

УДК 552.11: 552:551:550.42

**ВИСМУТОВОЕ ОРУДЕНЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ АЛТАЙ:
ТИПИЗАЦИЯ И ПРОГНОЗНАЯ ОЦЕНКА****Гусев А.И., Гусев Н.И.***Алтайская государственная академия образования
им. В.М. Шукшина, Бийск, e-mail: anzerg@mail.ru*

Впервые проведена систематизация и прогнозная оценка висмутового оруденения в Республике Алтай. Висмутовая минерализация распространена во многих месторождениях, однако промышленное значение она имеет в составе комплексных геолого-промышленных типов: медно-молибден-порфировых, кварцево-грейзеновых молибден-бериллиевых, скарново-шеелитовых и мультиформационных редкоземельно-вольфрамовых арсенидно-никель-кобальтовых, серебро-сульфосольных. Во всех случаях висмутовая минерализация представлена висмутином и самородным висмутом в тесном парагенезисе с халькопиритом. Даны оценки запасов и прогнозных ресурсов различных категорий. По месторождению Каракуль приведены технологические испытания проб.

Ключевые слова: висмути́н, самородный висмут, геолого-промышленные типы оруденения, парагенезис, запасы, прогнозны́е ресурсы

**BISMUTH ORE MINERALIZATION OF REPUBLIC ALTAI:
TYPIZATION AND EXTENSION ORE EVALUATION****Gusev A.I., Gusev N.I.***The Shukshin Altai State Academy of Education, Biisk, e-mail: anzerg@mail.ru*

Systematization and extension ore evaluation of bismuth ore mineralization of republic Altai lead at first. Bismuth ore mineralization spread in much deposits but minable value it has in composition complex geology-minable types: copper-molibden-porphyrates, quartz-greisen molibden-beryllium, skarn-scheelites and multiformation rare-earth-elements-tungsten arsenite-nicel-cobalts, silver-sulfosalts. Bismuth ore mineralization presented by bismuthinite and free bismuth in all accidents in near paragenesis with chalcopyrite. Value of assay value and extension ore of different categories lead. The technologic tests of samples lead on deposit Karakul.

Keywords: bismuthinite, free bismuth, geology-minable types ore mineralization, paragenesis, assay value, extension ores

Висмут как попутный компонент в рудах комплексных месторождений обнаруживается в парагенезисах полиметаллических руд типа «манто» (Ширгайтинское, Ильинское) [2], золото-медно-скарновых (Синюхинское, Ульменское) [1, 9], вольфрамовых месторождений (Джудалю, Жумалинское) [3], золото-порфировых (Черёмуховая Сопка) [6], ртутно-серебро-рудных (Отсалар II) и других. Однако в промышленных концентрациях висмутовое оруденение в Республике Алтай встречается в составе комплексных месторождений ряда геолого-промышленных типов оруденения: медно-молибден-порфировых, кварцево-грейзеновых молибден-бериллиевых, скарново-шеелитовых и мультиформационных редкоземельно-вольфрамовых арсенидно-никель-кобальтовых [7], серебро-сульфосольных. **Цель исследования** – провести типизацию и обобщение данных по висмутовому оруденению региона.

Результаты исследования

Представителем комплексных месторождений является *Калгутинское* [8]. Это месторождение формировалось длительное время с пульсационным характером отделения из

глубинного магматического очага дериватов расплавов и рудно-флюидных систем. Раннее медно-молибден-порфировое оруденение парагенетически связано с порфировым комплексом с возрастом 204 млн лет (поздний триас), а более позднее кварцево-грейзеновое медно-бериллий-молибден-вольфрамовое оруденение – с двуслюдяными и мусковитовыми высокосилиевыми лейкогранитами Восточного массива (ранняя юра). Висмутовая минерализация тесно ассоциирует с халькопиритом. При этом при формировании более ранних порфировых руд висмутовый парагенезис представлен висмутином и самородным висмутом и лишь незначительная часть висмута изоморфно входила в халькопирит. Температура кристаллизации этого парагенезиса определяется в 290°C. А в более поздних агрегатах кварцево-грейзенового медно-бериллий-молибден-вольфрамового состава собственные минералы висмута не кристаллизовались и весь висмут входил в состав халькопирита, в котором содержание висмута намного выше, чем в медном колчедане порфирового типа (табл. 1). Гомогенизация газовой-жидкой включений кварца этого парагенезиса намного выше и составляла 340–370°C.

