



УДК (553.3/4.078:553.2):551.73(571.15)

КУЗНЕЦОВСКАЯ МАГМО-РУДНО-МЕТАСОМАТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЗАПАДНОГО АЛТАЯ

А. И. Гусев

Рассмотрены особенности магматизма, метасоматитов и вещественного состава оруденения Кузнецовского месторождения, отнесенного к железо-оксидно-медно-золоторудному типу. Магматизм представлен дайками диоритов, кварцевых диоритов, щелочных сиенитов, гранит-порфиров и лейкогранитов сильно эволюционированного магматического очага и имеет вначале щелочной, а затем – умеренно-щелочной уклон в заключительных фазах. По петрогеохимическим данным рудогенерирующий магматизм имеет астеносферно-литосферный источник плавления субстратов. В породах проявлены два типа тетрадного эффекта фракционирования РЗЭ (W- и M-типы). Магматогенные флюиды имели водный состав, а также обогащенный фтор-комплексами. Отделение рудных металлов (меди, вольфрама и др.) происходило в режиме увеличения концентраций фтора в магматогенных флюидах. Руды представлены скарнами и жильными зонами золото-сульфидно-кварцевого типа. Температуры кристаллизации руд уменьшались от 450 до 175 °С с изменением солёности первичных включений в минералах от 28 до 4,2 мас. %-экв. Изотопы серы сульфидов близки к магматогенному источнику. Изотопия углерода и кислорода в жильных минералах месторождения указывают на ювенильно-коровые характеристики.

Ключевые слова: магматизм, дайки, диориты, щелочные сиениты, гранит-порфиры, лейкогранит-порфиры, скарны, геденбергит, гранат, эпидот, Fe, Au, Ag, Pt, Pd, Y, Yb, W, изотопы серы, углерода, кислорода.

DOI 10.20403/2078-0575-2016-1-104-114

THE KUZNETSOVSKAYA MAGMATIC-ORE-METASOMATIC SYSTEM OF THE WESTERN ALTAI

A. I. Gusev

The paper considers characteristic features of magmatism, metasomatites, and material composition of the Kuznetsovskoye field pertaining to the iron-oxide-copper-gold-ore type. Magmatism is represented by dykes of diorite, quartz diorite, alkali syenite, granite-porphyry, and leucogranite of a highly evolved magmatic cluster and is alkali to medium-alkali in its concluding phases. According to petrogeochemical data on the ore-generating magmatism, the melting of substrates is driven by asthenospheric and lithospheric factors. In the rock, there are two types of the tetradic effect fractionation of rare-earth elements (W- and M-type). Magmatic fluids have water composition rich in fluorine complexes. Ore metals (copper, wolframium, etc.) were separated under increasing fluorine concentration in magmatogene fluids. Ores are represented by scarn and vein gold-sulphide-quartz-type zones. The temperatures of ore crystallisation decreased from 450 to 175°C with a change in salinity of the primary inclusions in minerals from 28 to 4,2% wt eq. Sulphur isotopes of sulphides are close to magmatogenic source. The carbon and oxygen isotopy in vein minerals of the field indicates the juvenile crustal characteristics.

Keywords: magmatism, dikes, diorites, alkali syenites, granite-porphyries, leucogranite-porphyries, scarns, hedenbergite, garnet, epidote, Fe, Au, Ag, Pt, Pd, Y, Yb, W, isotopes of sulphur, carbon and oxygen.

В последнее время за рубежом особое внимание уделяется комплексным месторождениям железо-оксидно-медно-золоторудного (IOCG) класса [19, 20]. В 2000 г. в Австралии состоялся специальный симпозиум, посвященный глобальным перспективам месторождений этого типа [19, 20]. Месторождениям IOCG уделялось большое внимание и на специальных секциях Международных геологических конгрессов в 2004, 2008 и 2012 гг. Издана полная сводка, отражающая разнообразие типов и видов железо-оксидно-золото-медных и родственных месторождений [7]. В настоящее время это признанный геологической общественностью полноправный класс месторождений, в котором по признакам рудогенерирующей роли интрузивного магматизма выделяется шесть типов оруденения: четыре связаны с интрузиями известково-щелоч-

ного и умеренно-щелочного ряда (железорудные скарны, апатит-магнетитовые типа Кируна, Олимпик Дэм и Клонкарри) и два типа – с магматизмом щелочно-карбонатитового ряда (типы Палабора и Баян-Обо) [12]. К железо-оксидно-медно-золоторудным месторождениям относятся объекты малосернистых низкотитанистых (<0,5 вес. % Ti) существенно магнетитовых и (или) гематитовых руд, содержащих, как правило, не менее 20 об. % железо-оксидных минералов (магнетита и (или) гематита) и существенно обогащенных медью, золотом, а в ряде случаев – также ураном и редкоземельными элементами [13, 21–23]. В различных регионах мира этот класс месторождений дает весьма широкие вариации по составу с образованием специфических особенностей, присущих конкретным регионам, которые связаны с историей тектонического



развития и проявления магматизма и сопровождающих метасоматитов.

В Алтае-Монголо-Саянском регионе фиксируется деятельность железооксидных магмо-рудно-метасоматических систем (МРМС) по меньшей мере пяти типов: 1) железорудных скарнов, 2) Кируна, 3) Олимпик Дэм, 4) Клонкарри, 5) Палабора.

