



Оригинальная статья / Original article
УДК 622.765.061

Изыскание новых реагентов-собирателей для окисленных сурьмяных руд и оценка их флотационной активности по результатам квантово-химических расчетов на примере сурьмяной руды месторождения Жипхоша

© Г.В. Михеев^а, С.А. Богйдаев^б

^{а,б}Иркутский научно-исследовательский институт благородных и редких металлов и алмазов, г. Иркутск, Россия

Резюме: Руды сурьмяных месторождений содержат сульфидные (антимонит, джемсонит, буланжерит и др.) и окисленные формы металла (стибиконит, валентинит, сервантит и др.). Сульфидные формы извлекаются хорошо, а окисленные являются упорными ко всем процессам обогащения, и в настоящий момент нет технологий по получению окисленного концентрата сурьмы надлежащего качества. Исходя из литературных источников, из всех известных способов извлечения окислов сурьмы из сурьмяных руд самым эффективным на сегодняшний день является флотация. Для флотации сурьмяных руд применяют раздельную флотацию: сульфидную и окисленную. Низкая эффективность флотации окисленных форм сурьмы в присутствии известных собирателей, модификаторов и активаторов наводит на необходимость разработки новых эффективных реагентов с разработкой режимных параметров флотационного обогащения. В данной работе предлагается использование нового комплексного реагента-собираателя при флотации сурьмяной руды месторождения Жипхоша и приводится квантово-химический расчет для определения наличия взаимодействия реагента с минералами окисленных форм сурьмы. Установлено, что применение комплексного собирателя КР-1 при флотации (в соотношении 1:1:0,2) приводит к повышению флотационных свойств окислов сурьмы путем более эффективного воздействия на поверхность мономинерала (линз, пленок). Этот факт доказан при выполнении квантово-химического расчета, в котором рассчитанная энергия взаимодействия между мономинералом и реагентом составила 24,1 кДж/моль, что характерно для донорно-акцепторных взаимодействий. На пробе сурьмяной руды месторождения Жипхоша с содержанием сурьмы 2 % подтверждена эффективность применения комплексного собирателя КР-1 для флотации окисленных минералов металла. Извлечение сурьмы возрастает на 9,1 % при качестве концентрата 40 %, хвосты при этом снижаются с 1,42 до 1,12 %.

Ключевые слова: флотация, обогащение, сурьма, извлечение, квантовая химия

Информация о статье: Дата поступления 11 июля 2019 г.; дата принятия к печати 16 августа 2019 г.; дата онлайн-размещения 30 сентября 2019 г.

Для цитирования: Михеев Г.В., Богйдаев С.А. Изыскание новых реагентов-собирателей для окисленных сурьмяных руд и оценка их флотационной активности по результатам квантово-химических расчетов на примере сурьмяной руды месторождения Жипхоша. *Науки о Земле и недропользование*. 2019. Т. 42. № 3. С. 358–365.

Exploration for new collecting agents for oxidized antimony ores and estimation of their flotation activity based on the quantum-chemical calculation results: a case study of the Zhipkoshka deposit

© Gregory V. Miheev^а, Sergey A. Bogidayev^б

^{а,б}Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds, Irkutsk, Russia

Abstract: The ores of antimony deposits contain sulfide (antimonite, jamesonite, boulangerite, etc.) and oxidized forms of metal (stibiconite, valentinite, cervantite, etc.). The sulfide forms are well recoverable, while the oxidized ones are resistant to all enrichment processes. Thus there is currently no technology for obtaining a proper-quality oxidized antimony concentrate. The survey of the known methods of extracting antimony oxides from antimony ores shows that flotation is considered the most effective method. In the case of antimony ores, separate (sulfide and



