporte e hidroxamato. Se observó que en la presencia del hidroxamato comercial y de los depresores silicato de sodio y almidón, la recuperación de xenotimio alcanzó 93,9% y 96,5%, respectivamente. Utilizando los mismos reactivos se consiguió una depresión efectiva de circonita, obteniéndose una flotabilidad de 21,6% y 30,8%, respectivamente.

3. COLECTORES UTILIZADOS EN LA FLOTACION DE MINERALES DE TIERRAS RARAS

En la literatura se ha reportado la utilización de diferentes tipos de colectores en la flotación de minerales portadores de tierras raras. Los mecanismos de acción de algunos colectores empleados en la flotación de estos minerales, serían los siguientes : mecanismo de adsorción química del oleato de sodio (11, 28, 29); la quimisorción de los ácidos hidroxámicos y sus sales (14, 29, 30); la adsorción física del dodecil sulfato de sodio y acetato de dodecil amonio (19). Un listado de los diferentes colectores que se han empleado en la flotación de tierras raras se presenta en la tabla IV.

Tabla IV. Colectores utilizados en la flotación de minerales de tierras raras

Minerales	Colector	Referencia
Monacita	Dodecil sulfato de sodio, acetato de dodecil amonio	Viswanathan et al. (31)
Monacita	Ácido n-octil-imino-bis-metileno fosfórico	Collins et al. (32)
Monacita	Aeropromoter 710, ácido oleico	Mining Chemical Handbook (33)
Monacita y circonita	Ácido oleico	Abeidu (22)
Monacita y circonita	Sec-amil-xantato de potasio	Salatic (34)
Monacita y circonita	Oleato de sodio y Armac CD	Salatic y Dakovic (35)
Monacita, circonita y pirocloro	Oleato de sodio	Zakharov et al. (36)
Monacita, ilmenita, rutilo y granada	Sulfonato de petróleo sódico y Armac T	Mc Ewen et al. (37)
Monacita, circonita y rutilo	Oleato de sodio, hidroxamatos	Pavez y Peres (38, 39, 40)
Monacita, berilio, cianita y granada	Alquilaril-sulfonatos de alto peso molecular (C22 o mayor)	Chistyakov et al. (41)
Monacita, columbita-tantalita	Ácido oleico	Salatic y Moiset (23)
Minerales de arenas de playa	Oleato de sodio	Dixis y Biswas (21)
Bastnasita	Emulsión "CD" ("tall oil", sulfonato y ácido rosínico)	Bulatovic y Salter (42)
Bastnasita, baritina y calcita	Octil-hidroxamato de potasio	Fuerstenau et al. (7, 30)
Bastnasita y monacita	Hidroxioxima, ácido ftálico semisaponificado	Mushidi (43)
Bastnasita, monacita, fluorita, baritina y calcita	N-oleilsarcisina, octadecil-sulfossuccinamato de sodio y n-tallow-1,3 diaminopropano dioleato	Tsunekawa et al. (44)
Xenotimio	Oleato de sodio, dodecil sulfato de sodio y acetato de dodecil amonio	Wakamatsu (19)
Xenotimio, casiterita y circonita	Aminas, sulfossuccinamato de sodio, ácido oleico, "tall-oil"	Silva (45)
Xenotimio y circonita	Ácido oleico y Procol DA911	Scorzelli y Torem (24)
Loparita	Ácido estiril fosfónico	Polkin et al. (46)
Apatita rica en tierras raras	Ácidos grasos	Mottol et al. (47)
Apatita que contiene tierras raras	Oleato de sodio, colectores con grupos fosfónicos	IM-50, Koval et al. (48)

4. CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado información relevante sobre los procesos de concentración de minerales de tierras raras, contenidos en placeres de origen marino y fluvial, donde la concentración gravitacional, separación magnética y separación electrostática, y la flotación es usada para minerales de tierras raras, de mineralogía más compleja, como los depósitos minerales de Bayan Obo y Mountain Pass. Esta creciente demanda por los elementos de la serie de lantánidos ha incrementado el desarrollo de nuevos depósitos de minerales de tierras raras con diferentes mineralogías que se requiere investigar para concentrar estos minerales. Toda la investigación sobre tierras raras proviene de Estados Unidos y China, sin embargo, esta carece de detalles de proceso, nombre químico de las moléculas colectoras, dosis, etc. Los colectores más usados en la flotación son los ácidos grasos y los hidroxamatos en Mountain Pass; investigadores chinos han desarrollado una serie de reactivos alternativos para ser utilizados en la flotación en Bayan Obo, pero estos necesitan ser confirmado a nivel industrial. Pocos antecedentes bibliográficos fueron encontrados para minerales de circón, apatita, loparita y allanita, sobre el beneficio de estos minerales para la extracción tierras raras, que presentan una oportunidad atractiva, en el contexto de concentrar estas tierras raras contenidas en los relaves de cobre, lo que permitirían un avance significativo en el conocimiento en el procesamiento de estos minerales.

5. REFERENCIAS

[1] P. Somasundaran, L. Xiao, T. V. Vasudevan (1991). Separation of salt-type minerals by flotation using a structurally modified collector. In: International Mineral Processing Congress, 17, Dresden, p. 379-391.

[2] F. F. Aplan et al. (1991). Surface properties and selective flotation on the slightly soluble minerals. In: International Mineral Processing Congress, 17, Dresden, p. 45-47.

[3] R Everly, D., (2017), Surface chemistry of novel collectors and their application to froth flotation of rare earth minerals, MSc Thesis, Kroll Institute for Extractive Metallurgy, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

[4] C.D. Anderson, P. R. Taylor, G. Corby. (2016). Rare earth flotation fundamentals: a review. IMPC 2016: XXVIII International Mineral Processing Congress Proceedings - ISBN: 978-1-926872-29-2.

[5] X. Xu (1985). A new collector for bastnaesite N° 804 and a preliminary of its flotation capabilities. In : New Frontiers in the Rare Earth Science and Applications Conference, Beijing, Proceedings, London, Academic Press Inc. Ltd., Vol. 1, p. 75-78.

[6] O. S. Bogdanov (1986). Current advances in the theory and practice of flotation: Research work performed at the Mekhanobr Institute. In: Somasundaran, P. (ed.), Advances in Mineral Processing, Littleton, AIME, p. 255-259.

[7] D. W. Fuerstenau, et al. (1982). An alternate reagent scheme for the flotation of Mountain Pass rare-earth ore. In : International Minerals Processing Congress, 14, Toronto, Proceedings, Can. Inst. Min. Metall., p. IV 6.1-IV 6.12.

[8] L. Valderrama, O. Pavez, S. Rojas, D. Olgún. (2004). Detección de elementos de tierras raras en relaves y rípios de la Empresa Nacional de Minería. XX Encuentro Nacional de Tratamiento de Minerios e Metalurgia Extrativa. p. 11-16., Florianópolis. Brasil.

[9] Pradip (1981). The Surface Properties and Flotation of Rare-Earth Minerals. Doctoral Thesis, Berkeley, CA: University of California, Berkeley.

[10] E. Morrice, M. M. Wong (1982). Flotation of rare earth from bastnaesite ore. U.S. Bureau of Mines Report of Investigation RI 8689, 13 p.

[11] M. A. Gerdel, R. W. Smith (1988). The role of lignin sulfonate in flotation of bastnaesite from barite. In : Bautista, R. G., Wong, M.M. (eds.), Rare Earth, Extraction, Preparation and Applications, Warrendale, The Minerals, Metals & Materials Society, p. 35-44.