Цель настоящего исследования – всестороннее изучение дайковых образований, руд и метасоматитов Кузнецовского комплексного месторождения IOCG класса с использованием изотопных исследований руд, выполненных в лаборатории СО РАН (Новосибирск), и эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой на спектрометре «OPTIMA-4300» для Cu, Zn, Pb, Li, методом ISP-AES – для минералов руд в аналитическом центре СО РАН (Новосибирск).

Результаты исследований

Кузнецовское месторождение относится к железооксидному медно-золоторудному (IOCG) классу месторождений. Этот класс месторождений в Алтайском регионе выделен недавно и включает несколько типов оруденения [4]. К нему относятся несколько проявлений (Давыдовское в Рудном Алтае, Локтевское в Горном Алтае) [1, 16].

В классе IOCG выделяется тип железорудных скарнов, к которым и относится Кузнецовское месторождение, связанное парагенетически и пространственно с дайками умеренно-щелочных образований куюганского комплекса, проявленных непосредственно в Северо-Восточной зоне смятия. Подобные месторождения распространены весьма широко и имеют значительные вариации. В девоне железорудно-скарновое рудообразование наиболее интенсивно выражено в Горном Алтае формированием Инской, Белорецкой, Чинетинской, Ханхаринской, Кузнецовской и других магмо-рудно-метасоматических систем (МРМС). Основную роль в них играет сопутствующее скарнам магнетитовое оруденение с небольшой добавкой золота (0,5–3,5 г/т), иногда редких земель.

Кузнецовское скарново-железорудное месторождение с золотом расположено в 2–3 км к юго-востоку от пос. Кузнецово. Открыто Л. М. Пожарицким в 1934 г. Поисково-разведочные работы Е. И. Евдокимовым проведены в 1952 г. Месторождение находится в стороне от известных скарновых объектов Алтая и долго не привлекало внимания исследователей. Приурочено оно к юго-западному крылу Михайловской синклинали и к Северо-Восточной зоне смятия, которой свойственна правосдвиговая конфигурация. Мы рассматриваем ее как транспрессивную сдвиговую структуру, характеризующуюся проявлением сильно обводненного дайкового магматизма. Кузнецовское рудное поле сложено глинистыми, хлорит-глинистыми сланцами, алевролитами, песчаниками и известняками камышенской свиты, являющимися останцами в кровле

риолитовых порфиров куюганского комплекса. Породы интродуцированы малыми телами и дайками диоритов, кварцевых диоритовых порфиритов, гранит-порфиров и кварцевых лейкогранит-порфиров куюганского комплекса. Мощности даек варьируют от 0,5 до 7 м. Породы диоритового состава отмечались чаще всего по скважинам на глубоких горизонтах месторождения. На поверхности они редки, чаще всего встречаются лейкогранит-порфиры. На соседней площади (район золоторудного месторождения Сурич) возраст формирования субвулканических тел куюганского комплекса, полученный по циркону U-Pb методом (SHRIMP-II), позднедевонский (от $382 \pm 3,5$ до $372,7 \pm 3,7$ млн лет) общей продолжительностью около 10 млн лет. Это позволяет считать верхнюю возрастную границу вулканического комплекса позднедевонской [5].

Диориты и кварцевые диоритовые порфиры – массивные, часто афировые породы темно-зеленовато-серой окраски. Текстура массивная, в меньшей степени пятнисто-полосчатая, обусловленная субпараллельным характером размещения зон вторичных изменений (карбонат, амфибол, хлорит в различных сочетаниях), иногда – полосками лимонитизированного пирита (0,045–0,14 мм), тонко распределенного по породе (3–5 %). Структура призматически-зернистая, реже субофитовая, характеризуется высокой степенью кристалличности беспорядочно ориентированных короткотаблитчатых зерен и лейст слабо измененного плагиоклаза (до 30–40 % породы) размерами 0,2×0,32 мм и таблитчатых форм размерами (0,04–0,18)×(0,22–1,0) мм. По составу плагиоклаз соответствует андезину (An № 36–49), в отдельных случаях – андезин-лабрадору. Интерстиции между лейстами плагиоклаза выполнены зеленым амфиболом, тонкозернистым агрегатом хлорита, лейкоксена, рудного минерала, реликтовыми зернами моноклинного пироксена. Бледно-зеленый клинопироксен (диопсид) нацело замещен агрегативными скоплениями амфибола и хлорита, наблюдается только в реликтовых формах. Основная ткань породы имеет микролитовую структуру с лейстами плагиоклаза (в длину до 0,05 мм) и неправильными зернами кварца.

В основной ткани породы присутствуют равномерно распределенные изометричные и ксеноморфные зерна кварца (0,03–0,06 мм). Прожилки тонковолокнистого амфибола, амфибол-эпидотового агрегата, моноклинного пироксена (мощностью до 5 мм) и пироксенового агрегата связаны с наложенными процессами скарнирования и ороговикования породы. Характерна равномерная (до 3–5 % от объема породы) рассеянная мелкая вкрапленность лимонитизированного пирита, часто связанная с биотитизацией породы и имеющая определенную линейность сообразно с размещением зон интенсивного развития вторичных минералов. Из аксессуаров отмечаются сфен, лейкоксен, ильменит, торит, сульфиды (пирит, пирротин). По



содержаниям SiO_2 , Na_2O , K_2O , сумме щелочей, MgO и других компонентов породы относится к средним плутоническим разностям, подотряду нормально-щелочных, семейству диоритов, виду диоритов двупироксеновой разновидности по [6].