oxidized) flotation is used. The efficiency of oxidized antimony forms flotation using the existing collectors, modifiers and activators, is low, which makes it necessary to develop higher-efficiency agents and operation parameters of the enrichment process. The present work suggests using a new complex collecting agent in the antimony ore flotation (the Zhipkoshka deposit) and describes a quantum-chemical calculation that allows determining the interaction of the reagent with the oxidized antimony mineral forms. It has been found that the flotation using the complex KR-1 collector (in a ratio of 1:1:0.2) results in higher flotation properties of the antimony oxide due to the bigger effect on the monogene surface (lenses, films). This fact is proven by the quantum-chemical calculation that gives the calculated energy of the monogene-agent interaction of 24.1 kJ/mole, which is typical of donor-acceptor interactions. The effectiveness of using the complex KR-1 collector for oxidized metal minerals flotation has been confirmed for the antimony ore sample with an antimony content of 2%. With the concentrate quality of 40 %, the antimony recovery increases by 9.1 %, while the tailings amount decreases from 1.42 % to 1.12 %.

Keywords: flotation, enrichment, antimony, extraction, quantum chemistry

Information about the article: Received July 11, 2019; accepted for publication August 16, 2019; available online September 30, 2019.

For citation: Miheev G.V., Bogidayev S.A. Exploration of new collecting agents for oxidized antimony ores and estimation of their flotation activity based on the quantum-chemical calculation results: a case study of the Zhipkoshka deposit. *Earth Sciences and Subsoil Use*. 2019;42(3):358–365. (In Russ.)

Введение

Сурьма находит широкое применение в технике в виде сплавов и соединений – их насчитывается около двухсот: в типографии, в химическом машиностроении, для изготовления труб, в электронной промышленности, при изготовлении аккумуляторов, в производстве полупроводниковых приборов, в современной ядерной науке, в текстильной промышленности, в производстве невозгораемых тканей и красок, ее используют также для изготовления оптического (просветленного) стекла, в медицине, в сельском хозяйстве и многих других промышленных областях.

Географическое размещение запасов сурьмы в России не так многогранно – они расположены в Читинской области и Забайкалье, в Красноярском крае и Якутии. Основные потребители сырья находятся в европейской части России.

Крупнейшим сурьмяносодержащим месторождением в настоящее время в России является месторождение Жипкоша, находящиеся в Восточном Забайкалье. По мировым запасам сурьмы Россия занимает второе место после Китая, на долю нашей страны приходится более 20 % данных запасов. Тем не менее потребление сурьмы в России гораздо ниже, чем в развитых странах, таких как США, Германия, Китай.

На сегодняшний день одной из проблем по выпуску сурьмяного концентрата является относительно низкая цена и низкое качество концентратов, поэтому силы производителей направлены на сокращение расходов при повышении качества продукции и увеличении объемов производства. Естественно, что для обогащения сурьмы необходимо применение достаточно недорогих реагентов и малозатратных процессов обогащения. Целью выполненных исследований являлось извлечение сурьмы в концентрат флотации сурьмяных руд Восточного Забайкалья за счет введения в схему дополнительной флотации окисленных форм сурьмы путем внедрения недорогих реагентов-собираателей.

Методы исследований

В работе использованы данные исследований по обогащению сурьмяной руды месторождения Жипкоша. Выполнены флотационные испытания комплексного реагента КР-1 в качестве собирателя окисленной формы сурьмы. Проведен квантово-химический расчет взаимодействия реагента КР-1 с окисленным минералом сурьмы Sb_2O_3 .

Результаты исследований

При проведении исследований руды месторождения Жипкоша потери с хвостами флотации составили 20,6 %



при содержании сурьмы, равном 1,99 %¹⁻³ [1–10].

Извлечение оксидов сурьмы флотацией – одна из наиболее трудных проблем в технологии переработки сурьмяных руд [5]. За прошедшие годы много исследований было связано с флотацией сурьмяных окисленных руд, но ни одна из технологий пока не доведена до промышленного внедрения.

Поиск эффективных реагентов для флотации окисленных сурьмяных руд продолжается. Ниже приводятся некоторые интересные разработки в этом направлении⁴.

1. При активации оксидов сурьмы марганцем (30 мг/л) и использовании в качестве коллектора гидроксамовой кислоты (80 мг/л) флотация их заметно улучшается (извлечение – 95 %). В отсутствии солей марганца извлечение достигало всего 42 %. В результате активации поверхности оксидов сурьмы марганцем усиливается взаимодействие поверхности с коллектором, что приводит к снижению образования оксидов (улучшению флокуляции) и, соответственно, к уменьшению активации минералов пустой породы.