- [12] L. Jiake, C. Xiangyong (1984). Research into the recovery of high-grade rare-earth concentrate from Baotou complex iron ore, China. In: Jones, M. J., Gill, P. (eds.), *Minerals Processing and Extractive Metallurgy*, London, Instn. Min. Metall., p. 663-675.
- [13] L. Jiake, C. Xiangyong (1985). A new development of mineral processing flowsheet for the treatment of a complex ore containing Fe, rare earths, Nb and F. In: *International Minerals Processing Congress*, 15, Cannes, Proceedings, Vol. III, p. 474-485.
- [14] B. A. Wills (1981). *Mineral Processing Technology*. Pergamon Press, Second edition, 525 p.
- [15] F. F. Aplan (1985). Tin, Titanium. In : Weiss, N. L. (ed.), *S.M.E. Minerals Processing Handbook*, New York, AIME, sect. 27, p. 10-14.
- [16] R. E. Cuthbertson (1952). Froth flotation of monazite from heavy minerals. U.S. Pat. 2.610.738, sep. 16, 1952.
- [17] D. Malhotra, et al. (1986). Recovery of additional tungsten from Climax byproduct-plant tailing. *Trans. AIME*, New York, Vol. 280, p. 55-59.
- [18] C. A. Born, F. N. Bender, O. A. Kiehn (1976). Molybdenite, flotation reagents development at Climax, Colorado. In : Fuerstenau, M. C. (ed.), *Flotation A. M. Gaudin Memorial Volume*, Baltimore, AIME, Vol. 2, p. 1147-1184.
- [19] T. Wakamatsu (1988). On the flotation of cassiterite and some rare-earth minerals. In : *International Symposium on Research and Development in The Extractive Metallurgy of Tin and Related Metals*, Ipoh, paper 15, 10 p.
- [20] K. V. Viswanathan, T. R. Madhavan, K. K. Majumdar (1965). Selective flotation of beach sand monazite. *Min. Mag.*, London, Vol. 113, N° 1, p. 17-23.
- [21] S. G. Dixit, A. K. Biswas (1969). pH-Dependence of the flotation and adsorption properties of some beach sand minerals. *Trans. AIME*, New York, Vol. 224, N° 2, p. 173-178.
- [22] A. M. Abeidu (1972). The separation of monazite from circón by flotation. *J. Less-Common Metals*, Lausanne, Vol. 29, p. 113-119.
- [23] D. Salatic, P. Moiset (1969). Separation by flotation of monazite from columbotantalites. *Rev. de l'Industrie Minerale*, Vol. 51, N° 12, p. 1028-1034.
- [24] I. B. Scorzelli, M. L. Torem (1995). Contribuição ao estudo da flotação de xenotima e zirconita de Pitinga, AM. *Anais do 49º Congresso Anual ABM*, Vol. IV, p. 177-190.
- [25] I. B. Scorzelli, M. L. Torem (1995). Separação de xenotima e zirconita submetidos a diversos pré-tratamentos superficiais. *Anais do XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, Rio de Janeiro, Vol. I *Processamento Mineral*, p. 323-336.
- [26] I. B. Scorzelli, M. L. Torem (1995). Influência do pré-tratamento com HF na flotabilidade da xenotima e zirconita. *Anais do XVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*, Rio de Janeiro, Vol. I *Processamento Mineral*, p. 294-307.
- [27] C. A. Pereira, A. E. C. Peres (1997). Flotation concentration of a xenotime pré-concentrate. *Minerals Engineering*, 1291-1295.
- [28] K. V. Viswanathan, K.K. Majumdar (1969). Infrared adsorption studies on beach sand minerals under conditions of soap flotation. *Bombay, Bhabha At. Res. Cent. (BARC)*, N° 391, 12 p.
- [29] O. Pavez (1993). Flotação de minerales portadores de terras raras. Tesis de Doctorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 362 p.
- [30] Pradip, & D.W. Fuerstenau (1983). The adsorption of hydroxamate on semi-soluble minerals. part i: adsorption on barite, calcite and bastnaesite. *Colloids and Surfaces*, 8(2), 103-119.
- [31] K. V. Viswanathan, S. K. Shukla, K. K. Majumdar (1968). Adsorption of long chain electrolytes at solid-liquid interface. 1. Adsorption of monazite-water systems. *Bombay, Bhabha At. Res. Cent. (BARC)*, N° 385, 23 p.
- [32] D. N. Collins, R. Wright, D. Watson (1984). Use of alkyl imino-bis-methylene phosphonic acids as collectors for oxide and

salt-type minerals. In : Jones, M. J., Oblatt, R. (eds.), *Reagents in the Minerals Industry*, London, Institution of Mining & Metallurgy, p. 1-12.