Сиенит обнаружен в скважине на глубине 120 м и представлен порфировидной породой с интрателлурической фазой микроклин-пертита, часто с оплавленными краями зерен. Щелочной полевошпат характеризуется серовато-розоватой окраской. Основная ткань породы имеет гипидиоморфнозернистую микроструктуру. Состоит она из крупнопертитового калинатрового полевого шпата (42–75 %), амфибола (до 15 %) паргасит-феррогастингситового ряда ($f = 45\text{--}54\%$), биотита (до 10 %) истонит-сидерофиллитового ряда, сфена (до 1 %) и ильменита (540 г/т), редко салита ($f = 32\text{--}34\%$). Изредка отмечаются зерна кварца. Акцессории ограничены ильменитом, магнетитом, пиритом, сфеном. По главным компонентам химического состава (SiO_2 , $\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$) порода относится к подотряду умеренно-щелочных, семейству сиенитов, биотит-роговообманкой разновидности по [6].

Гранит-порфиры имеют порфировую структуру и микрогранитную микроструктуру основной ткани породы. Иногда в дайках наблюдается микропегматитовая структура. Во вкрапленниках присутствуют кварц, плагиоклаз (олигоклаз № 16–22), эпидотизированная роговая обманка и хлоритизированный биотит. Более крупные вкрапленники плагиоклаза имеют оплавленные границы, указывающие на их интрателлурическую природу. Такой плагиоклаз полисинтетически сдвойникован. Формы выделений его призматические размерами (4–5)×(14–16) мм. Кварц образует округлые ксеноморфные выделения размерами 1–4 мм, нередко с волнистым и блоковым погасанием. Амфибол по оптическим показателям отвечает обыкновенной роговой обманке, сохранился в реликтах и в большинстве случаев замещается эпидотом. Чешуйки биотита размерами

до 3 мм почти нацело замещаются хлоритом. Акцессории представлены ильменитом, апатитом, цирконом, сульфидами. Основная ткань породы сложена мелкими выделениями кварца, полевого шпата, микрочешуйками биотита и сильно серицитизирована и карбонатизирована. По химизму кислые породы комплекса относятся к умеренно-щелочным гранитам и умеренно-щелочным лейкогранитам с суммой щелочей, превышающей 8 % по [6].

Все разности пород характеризуются присутствием ильменита в качестве акцессория и могут рассматриваться как восстановленные дериваты ильменитовой серии по [14].

Химический состав дайковых пород Кузнецовского рудного поля приведен в табл. 1.

На классической диаграмме отношений $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})$ все типы пород попадают в поле пересыщенных глиноземом (пералюминиевых) пород (рис. 1, а).

По соотношениям $\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})-\text{SiO}_2$ составы кварцевых диоритов и щелочных сиенитов отвечают магнезиальным разностям, а остальных пород – железистым (см. рис. 1, б).

На диаграмме соотношений La и Nb фигуративные точки составов пород попадают в поля астеносферного и литосферного источников плавления субстратов (рис. 2), причем ранние фазы тяготеют к первому, а более эволюционированные лейкограниты – ко второму.

На диаграммах по экспериментальным расплавам кварцевые диориты и щелочные сиениты тяготеют к расплавам, образовавшимся за счет плавления амфиболитов, умеренно-щелочные граниты – фельзитических пелитов, а все остальные породы – метаграувакк (рис. 3).

Ультракислые породы (умеренно-щелочные лейкограниты) располагаются на максимуме степени известково-щелочного фракционирования ортоклаза и альбита. Экспериментально установлено, что этой ситуации могут отвечать уменьшение