2. При флотации окисленной сурьмяной руды с содержанием сурьмы 3,04 % и использовании октангидросамовой кислоты, эмульгатора синтекс (сложного алкилсульфата), трансформаторного масла и медного купороса при интенсивном их перемешивании получен сурьмяный концентрат с содержанием 12,66 % сурьмы при извлечении 88,3 %.

3. Исследован механизм активации окисленных минералов сурьмы катионами меди⁵ [6], показано, что катионы

меди могут эффективно способствовать флотации оксидов сурьмы при концентрации катионов меди 100 мг/л и pH = 4.

Указанные выше способы флотации окисленных руд были проверены на хвостах сульфидной флотации, полученных при полупромышленных испытаниях гравитационно-флотационной и флотационной схем обогащения руды месторождения Жипхоша (хвостах сульфидной флотации), а также на исходном питании флотации. При проведении опытов использованы реагенты, синтезированные в Иркутском институте химии им. А. Е. Фаворского СО РАН: олеат натрия 69 % + моноалкилтрисоксипропиленгликоль 3,2 % (P-4), олеат натрия 64,5 % + алкилдиметилбензиламмоний олеат 5,4 % (P-5), N,N-бис(3винилоксиэтокси-2-гидрокси-пропил)амин (P-7), алкилсульфаты (P-8), цис-9-октадецерпгидроксамовая кислота 40 % (P-10), натриевая соль гидроксамовой кислоты из олеиновой кислоты ~ 20 % (P-12). Проверен комплексный реагент КР-1, который представляет собой однородный водный раствор трех составляющих: хлопкового соапстока («Даллес»), омыленных жирных талловых кислот (БТ-1С) и диспергатора. При приготовлении комплексного реагента КР-1 в качестве диспергатора использовался Аспарал-Ф-тетранатриевая соль N-n-октадецил-N сульфосукциноиласпаргиновой кислоты. Также были проверены известные способы с использованием карбоновых кислот (на примере олеиновой кислоты) и аполярных реагентов (керосина, трансформаторного масла).

Результаты опытов с использованием выбранных реагентов представлены в табл. 1, 2.

¹ Тихонова О.Н. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик. В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1988. 373 с.

² Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учебник для вузов. В 3 т. М.: Изд-во МГГУ, 2001. 510 с.

³ Авдохин В.М. Основы обогащения полезных ископаемых: учебник для вузов. В 2 т. Т. 2. Технология обогащения полезных ископаемых. М.: Изд-во МГУ, 2006. 310 с.

⁴ Тихонова О.Н. Справочник по проектированию рудных обогатительных фабрик. В 2 кн. Кн. 1. М.: Недра, 1988. 373 с.

⁵ Абрамов А.А. Переработка, обогащение и комплексное использование твердых полезных ископаемых: учебник для вузов. В 3 т. М.: Изд-во МГГУ, 2001. 510 с.



Таблица 1

**Показатели флотации хвостов технологии для обогащения
 сурьмяной руды с использованием режимов,
 рекомендованных для повышения извлечения окисленной сурьмы**

Table 1

**Indicators of tailings flotation technology for antimony ore enrichment
 using the recommended modes enhancing the oxidized antimony recovery**