Таблица 1
Содержания элементов-примесей в халькопиритах медно-молибден-порфирирового и кварцево-грейзенного бериллий-молибден-вольфрамового типов руд Калгутинского месторождения

Элементы, г/т	Халькопирит медно-молибден-порфирировых руд, N = 12	Халькопирит кварцево-грейзенных бериллий-молибден-вольфрамовых руд, N = 5
Be	1,1	2,2
V	3,5	4,2
Rb	< 2	3,5
Sr	1,2	2,1
Y	2,1	3,3
Zr	1,85	2,5
Nb	< 0,5	1,5
Mo	875	2100
Ba	3,2	< 3
La	0,21	0,32
Ce	0,41	0,54
Pr	0,04	0,065
Nd	0,21	0,3
Sm	0,04	0,062
Eu	0,011	0,014
Gd	0,054	0,048
Tb	0,013	0,012
Dy	0,061	0,065
Ho	0,012	0,01
Er	0,03	0,017
Tm	0,007	< 0,005
Yb	0,028	0,015
Lu	0,007	0,0057
Re	6,6	0,8
Hf	0,042	0,047
Ta	< 0,1	< 0,1
W	21,4	131
Th	0,14	0,28
U	0,60	0,61
Se	129,1	28,2
Te	49,5	18,4
Ag	620,1	196
Cd	278,1	53
In	35,5	12,6
Sb	12,2	2,7
Mn	1276	327
Bi	89,4	1570
Sn	68,5	34
ΣREE	3,23	4,78

Примечание. Анализы выполнены методами ICP-MS и ICP-AES в лабораториях ИМГРЭ и ВСЕГЕИ. N- количество проб; ΣREE – сумма редкоземельных элементов.

Высокие концентрации висмута в халькопирите грейзенного типа коррелируются позитивно с молибденом и вольфрамом. В более низкотемпературном халькопирите порфирирового парагенезиса отмечаются более высокие концентрации рения, селена, теллура, серебра, кадмия, индия, сурьмы, марганца и олова (табл. 1).

Содержания висмута в рудах медно-молибден-порфирирового типа, где выделялись собственные минералы висмута (висмутин и самородный висмут), варьируют от 0,1 до 0,6% (среднее 0,18%), а в рудах кварцево-грейзенного типа (медно-бериллий-молибден-вольфрамовых) концентрации висмута составляют 0,01–0,08%. Запасы висмута категории С₂ по Калгутинскому месторождению для медно-молибден-порфирировых руд оценены в 235,3 т (при среднем содержании висмута 0,18%).

В скарново-шеелитовом месторождении *Карагем*, сформировавшегося в контакте Иедыгемского гранитного массива катандинского габбро-диорит-гранодиоритового комплекса (D₂), висмутовая минерализация проявилась в виде тонкой вкрапленности висмутин в тесной ассоциации с халькопиритом. Эта ассоциация наложена на более ранние парагенезисы скарнов с магнетитом и шеелитом в виде кварцевых прожилков и гнездами халькопирита с висмутин. Содержания висмута в таких рудах варьируют от 0,01 до 0,5% (среднее 0,18%). Прогнозные ресурсы висмута для Карагемского рудного поля, включающего вольфрамовое, медное и кобальтовое оруденение, категории P₂ оценены в 110 т. Рудное поле не изучено на глубину и с поверхности и требует доизучения на кобальтовое, вольфрамовое, медное и сопутствующее висмутовое оруденение.