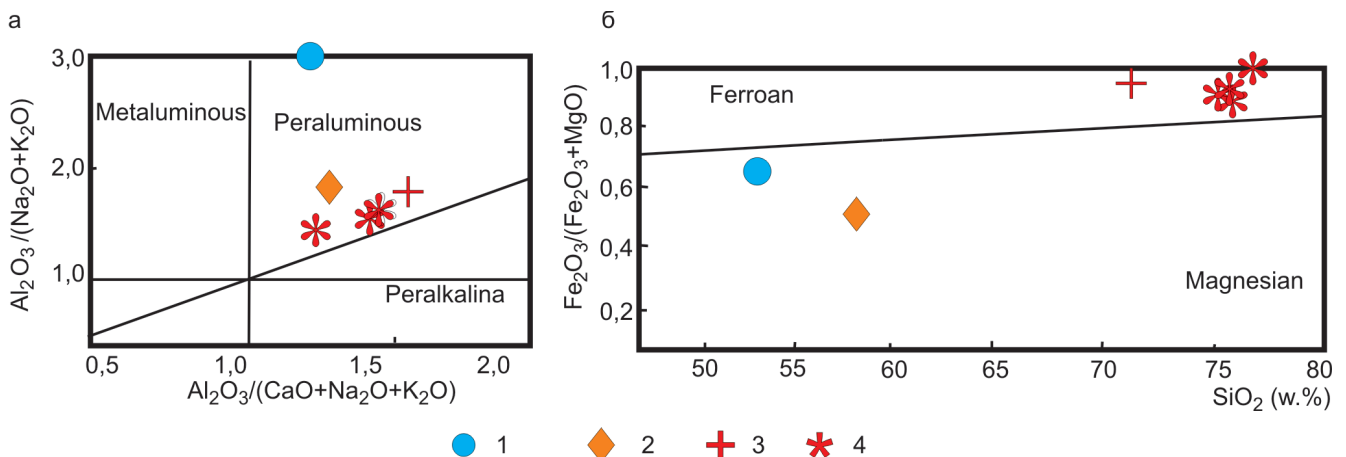


Рис. 1. Диаграммы $\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O})-\text{Al}_2\text{O}_3/(\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}+\text{CaO})$ по [19] (а) и $\text{SiO}_2-\text{Fe}_2\text{O}_3/(\text{Fe}_2\text{O}_3+\text{MgO})$ по [24] (б) для дайковых пород Кузнецовского месторождения

1 – диориты; 2 – сиениты; 3 – умеренно-щелочные граниты; 4 – умеренно-щелочные лейкограниты



Таблица 1

Представительные анализы дайковых образований Кузнецовского месторождения
(оксиды в мас. %, микроэлементы в г/т)

Оксид и химический элемент	1	2	3	4	5	6	7
SiO ₂	53,7	58,60	72,8	75,38	75,78	75,48	75,3
TiO ₂	1,17	0,82	0,074	0,14	0,05	0,13	0,15
Al ₂ O ₃	16,8	17,43	14,7	12,56	11,73	12,66	12,64
Fe ₂ O ₃	2,1	1,40	0,63	0,7	0,9	0,6	0,71
FeO	5,85	2,01	0,65	0,82	1,57	0,8	0,9
MnO	0,14	0,08	0,016	0,01	0,02	0,02	0,03
MgO	3,84	2,81	0,11	0,28	0,05	0,3	0,25
CaO	8,33	4,91	0,25	0,27	0,47	0,25	0,23
Na ₂ O	3,77	1,60	4,73	4,08	3,25	4,1	4,13
K ₂ O	1,1	8,55	3,96	4,32	5,62	4,34	4,33
P ₂ O ₅	0,18	0,19	0,1	0,04	0,01	0,03	0,04
П.п.п.	2,23	1,25	0,85	1,16	0,17	1,1	1,1
Сумма	100,0	99,65	99,9	99,72	99,6	99,8	99,85
V	217	85	7,93	13,3	2,4	13,3	14,1
Cr	19	23	15,5	20	8,8	20	14,6
Co	26,7	14,5	0,84	2,1	2,6	2,1	2,5
Ni	13,8	9,8	1,5	7,0	5,0	7,0	6,8
Cu	30,4	32,5	40,4	11,5	13,7	11,5	9,0
Zn	98,7	68,7	41,3	34,6	25,6	34,6	35,1
Rb	35,6	88,7	89,9	73,0	168,0	73,0	76
Sr	306	285	162	89,0	11,8	89,0	91
Nb	10,2	9,5	10,4	9,9	8,7	9,9	10,2
Cs	2,05	6,8	1,98	1,57	1,48	1,57	1,6
Ba	227	497	772	869	65,0	869	871
Pb	5,31	27,4	10,9	11,5	9,5	11,5	10,6
Th	2,88	7,5	5,94	8,1	18,6	8,1	8,5
La	10,9	36,0	6,64	26,0	33,0	26,2	26,5
Ce	24,6	48,1	20,7	45,0	17,8	15,0	13,7
Pr	3,33	11,5	1,97	5,8	10,3	9,8	9,5
Nd	17,4	14,5	8,91	20,0	35,0	35,8	36,7
Sm	3,19	5,4	2,38	4,0	7,1	4,0	4,1
Eu	0,97	1,01	0,52	0,38	0,71	0,38	0,35
Gd	3,91	6,1	2,6	3,7	4,6	3,7	3,75
Tb	0,7	0,97	0,58	0,56	0,76	0,66	0,54
Dy	4,51	3,8	3,51	3,5	4,8	4,5	3,4
Ho	0,89	0,95	0,6	0,73	0,99	0,98	0,7
Er	2,44	2,51	1,56	2,2	3,2	2,2	2,3
Tm	0,38	0,38	0,24	0,37	0,61	0,37	0,38
Yb	2,75	2,51	1,74	2,5	4,3	2,5	2,8
Lu	0,41	0,45	0,28	0,36	0,6	0,36	0,35
Y	24,8	25,7	19,4	27,0	30,0	27,0	29,3
Σ PЗЭ	101,18	159,88	71,63	142,1	153,8	133,45	134,37
Ga	17,1	15,6	14,5	11,6	13,7	11,6	12,1
Zr	97,7	153	70,6	94,0	93,0	94,0	96,2
Sc	28,3	21,5	4,88	5,7	2,2	5,7	5,8
Hf	2,66	4,5	3,14	3,1	4,4	3,1	3,3
Ta	0,27	0,5	0,72	0,95	0,79	0,95	0,96
Mo	1,2	1,5	1,66	1,7	1,8	1,7	1,9
Sb	2,76	–	0,65	0,7	0,8	0,7	0,9
Sn	1,6	–	0,91	1,1	1,2	1,1	1,5
Be	<1	1,1	1,47	1,5	1,6	1,5	1,5
W	0,61	1,3	0,8	2,4	0,74	2,4	2,5
U	0,85	1,8	1,59	1,83	1,47	1,8	1,81
Li	32,8	21,3	6,99	7,7	8,0	7,7	7,9
Ge	1,53	–	1,17	1,2	1,21	1,2	1,3
Ag	0,013	–	0,012	0,02	0,021	0,02	0,025
Bi	<0,1	–	<0,1	0,1	0,12	0,1	0,15