Номер опыта	Наименование продукта	Выход, %	Содержание сурьмы, %	Извлечение сурьмы, %	Реагентный режим, расход реагентов на 1 т, г
1	Концентрат	29,8	2,25	44,7	KMnO ₄ – 120, P-12 – 320, P-8 – 12, T-92 – 30
	Хвосты	70,2	1,18	55,3	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,5	100	
2	Концентрат	9,2	2,51	15,3	KMnO ₄ – 120, P-12 – 120, P-8 – 10, T-92 – 30
	Хвосты	90,8	1,41	84,7	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,51	100	
3	Концентрат	7,7	2,9	15,2	CuSO ₄ – 200, P-10 – 200, P-8 – 10, T-92 – 60, трансформаторное масло – 200
	Хвосты	92,3	1,35	84,8	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,47	100	
4	Концентрат	8,5	2,35	13,4	CuSO ₄ – 200, P-10 – 200, P-8 – 10, керосин – 200, T-92 – 60
	Хвосты	91,5	1,41	86,6	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,49	100	
5	Концентрат	10,3	2,83	19,2	pH = 4 (H ₂ SO ₄ – 300), CuSO ₄ – 400 (100 мг/л), БКК – 150, T-92 – 60
	Хвосты	89,7	1,37	80,8	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,52	100	
6	Концентрат	12,6	2,48	20,8	pH = 4 (H ₂ SO ₄ – 300), CuSO ₄ – 600, БКК – 150, T-92 – 60
	Хвосты	87,4	1,36	79,2	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,5	100	
7	Концентрат	14,8	3,15	32,7	Ж. ст. – 200, KP-1 – 420+300, T-92 – 60
	Хвосты	85,9	1,12	67,3	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,43	100	

Из всех проверенных реагентных режимов обращает на себя внимание режим с использованием KP-1 (см. опыт 7, табл. 1): извлечение в черновой концентрат составило 32,7 % при содержании сурьмы 3,15 %, содержание сурьмы в хвостах флотации снизилось до 1,12 % против 1,43 %.

Далее была проведена серия опытов с реагентом KP-1 для оптимизации процесса флотации. В результате исследований по флотационному обогащению руды месторождения Жипхоша выяснилось, что с использованием в окисленном цикле флотации комплексного реагента KP-1 технологическое извлечение ценного



Таблица 2

Показатели флотации хвостов технологии для обогащения сурьмяной руды
с использованием известных режимов окисленной флотации

Table 2

Indicators of tailings flotation technology for antimony ore enrichment
using the known oxidized flotation modes

Номер опыта	Наименование продукта	Выход, %	Содержание сурьмы, %	Извлечение сурьмы, %	Реагентный режим, расход реагентов на 1 т, г
1	Концентрат основной флотации	4,2	2,65	7,5	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$, БКК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, $\text{FeSO}_4 - 500$, БКК – 50, Ж. ст. – 800, олеиновая кислота – 300+100, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации, в т. ч:	6,4	2,63	7,6	
	концентрат перерешетки	0,2	5,81	0,8	
	промпродукт перерешетки	6,2	1,64	6,8	
	Хвосты флотации	89,4	1,41	84,9	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,49	100	
2	Концентрат основной флотации	4,3	2,65	7,6	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$, БКК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, $\text{FeSO}_4 - 500$, БКК – 50, олеиновая кислота – 300, трансформаторное масло – 80, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации, в т. ч:	26,5	1,81	32	
	концентрат перерешетки	7,6	1,91	9,7	
	промпродукт перерешетки	18,9	1,77	22,3	
	Хвосты флотации	69,2	1,31	60,4	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,5	100	
3	Концентрат основной флотации	4,6	2,71	8,4	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$, БКК – 100, ДМДК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, керосин – 200, Р-12 – 200, Р-8 – 10, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации	5,9	1,98	7,9	
	Хвосты флотации	89,6	1,38	83,7	
	Исходный: хвосты сульфидной флотации (по балансу)	100	1,48	100	
4	Концентрат основной флотации	5,8	2,47	9,6	Основная флотация, $t = 10$ мин, $\text{KMnO}_4 - 120$, $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2 - 150$, БКК – 100, ДМДК – 100, Т-92 – 60. Окисленная флотация, $t = 10$ мин, трансформаторное масло – 200, Р-12 – 200, Р-10 – 10, Т-92 – 30
	Концентрат окисленной флотации	6,2	1,85	7,7	
	Хвосты флотации	88	1,4	82,7	
	Исходный: хвосты (по балансу)	100	1,49	100	



компонента возможно повысить на 6,5 % при качестве концентрата 19,8 %. Результаты исследований с использованием комплексного реагента КР-1 рекомендуется использовать при разработке технологии обогащения смешанных и окисленных сурьмяных руд других месторождений (Илинское, Сарылахское, Удереиское и др.).