[33] American Cyanamid Company (1976). *Mining chemical handbook*, USA. 111 p.

[34] D. V. Salatic (1967). Floatability of monazite and zircon related to electrochemical changes on their surfaces. *Trans. Instn. Min. Metall. (Sect. C : Mineral Process. Extr. Metall.)*, London, Vol. 76, p. C231-C237.

[35] D. Saltic, D. Dakovic (1970). Flotation of ultrafine-particles in the vacuum and Hallimond tube. *Rud. Glas.*, Vol. 1, p. 37-44.

[36] A. E. Zakharov, et al. (1967). Reaction of sodium sulphide with sodium oleate. In : Plaksin, I. N. (ed.), *Flotation properties of rare minerals*, New York, Primary Sources, p. 71-82.

[37] R. Mc Ewen, G. W. Hansen, G. F. Lee (1976). Single-stage flotation of alkali feldspars, ilmenite, rutile, garnet and monazite with mixed cationic/anionic collectors. *Trans. AIME*, New York, Vol. 260, p. 97-100.

[38] O. Pavez, A. E. C. Peres (1993). Effect of sodium metasilicate and sodium sulphide on floatability of monazite-zircon-rutile with oleate and hydroxamates. *Minerals Engineering*, Vol. 6, N° 1, p. 69-78.

[39] O. Pavez, A. E. C. Peres (1994). Bench scale flotation of a Brazilian monazite ore. *Minerals Engineering*, Vol. 7, N° 12, p. 1561-1564.

[40] O. Pavez, P. R. Brandão, A. E. C. Peres (1996). Adsorption of oleate and octyl-hydroxamate on to rare-earths minerals. *Minerals Engineering*, Vol. 9, N° 3, p. 357-366.

[41] B. E. Chistyakov, N. A. Aleinikov, A. A. Petrov (1969). Flotation properties of high-molecular alkylarylsulfonates. *Rev. Mining Sci.*, N° 4, p. 457-461.

[42] S. M. Bulatovic, R. S. Salter (1991). Flotation behaviour of some oxide and rare earth minerals during the treatment of complex oxidic ores. In : *International Minerals Processing Congress*, 17, Dresden, 1991, Preprints, p. 35-45.

[43] Mushidi, J. (2016) Surface chemistry and flotation behavior of monazite, apatite, ilmenite, quartz, rutile, and zircon using octanohydroxamic acid collector, MSc. Thesis, Kroll Institute for Extractive Metallurgy, Colorado School of Mines, Golden Colorado.

[44] M. Tsunekawa, et al. (1991). Flotation characteristics of rare earth and other salt-type minerals with some new collectors. Flotation of bastnaesite, monazite, fluorite, barite and calcite. *Hokkaido Daigaku Kogakubu Kenkyo Hokoku (Bull. Fac. Eng., Hokkaido Univ.)*, Sapporo, N° 154, p. 9-18, jan. 1991. *Metals Abstract*, London, Vol. 24, p. 135 (41-0203), aug. 1991 (abstract).

[45] M. C. P. M. Silva (1988). Estudos de flotação de cassiterita, zirconita e xenotima do minério primario de Pitinga (AM). Dissertação de Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Rio de Janeiro-UFRJ, 109 p.

[46] I. M. Polkin et al. (1980). The theoretical principles of the use of organo-phosphoric compounds for complex processing of rare metals and tin ores. In : *International Minerals Processing Congress*, 12, São Paulo, 1977, Proceedings (Special Publication II), Brasilia, MME/DNPM, p. 53-72.

[47] Y. Mottol et al. (1989). Mineralogie et valorization des terres rares contenues dans un rejet de mine de fer. *Mines & Carriere-les Techniques*, Paris, N° 4-89, p. 45-49.

[48] E. M. Koval et al. (1985). Flotation properties of rare earth apatites. *Metody Issled. Tekhnol. Svoistv Redkomet. Miner.*, Moscow, 1985, p. 44-50. *Chemical Abstract*, Columbus, Vol. 107, p. 139 (61464d), 1987 (abstract).