Оксид и химический элемент	1	2	3	4	5	6	7
(La/Yb) _N	2,62	9,47	2,52	6,86	5,06	6,92	6,2
Nb/Ta	37,8	19,0	14,4	10,4	11,0	10,4	10,6
Eu/Eu*	0,84	0,54	0,64	0,3	0,36	0,3	0,27
Th/U	3,39	4,17	3,73	4,4	12,6	4,5	4,7
TE _{1,3}	0,99	1,16	1,21	0,96	0,76	0,77	0,71
(La/Sm) _N	2,09	4,09	1,71	3,98	2,8	4,0	3,97
(Gd/Yb) _N	1,14	1,95	1,2	1,18	0,86	1,19	1,08

Примечание. Анализы выполнены в аналитическом центре Института геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск). Значения РЗЭ нормированы по хондриту по [9]. TE_{1,3} – тетрадный эффект фракционирования РЗЭ как среднее между первой и третьей тетрадами. Породы Кузнецовского рудного поля: 1 – диорит, 2 – сиенит, 3 – гранит умеренно-щелочной, 4–7 – лейкогранит умеренно-щелочной.

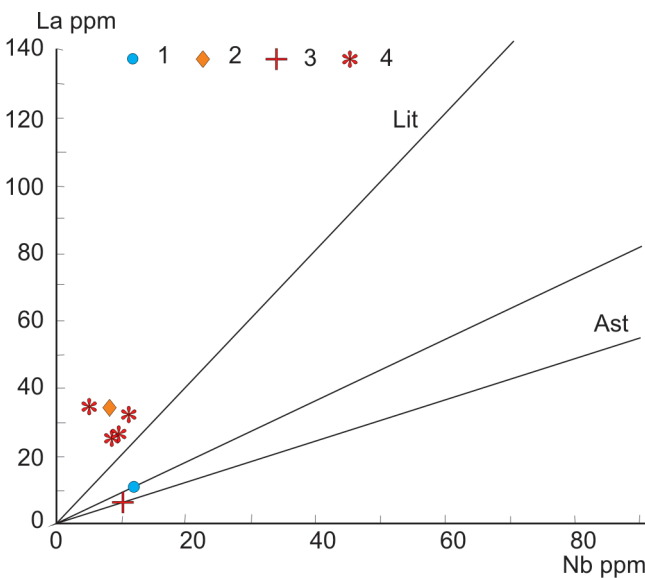


Рис. 2. Диаграмма соотношений La–Nb по [11] для дайковых пород Кузнецовского месторождения

Поля на диаграмме: Ast – поле лав, производных астеносферного источника, La/Nb от 0,6 до 0,9; Lit – литосферный источник, La/Nb > 2; фигуративные точки составов пород: 1 – диориты, 2 – сиениты, 3 – умеренно-щелочные граниты 4 – умеренно-щелочные лейкограниты

щелочности в процессе взаимодействия вода – порода или небольшая степень ассимиляции пелитов, которые легко увеличивают показатель A/CNK. Это свойственно как раз конечным дифференциатам дайковых образований Кузнецкого месторождения. Именно ассимиляция пелитов и имела место при генерации умеренно-щелочных лейкогранитов.

В породных типах даек проявлены два типа тетрадного эффекта фракционирования (ТЭФ) РЗЭ – М (TE_{1,3} > 1,1) и W (TE_{1,3} < 0,9) (см. табл. 1). Известно, что проявление ТЭФ РЗЭ обусловлено аномальными параметрами флюидного режима магматитов [3]: W-тип – преимущественно преобладающей обводненностью магматогенных флюидов, а М-тип – галоидными соединениями и комплексами, среди которых важнейшую роль играют фтор-комплексы. Нами проанализировано поведение меди в породах и проявление ТЭФ РЗЭ (рис. 4). В случае проявления ТЭФ РЗЭ W-типа установлено, что уменьшение

концентраций меди согласуется с его уменьшением. Обратная картина наблюдается в случае проявления ТЭФ РЗЭ М-типа: здесь увеличение ТЭФ РЗЭ согласуется со слабым увеличением концентраций меди в расплавах. Проявление М-типа связано с насыщенностью магматогенных флюидов фтором и его активностью [3].

Терригенные породы рудного поля в пределах рудных залежей превращены преимущественно в кварц-актинолит-гранатовые с эпидотом и кальцит-актинолит-геденбергитовые скарны и роговики. На месторождении выделены три главных участка.

Наиболее богатое магнетитовое оруденение первого участка приурочено к двум линейно вытянутым в северо-западном направлении телам скарнированных известняков и скарнов кальцит-актинолит-гранатового и кальцит-актинолит-геденбергитового составов. Рудная зона прослежена по падению на 300 м и по простиранию на 400 м. Мощность скарновых тел колеблется от 2 до 50 м с падением на северо-восток под углами 25–80° согласно с вмещающей осадочной толщей. Месторождение состоит из нескольких рудных тел и линз со скарново-магнетитовым оруденением (10 рудных тел) мощностью 0,45–11,6 м с содержанием железа 32,2–55,12, редко 66,3 % (в среднем 47,1 %), а в окисленных рудах – до 60 % и выше.