Каракольское молибден-бериллиево-месторождение приурочено к одноименному массиву щелочных гранитов. Висмутовая минерализация приурочена к жилам кварца, сопровождающимся грейзенизацией, расположенным кулисообразно, местами лестничным жилам. Преобладает в жилах берилл, развитый в виде скоплений неправильной формы, друз и отдельных кристаллов. С бериллом ассоциируют молибденит, халькопирит, шеелит, колумбит и танталит (редки), висмутин, ковеллин, торбернит, метаторбернит, отенит, флюорит, турмалин. Распределение бериллия, молибдена и висмута в рудах неравномерное. Висмутин ассоциирует с халькопиритом. Среднее содержание Be – 0,5%, Mo – 0,3%, Bi – 0,12%.

Суммарные запасы и прогнозные ресурсы ($C_1 + C_2 + P_1$) Ве – несколько тысяч тонн, причём, берилла рудоразборного ($C_1 + C_2$) – 1942 т, Мо – 543,6 т, Вi – 141,2 т, U – 34,2 т. В рудах обнаруживаются Ag – до 100 г/т и Au (0,4–0,8 г/т).

Серебро-сульфосольные меторождения Юстыдского прогиба повсеместно содержат в тех или иных количествах висмут [4]. Наибольшие концентрации выявлены в рудах *Янтаусского месторождения*, расположенного в верховьях р. Куру-Озек. В рудных зонах жильного типа, сложенных кварцем, кальцитом, сидеритом, анкеритом, установлены пирит, халькопирит, галенит, тетраэдрит, висмутин, самородный висмут. Минералы висмута тяготеют в своей ассоциации к халькопириту и тетраэдриту. По данным бороздового опробования рудных зон максимальные содержания элементов в отдельных пробах достигают: серебра – 1484,5 г/т, меди – 1,78%, свинца – 1,67%, цинка – 3,0%, сурьмы – 1,56%, висмута – 0,78%. Характерной особенностью серебряно-сульфосольного оруденения Янтаусского месторождения, как и других месторождений и рудопроявлений серебра Юстыдского рудного узла, является их висмутовая «специализация» и присутствие ртути в виде изоморфной примеси в сульфидах и сульфосолях. Прогнозные ресурсы категории P_2 для Янтаусского рудного поля оценены в объёме 145 т при средних содержаниях в рудах 0,15%.

Самым крупным объектом на висмутовое оруденение является комплексное мультiformационное *редкоземельно-вольфрамовое арсенидно-никель-кобальтовое Каракульское месторождение*. На месторождении устанавливается 5 типов руд:

1) кварц-апатит-хлоантит-герсдорфит-аннабергитовый;

2) кварц-альбит-шеелитовый;

3) кварц-хлорит-кобальтиновый;

4) кварц-халькопирит-пирротинный;

5) серебро-сурьмяный сульфосольный.

Висмутовая минерализация формировалась после ранних парагенезисов вольфрамового и никель-кобальтовых: в кварц-халькопирит-пирротинном и серебро-сурьмяно-сульфосольном. *Кварц-халькопирит-пирротинный тип руд* отвечает позднему этапу и представлен линзовидными и пластообразными телами, залегающими согласно с вмещающими терригенными породами. Пластообразные тела имеют мощность 0,8–10 м и протяжённость в сотни метров по простиранию. Основным минера-