В связи с вышеизложенным для построения адекватной модели процесса флотации были проведены квантово-химические исследования структурных и электронных характеристик взаимодействия компонентов реагента и минералов окисленной сурьмы^{6–9} [11, 12].

Основной задачей квантовой химии является решение уравнения Шредингера и его релятивистского варианта (уравнение Дирака) для атомов и молекул. Уравнение Шредингера решается аналитически, учитывая следующие ограничения: жесткий ротатор, гармонический осциллятор, одноэлектронная система.

Ab initio (лат. «из первых принципов», «с начала») – основной метод расчета в современной квантовой химии. Исходными данными служат заряды ядер и их положения в молекуле или кристалле и наборы базисных функций (как правило, слейтеровского или гауссового типов). Эквивалентное название – неэмпирический расчет. Это наиболее точный из вычислительных методов. Обычно состоит в решении одноэлектронных уравнений Хартри – Фока или Кона – Шэма с учетом электронной корреляции.

В результате кванто-химического расчета были построены математические модели процесса флотации и выведены основные следующие критерии¹⁰ [13–16]:

– при флотации сурьмы фотореагентом КР-1, основным компонентом которого является олеиновая кислота, механизм процесса флотации обусловлен взаимодействием электронных оболочек сурьмы и кислорода группы COO^- ;

– результаты расчета указывают на то, что связь кислорода в составе Sb_2O_3 является чисто ионной;

– энергия активации при флотации окислов сурьмы с помощью реагента КР-1 составила 10,5 кДж/моль, что ниже энергии химических связей и характерно для донорно-акцепторных взаимодействий, то есть закрепление собирателя КР-1 на минерале окисленной сурьмы происходит эффективно.

Заключение

При изучении литературных источников по обогащению сурьмы выяснилось, что основной проблемой при обогащении металла является извлечение окисленных форм сурьмы, из-за чего потери по извлечению составляют до 40 % в зависимости от месторождения. В данной статье определен факт повышения извлечения сурьмы за счет доизвлечения окисленных форм металла при достаточно хорошем качестве концентрата 19,8 %, который можно смешивать с сульфидным концентратом и реализовывать на перерабатывающие заводы. Стоит отметить, что ранее такого качества достигали только после доводки окисленного концентрата, но при этом возрастали потери сурьмы за счет сокращения выхода концентрата и, следовательно, происходило падение извлечения металла в товарный продукт.

С помощью квантово-химического расчета определено, что комплексный реагент-собираитель КР-1 эффективно закрепляется на минерале окисленной сурьмы за счет синергетического

⁶ Мязин В.П., Наркелюн Л.Ф., Трубочев А.И., Татаринев А.Н. Обогащение полезных ископаемых: конспект лекций. Чита: Изд-во ЧитГТУ, 1999. 123 с.

⁷ Богданова О.С. Справочник по обогащению руд. Подготовительные процессы. М.: Недра, 1982. 360 с.

⁸ Грибов Л.А. Квантовая химия: учебник для студентов вузов. М.: Гардарики, 1999. 390 с.

⁹ Барановский В.И. Квантовая механика и квантовая химия: учеб. пособие. М.: Академия, 2008. 384 с.

¹⁰ Венер М.В. Компьютерное моделирование супрамолекулярных систем и нано-структур: учеб. пособие. М.: Изд-во РХТУ, 2008. 120 с.



эффекта компонентов, составляющих реагент.

На основании проведенных исследований работы будут продолжаться в

направлении оптимизации процесса флотации окисленных форм сурьмы с целью увеличения извлечения и качества концентратов.