В 2010 г. нашими работами в геденбергит-магнетитовых рудах с сульфидами установлено золото (0,1–3,6 г/т), серебро (2–45 г/т), платина (0,5–2 г/т), палладий (0,3–1,5 г/т), иттрий (0,05–0,5 %), иттербий (0,03–0,1 %). Спектральным анализом в рудах выявлены также (%): кобальт 0,01–0,1, никель 0,01–0,08, медь 0,08–0,5, свинец 0,001–0,03, олово 0,001–0,05, хром 0,003–0,03, германий 0,001–0,04, молибден 0,03–0,09.

В скарнах наблюдаются две генерации граната. Гранат первой генерации сливной аллотриоморфно-зернистой микроструктуры с размерами зерен менее 1 мм, второй – в виде идиоморфных кристаллов размерами до 2–2,5 см часто зонального строения с аномальными эффектами. Нередко такой гранат сопровождается кварцем с волнистым погасанием. В гранатовых скарнах отмечаются гнезда магнетита и гематита.

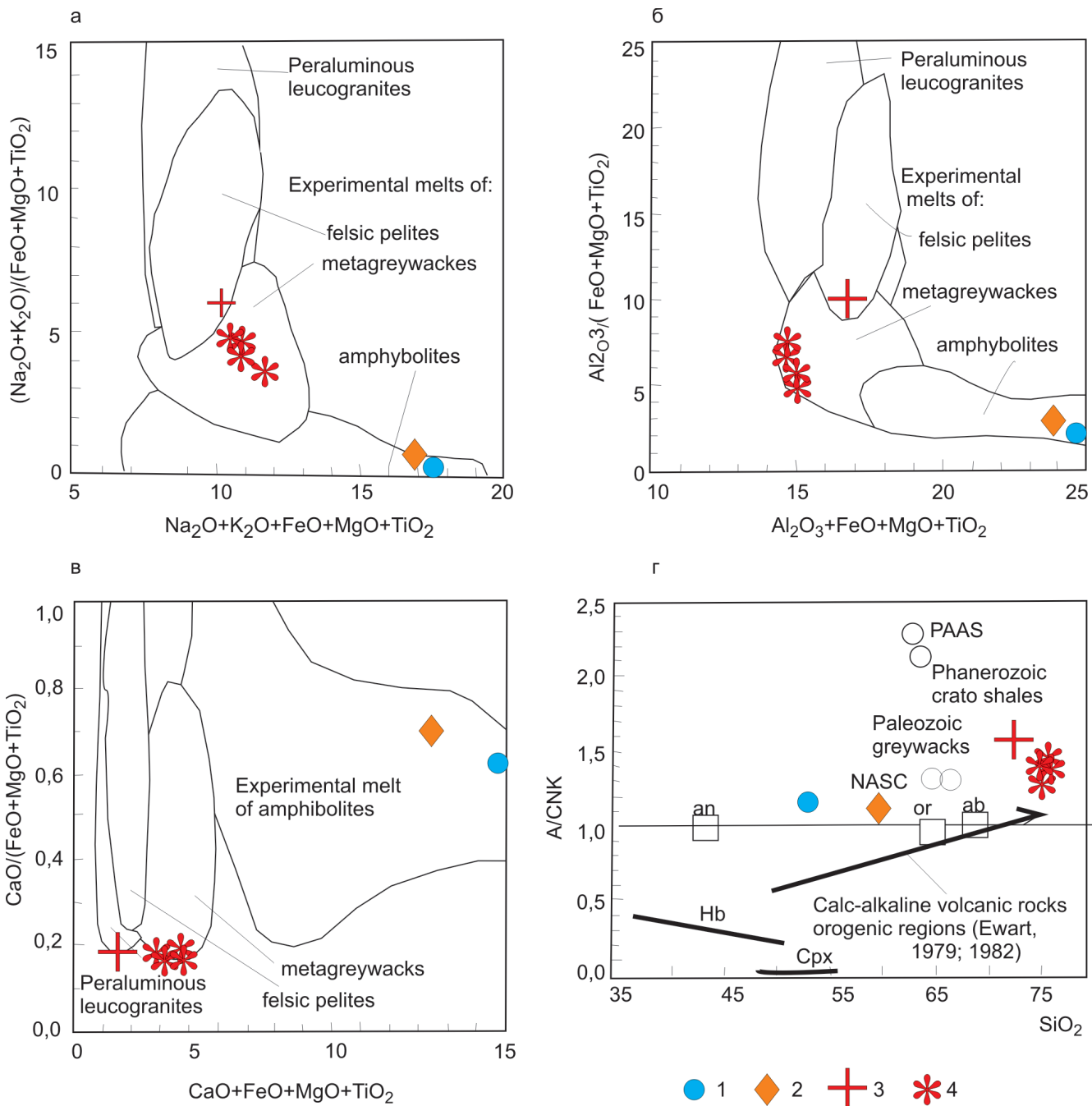


Рис. 3. Диаграммы композиционных экспериментальных расплавов из плавления: а – фельзических пелитов (мусковитовых сланцев), б – метаграувакк, в – амфиболитов для дайковых пород Кузнецовского месторождения; д – диаграмма SiO₂–A/CNK) для даек Кузнецовского месторождения. Тренд известково-щелочного фракционирования вулканических пород орогенных регионов по [12, 15]; А – Al₂O₃, CNK – сумма CaO, Na₂O, K₂O. Остальные усл. обозн. см. на рис. 2

Кальцит-эпидот-геденбергитовые скарны массивные, с вкрапленностью и гнездами магнетита, иногда переходящими в массивные магнетитовые руды. Эпидот и кальцит в них образуют гнезда и вкрапленность. Нередко геденбергит содержит вкрапленность, гнезда и прожилки пирита, пирротина, халькопирита, сопровождающиеся кварцем гребенчатой микроструктуры.