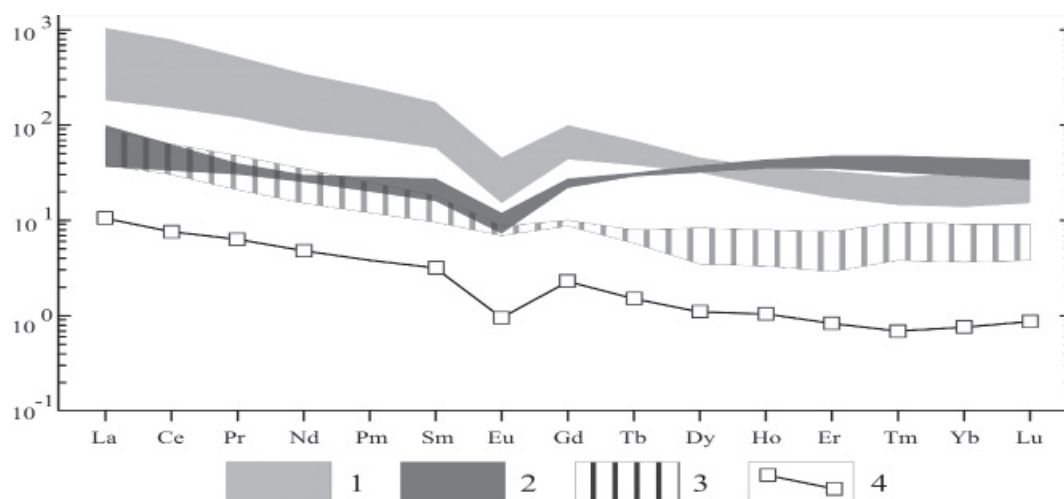
лом является пирротин (50–90%), пирит (12–15%), халькопирит (20–25%), а также арсенопирит, лёллингит и аксессуарные: галенит, сфалерит, висмутин и самородный висмут. Главными компонентами руд являются медь (0,3–0,5%), кобальт (0,02–0,1%), золото, в качестве рассеянных элементов в количествах 0,01–0,001% выступают свинец, цинк и висмут. Кобальт в качестве примеси входит в состав арсенопирита и лёллингита. Концентрации золота колеблются от 0,2 до 0,8 г/т, однако может достигать и 3–5 г/т в верхней части арсенопиритовых руд. Содержание золота в монофракции арсенопирита (по данным атомной абсорбции) составляет 440–480 г/т. Висмутин и самородный висмут образуют зёрна размерами 0,03–0,1 мм. Зёрна неправильной и округлой формы слагают аллотриоморфные, ксеноморфные агрегаты. Оба минерала часто ассоциируют с халькопиритом.

Заключительный этап на месторождении представлен кварц-карбонатными прожилками *серебро-сурьмяной минерализации* со сфалеритом, галенитом и сульфосолями меди, висмута, свинца, серебра. Характер распределения редкоземельных элементов в рудах месторождения Каракуль показан на рисунке, а всего комплекса элементов – в табл. 2.

В распределении РЗЭ выявляется два типа: с вогнутой структурой тяжёлых РЗЭ (никель-арсенидные руды раннего этапа) и выпуклой структурой позднего висмут-свинцово-теллуридной минерализации (см. рисунок). По результатам технологического анализа трех малых технологических проб (№ 5, 6, 9) руды месторождения Каракуль, как по минеральному составу, так и по набору полезных компонентов являются комплексными. Содержания полезных компонентов: кобальта – 0,88; 0,2; 0,76%; висмута – 0,37; 0,04; 0,32%; меди – 1,78; 0,05; 1,75; триоксида вольфрама – 0,25, нет, 1,7%; Содержания основных рудных минералов: халькопирит – 4,8; 0,23; 4,4%; глаукодот – нет, нет, 3,5%; кобальтин – 1,43; 0,54; 0,5%; висмутин и самородный висмут – 0,58, единичные зёрна, 0,4%; шеелит – 0,32, нет, 2,1%; пирротин – 12,86; 6,4; 0,8%; пирит – марказит – 8,9; 2,9; 4,0%; кроме того, во всех трёх пробах присутствуют золото (от 0,2 до 0,6 г/т) и серебро – (10 г/т). Намечена флотационная схема, включающая двухстадийное измельчение руды. По данной схеме в замкнутом цикле получены: А) медно-висмутовый концентрат с содержанием меди 27,04–27,82% (висмута от 0,95 до