Библиографический список

1. Гольман А.М., Чантурия В.А. Новые процессы в комбинированных схемах обогащения полезных ископаемых. М.: Наука, 1989. 210 с.
2. Solozhenkin P.M., Alekseev A.N. Innovative processing and hydrometallurgical treatment methods for complex antimony ores and concentrates. Part I // *Journal of Mining Science*. 2010. Vol. 46. № 2. P. 203–209.
3. Баранова Т.В., Соловьева Л.С. Обогащение руд процессом тяжелосредней сепарации // *Золотодобыча*. 2008. № 118. [Электронный ресурс]. URL: <https://zolotodb.ru/article/10091> (10.09.2019).
4. Xiao Liping, Liao Pinjun, Hu Weibai. Activation of Cu²⁺ ions on the flotation of fine antimony oxides. *Journal of Cent.-South Institute of Mining and Metallurgy*. 1985. № 4. P. 63–75.
5. Орел М.А., Розенфельд С.Ш. Обогащение комплексных ртутно-сурьмяно-флюоритовых руд // *Комплексная переработка полиметаллических руд*. М.: Metallurgia, 1965. С. 12–14.
6. Васильев В.Г. Сурьмяные оруденения Восточного Забайкалья // *Новый век – Новые открытия: материалы Межрегион. конф., посвящ. 40-летию Забайкальского комплексного научно-исследовательского института*. Чита: Изд-во ЧТГУ, 2001. С. 65–76.
7. Пендин А.А., Леонтьевская П.К., Казак А.С. Структурные характеристики водных растворов одноосновных кислот и щелочей // *Журнал физической химии*. 1996. Т. 70. № 11. С. 1965–1970.
8. Соложенкин П.М., Зинченко З.И. Обогащение сурьмяных руд. М.: Наука, 1985. 179 с.
9. Матвеева Т.Н., Громова Н.К., Ланцова Л.Б. Влияние танина на адсорбцию комбинированного собирателя и флотацию стибнита и арсенопирита из комплексных руд // *Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых*. 2017. № 6. С. 155–162.
10. Мязин В.П. Флотационное обогащение и металлургия сурьмяных руд: монография. Чита: Изд-во ЧТГУ, 2015. 156 с.
11. Левин А.А. Введение в квантовую химию твердого тела: химическая связь и структура энергетических зон в тетраэдрических полупроводниках: монография. М.: Химия, 1974. 238 с.
12. Ивановский А.Л. Квантовая химия в материаловедении. Неметаллические тугоплавкие соединения и неметаллическая керамика. Екатеринбург: Екатеринбург, 2000. 182 с.
13. Пендин А.А. Избирательная сольватация в трех- и многокомпонентных жидких растворах // *Журнал физической химии*. 1985. Т. 59. № 9. С. 2193–2197.
14. Пендин А.А., Белоусов А.П., Львова Т.И. Расчет структурных характеристик водных растворов 1-1 электролитов по значениям коэффициентов активности // *Журнал физической химии*. 1996. Т. 70. № 5. С. 825–829.
15. Пендин А.А., Казак А.С. Применение концепции сольватационных избытков для изучения взаимного распределения частиц компонентов раствора в системах KCl – NaCl – H₂O и KNO₃ – NaNO₃ – H₂O // *Журнал физической химии*. 2010. Т. 84. № 8. С. 1481–1487.
16. Мелик-Гайказян В.И., Емельянова Н.П., Глазунова З.И. О капиллярном механизме упрочнения контакта частица-пузырек при пенной флотации // *Обогащение руд*. 1976. № 1. С. 25–31.

References

1. Gol'man AM, Chanturiya VA. *New processes in combined mineral treatment schemes*. Moscow: Nauka; 1989. 210 p. (In Russ.)
2. Solozhenkin PM, Alekseev AN. Innovative processing and hydrometallurgical treatment methods for complex antimony ores and concentrates. Part I. *Journal of Mining Science*. 2010;46(2):203–209.
3. Baranova TV, Solov'eva LS. Ore enrichment process of heavy medium separation. *Zolotodobycha = Gold-mining*. 2008;118. Available from: <https://zolotodb.ru/article/10091> [Accessed September 10th 2019].
4. Xiao Liping, Liao Pinjun, Hu Weibai. Activation of Cu²⁺ ions on the flotation of fine antimony oxides. *Journal of Cent.-South Institute of Mining and Metallurgy*. 1985;4:63–75.
5. Orel MA, Rozenfel'd SSh. Enrichment of complex mercury-antimony-fluorite ores. In: *Complex treatment of polymetallic ores*. Moscow: Metallurgiya; 1965. p.12–14. (In Russ.)
6. Vasil'ev VG. Antimony mineralization in Eastern Trans-Baikal region. *Novyi vek – Novye odkrytiya: materialy Mezhhregional'noi konferentsii, posvyashchenoi 40-letiyu Zabaikal'skogo kompleksnogo nauchno-issledovatel'skogo instituta = New discoveries: Interregional conference dedicated to the 40th anniversary of the Trans-Baikal Complex Research Institute*. Chita: Chita State Technical University; 2001. p.65–76. (In Russ.)