Скарновые парагенезисы на месторождении пересекаются кальцитовыми прожилками поздней генерации. Кальцит прожилков имеет светлорозовую окраску и крупнокристаллическое сложение. Он ассоциирует с хлоритом, образующим

вкрапленность и гнезда. Это пострудная минерализация.

Со стороны лежащего бока скарновых залежей наблюдаются кварц-альбит-турмалиновые метасоматиты мощностью 0,5–12 м, местами отмечается вкрапленность пирита и арсенопирита размерами от 1 до 2 мм. В них определены содержания золота (0,2–3,3 г/т) и серебра (5–46 г/т), а также лантана, иттрия, церия (0,05–0,1 %).

Между кварц-альбитовыми метасоматитами и скарнами локализуются кварциты с обильными ксеноморфными выделениями магнетита, а также прожилками кварца с вкрапленностью маг-



Таблица 2

Концентрации элементов-примесей в минералах Кузнецовского месторождения (г/т)

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8
Be	3,04	2,04	3,34	0,6	1,95	3,15	7,9	5,1
Ti	37,67	80,02	75,65	178,6	789	804	154	1615
V	305,61	8,826	457,43	460,4	12,5	11,6	3,8	28,5
Cr	7,204	12,239	15,76	50,3	125,9	187,6	45	45,7
Mn	168,305	153,501	198,54	820	1280	1580	347	2823
Co	11,731	39,057	43,67	72	906	945	123	5,6
Ni	18,68	2,35	21,67	19,4	178	231	237	27
Cu	89,39	26,78	37,56	83,5	78,4	87,1	98	235
Zn	28,36	65,11	56,13	156	78,5	88,9	76	615
Ga	8,44	5,76	12,67	11,6	13,8	16,9	18,9	73,5
Rb	25,75	1,48	15,76	16,7	4,96	3,65	2,8	44,3
Sr	34,65	496,28	145,77	211	231,5	98,3	11,6	250
Y	2,45	1,88	3,56	4,5	0,11	3,23	22,1	17,7
Zr	6,87	113,47	54,72	85	29,3	7,07	19,7	21
Nb	2,102	1,64	3,45	4,4	1,52	0,66	1,3	9,8
Mo	28,2	9,68	35,83	154	3,05	2,43	6,7	21,5
Cs	12,6	3,76	14,89	12,9	12,8	10,8	5,8	8,6
Ba	323,02	319,8	376,4	176	395	20,8	8,2	871
La	4,38	4,17	4,39	0,21	46,1	2,11	6,6	65,4
Ce	0,54	0,48	1,26	2,6	13,9	2,6	19,4	153,1
Pr	1,634	0,976	1,765	0,05	6,1	0,42	3,2	17,3
Nd	6,22	3,486	7,876	0,2	27,1	1,51	13,2	58,1
Sm	0,987	0,393	1,235	0,05	4,86	0,33	0,03	10,5
Eu	0,353	0,91	0,543	0,012	1,3	0,05	0,035	0,36
Gd	0,769	0,307	0,879	0,045	9,74	0,31	4,4	4,75
Tb	0,235	0,046	0,453	0,012	1,7	0,049	0,8	0,58
Dy	0,12	0,243	0,354	0,06	13,3	0,28	3,9	3,0
Ho	0,078	0,064	0,126	0,02	3,64	0,066	0,6	0,63
Er	0,183	0,176	0,321	0,06	11,7	0,22	1,15	2,2
Tm	0,10	0,10	0,541	0,015	1,28	0,029	0,15	0,48
Yb	0,133	0,227	0,453	0,15	5,83	0,17	0,9	4,2
Lu	0,016	0,037	0,027	0,015	1,03	0,034	0,14	0,98
Hf	0,045	2,682	4,571	2,5	0,88	0,18	1,4	1,41
Ta	0,193	0,250	0,765	0,03	0,13	0,10	4,7	2,4
W	61,82	9,155	79,61	88,9	1,19	1,21	22,6	21,7
Pb	706,22	96,42	678,5	554,7	34,94	20,29	32	1580
Th	0,365	0,608	0,765	0,65	0,94	0,29	10,4	10,5
U	1,788	0,538	3,87	1,13	0,28	0,25	2,4	2,3
Σ TR	18,18	13,5	23,78	7,75	75,2	11,4	76,6	327,2

Примечание. Анализы выполнены методом ICP-MS в лаборатории ИМГРЭ (Москва). Минералы Кузнецовского месторождения: 1–4 – магнетиты; 5, 6 – геденбергиты; 7, 8 – турмалины.