1,49%); кобальта от 0,4 до 1,6%; мышьяка от 0,4 до 2,05%. Извлечение составляет (соответственно): 84,9%; от 10,3 до 26,3%; от 3,3 до 11,8%; от 0,8 до 7,2%. По требованиям ЦМТУ 03-13-69 полученный концентрат относится к марке «КМЗ» (концентрат медный III сорта); Б) мышьяково-кобальтовый концентрат с содержанием кобальта от 2,12 до 9,19%; мышьяка от 7,5 до 15,57%; меди – от 1,5 до 2,77%; висмута от 0,9 до 1,3%

при извлечении соответственно: от 65,2 до 81,7%; от 52,9 до 74,5%; от 4,3 до 28,7%; от 22,0 до 45,8%. Месторождение Каракуль по запасам относится к категории крупных. Запасы по категории С₂, учитываемые Госбалансом (в скобках – забалансовые запасы), составляют: Со – 25 656 т (2 069 т), Вi – 12 051 т (557 т), Сu – 54 386 т (1 566 т); не прошедшие экспертизу запасы WO₃ – 11 040 т, Au – 1,245 т, Ag – 4,629 т.



Структура распределения редкоземельных элементов в некоторых рудах Юстыдского рудного узла. Нормирование по составу хондрита:

1 – каракульские руды, обогащенные РЗЭ с вогнутой структурой тяжелых РЗЭ (пробы 667, 667-1, 667-2, 667-4, 667-7); 2 – каракульские руды с висмута-свинцово-теллуридной минерализацией, обедненные легкими РЗЭ и с выпуклой структурой тяжелых РЗЭ (пробы 667-3, 667-5); 3 – руды Озерного месторождения с сульфосольным оруденением (пробы 668, 671); 4 – медно-кобальтовые руды участка Караюк (проба 672-1)

Таблица 2

Химический состав некоторых руд Каракульского месторождения (основные компоненты в масс. %, элементы – в г/т)

Номера проб	667	667-1	667-2	667-3	667-4	667-5	667-7
Компоненты	1	2	3	4	5	6	7
1	2	3	4	5	6	7	8
SiO ₂	41,6	37,3	51,8	20,2	47,1	61,7	43,4
TiO ₂	0,23	0,2	1,0	0,12	0,22	0,52	0,57
Al ₂ O ₃	5,71	6,85	9,6	1,8	9,5	12,8	7,89
Fe ₂ O ₃ t	34,4	37,9	22,4	53,1	15,9	12,9	29,2
MnO	0,096	0,1	0,084	0,095	0,07	0,16	0,076
MgO	6,27	6,49	7,02	7,17	9,31	1,92	1,76
CaO	2,17	1,98	0,6	4,09	5,8	0,42	0,34
Na ₂ O	0,11	< 0,05	< 0,05	0,14	0,39	0,08	0,22
K ₂ O	3,71	3,58	5,61	1,53	5,15	5,37	4,58