7. Pendin AA, Leont'evskaya PK, Kazak AS. Structural characteristics of the aqueous solutions of monobasic acids and alkalis. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 1996;70(11):1965–1970. (In Russ.)

8. Solozhenkin PM, Zinchenko ZI. *Enrichment of antimony ores*. Moscow: Nauka; 1985. 179 p. (In Russ.)

9. Matveeva TN, Gromova NK, Lantsova LB. Effect of Tannin on Compound Collector Adsorption and Stibnite and Arsenopyrite Flotation from Complex Ore. *Journal of Mining Science*. 2017;6:155–162. (In Russ.)

10. Myazin VP. *Flotation enrichment and metallurgy of antimony ores*. Chita: Chita State Technical University; 2015. 156 p. (In Russ.)

11. Levin AA. *Introduction to quantum chemistry of solid bodies: chemical bond and structure of energy bands in tetrahedral semiconductors*. Moscow: Khimiya; 1974. 238 p. (In Russ.)

12. Ivanovskii AL. *Quantum chemistry in materials science. Nonmetallic refractory connections*

and nonmetallic ceramics. Ekaterinburg: Ekaterinburg; 2000. 182 p. (In Russ.)

13. Pendin AA. Selective solvation in three- and multicomponent liquid solutions. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 1985;59(9):2193–2197. (In Russ.)

14. Pendin AA, Belousov AP, L'vova TI. Structural characteristics calculation for aqueous solutions of 1-1 electrolytes by the activity rate values. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 1996;70(5):825–829. (In Russ.)

15. Pendin AA, Kazak AS. The use of the concept of solvation excesses for studying the mutual distribution of solution component particles in the H₂O – KCl – NaCl and H₂O – KNO₃ – NaNO₃ systems. *Russian Journal of Physical Chemistry*. 2010;84(8):1481–1487. (In Russ.)

16. Melik-Gaikazyan VI, Emel'yanova NP, Glazunova ZI. On the capillary mechanism of particle-bubble contact strengthening in foam flotation. *Obogashchenie rud = Ore-drying*. 1976;1:25–31. (In Russ.)

Критерии авторства / Authorship criteria

Михеев Г.В., Богидаев С.А. написали статью, имеют равные авторские права и несут одинаковую ответственность за плагиат.

Gregory V. Miheev and Sergey A. Bogidayev are the authors of the article, hold equal copyright and bear equal responsibility for plagiarism.

Конфликт интересов / Responsibility for plagiarism

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest regarding the publication of this article.

Сведения об авторах / Information about the authors



Михеев Григорий Владимирович,
старший научный сотрудник,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия,
✉ e-mail: miheev@irgiredmet.ru

Gregory V. Miheev,
Senior Researcher,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, 664025, Russia,
✉ e-mail: miheev@irgiredmet.ru



Богидаев Сергей Александрович,
научный сотрудник,
Иркутский научно-исследовательский институт
благородных и редких металлов и алмазов,
664025, г. Иркутск, бульвар Гагарина, 38, Россия,
e-mail: fluorit2001@mail.ru

Sergey A. Bogidayev,
Researcher,
Irkutsk Research Institute of Precious and Rare Metals and Diamonds,
38, Gagarin Boulevard, Irkutsk, 664025, Russia,
e-mail: fluorit2001@mail.ru