Окончание табл. 2

1	2	3	4	5	6	7	8
P ₂ O ₅	0,66	0,36	0,18	1,04	4,38	0,19	0,13
ППП	4,95	5,18	1,52	10,2	1,89	3,59	11,5
Сумма	99,91	99,94	99,81	99,49	99,71	99,65	99,67
Cu	1550	1000	2020	1190	50	1710	263
Co	303	600	170	2100	1000	1000	1030
Ni	928	1500	164	2380	3000	50	257
Pb	151	300	20,2	347	12	14,1	31,9
Bi	< 5	2	162	3400	30	1000	145
Sb	15	–	19,8	57,3	1000	26,5	43,4
As	55,6	1000	78,3	313	10000	200	278
B	8,61	–	< 1	12,6	–	–	25,5
Ag	< 0,1	0,8	< 0,1	< 0,1	1,5	5	< 0,1
V	41,6	40	60,1	14,2	30	60,9	41,5
Cr	26,2	15	66,7	10,5	20	48,5	56,1
Zn	90,2	80	69,6	98,6	50	80,9	61,3
Mo	105	15	6,79	0,99	10	3	3,65
W	0,8	–	1,09	1,05	–	36,4	12
Ba	181	300	248	23,7	300	1580	1400
Rb	285	–	457	122	–	144	151
Y	37,8	35,4	55,4	62,3	62,7	73,4	39,3
La	152	160	249	24	42,8	8,54	71,1
Ce	317	331	480	39,3	91,7	20,7	140
Pr	34	36,7	50,4	3,77	11,2	2,85	14,6
Nd	114	125	165	14	41	11,6	48,4
Sm	19,1	19,7	27,1	4,17	8,88	2,46	9,54
Eu	1,78	1,84	2,6	0,42	0,89	0,71	1,76
Gd	14,5	15,3	20,3	5,66	10,8	4,59	8,86
Tb	1,85	1,87	2,62	1,07	1,69	1,19	1,39
Dy	8,19	8,18	11,6	8,16	9,95	9,79	8,03
Ho	1,4	1,27	2	2	2,07	2,47	1,7
Er	2,98	2,94	4,93	5,63	5,39	7,84	4,39
Tm	0,37	0,4	0,73	0,79	0,61	1,21	0,64
Yb	2,32	2,37	5,08	4,98	3,66	7,72	3,89
Lu	0,45	0,38	0,93	0,67	0,49	1,11	0,58
ΣTR	669,9	706,95	1022,3	114,6	231,13	82,78	314,9

Примечание. Анализы выполнены в лаборатории ВСЕГЕИ: силикатный анализ пород на главные компоненты – рентгено-спектральным флуоресцентным методом, определения Co, Ni, Zn, Pb, Cu – ISP-AES, остальные элементы, в том числе PЗЭ – методом ISP-MS.

Заключение

В заключении следует отметить, что, висмутовая минерализация в комплексных рудах широко распространена в различных типах оруденения региона и имеет значительный вклад в общую ценность месторождений и последующим использованием концентратов в цветной металлургии. Висмутовое оруденение формировалось в герцинский и альпийский циклы тектогенеза. Наибольшую промышленную ценность оно получило в рудах комплексного редкоземельно-вольфрамного арсенидно-никель-кобальтового месторождения Каракуль в составе висмута-свинцово-теллуридной ассоциации на заключительных этапах его формирования. Суммарные запасы промышленных категорий висмута в регионе составляют (т): категории C_1 – 235,3, C_2 – 12192,2. Сумма прогнозных ресурсов категории P_2 в пределах перспективных рудных полей оцениваются в 255 т.

Список литературы

1. Гусев А.И. Геология и золото-медно-скарновое оруденение Синохинского рудного поля в Горном Алтае // Руды и металлы. – 1998. – № 2. – С. 79–90.
2. Гусев А.И. Шошонитовые гранитоиды Синохинского массива Алтая // Международный журнал экспериментального образования. – 2012. – № 5. – С. 18–2.
3. Гусев А.И. Типизация вольфрамового оруденения Республики Алтай // Современные наукоёмкие технологии. – 2012. – № 3. – С. 12–16.
4. Гусев А.И. Серебряное оруденение Горного Алтая // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 9. – С. 53–57.
5. Гусев А.И. Типы эндогенной редкоземельной минерализации Горного и Рудного Алтая // Успехи современного естествознания. – 2012. – № 12. – С. 23–28.
6. Гусев А.И., Гусев Н.И. Полихронное комплексное Cu-Bi-Co-Ni-W месторождение Каракуль Горного Алтая // Руды и металлы. – 2012. – № 1. – С. 33–41.
7. Гусев Н.И., Гусев Н.И., Шокальский С.П. Базитовый магматизм и металлогения Юстыдского рудного узла (Юго-Восточный Алтай) // Региональная геология и металлогения. – 2010. – Вып. 43. – С. 83–97.
8. Гусев Н.И., Гусев А.И. Золото-генерирующие рудно-магматические системы Горного Алтая // Руды и металлы. – 1998. – № 2. – С. 67–78.