нетита и пирита (0,1–2,4 мм). Кварциты имеют мозаичную микроструктуру с размерами зерен кварца 0,05–0,1 мм). В кварцитах с сульфидами определены золото (0,1–5,1 г/т) и серебро (14–65 г/т).

Пострудная минерализация представлена прожилками кальцита мощностью от 0,5 до 2 см, пересекающими все ранее описанные агрегаты. Местами в прожилках отмечаются выделения хлорита в виде гнезд размером до 1 см.

В виде вкрапленности, небольших гнезд и нитевидных прожилков в скарных рудах присутствуют пирит, пирротин и халькопирит. С поверхности развиты мартит, гематит и лимонит. Наши предшественники в результате спектрального анализа в пробах магнетитовых руд обнаружили тысячные, редко сотые доли процента германия, сотые доли процента меди, свинца и цинка, редко тысячные доли процента бериллия. Запасы руды оценены в 1,5–2,0 млн т.

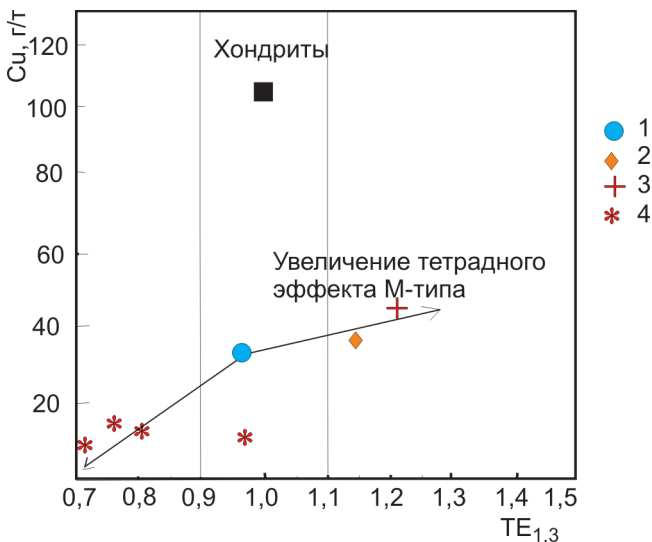


Рис. 4. Диаграмма соотношений Cu–TE_{1,3} в дайковых породах Кузнецовского месторождения. Среднее содержание меди в хондритах по [24]
Усл. обозн. см. на рис. 2

На втором участке, расположенном в 2,7 км юго-западнее первого, в поле распространения окварцованных хлоритовых сланцев и алевролитов отмечается узкая (150–300 м) полоса скарнированных пород с убогим магнетитовым оруденением.

На севере месторождения на третьем участке встречены оруденелые скарны с содержанием валового железа до 20 %, в среднем 15–17 %.

Содержания элементов-примесей в минералах месторождения приведены в табл. 2.

Магнетиты месторождения по химическому составу подразделяются на два типа: 1) низко редкоземельный с высокими содержаниями Ti, Cr, Mn, Co, Zn, Mo; 2) умеренно редкоземельный с низкими концентрациями Ti, Cr, Mn, Co, Ni, Zn, Mo. Наиболее высокие концентрации редких земель характерны для геденбергитов и турмалинов месторождения (см. табл. 2).

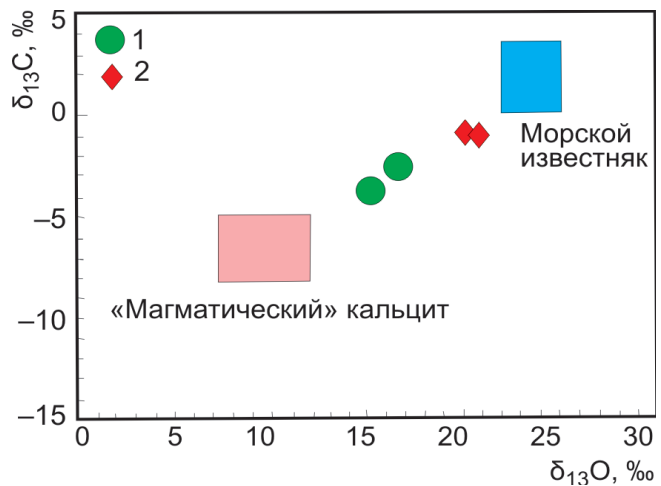


Рис. 5. Диаграмма соотношений $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ для карбонатов Кузнецовского месторождения. Цветные поля для «магматического» кальцита и морского известняка на диаграмме выделены по данным [20, 21]
Кальцит: 1 – из кальцит-эпидот-геденбергитовых скарнов, 2 – из пострудных прожилков

В 400 м к западу от железорудного Кузнецовского месторождения известно золотополиметаллическое проявление, эксплуатировавшееся в конце XVIII в. как медное. Здесь в кварц-актинолитовых метасоматитах и роговиках встречаются гематит, лимонит, пленки и гнезда малахита. Содержание меди до 0,02 %, цинка до 0,15 %, золота до 1,6 г/т. По архивным данным руды содержат кобальт (до 0,3 %), редко триоксид вольфрама (до 0,24 %).

Запасы железа при минимальном бортовом содержании 27 % оцениваются в 116 тыс. т первичных руд и 530 тыс. т окисленных. Прогнозные ресурсы категории P₂ для рудного поля 2–2,5 млн т. Прогнозные ресурсы золота категории P₂ для Кузнецовского рудного поля оценены по аналогии с подобными месторождениями в 45 т.

Термобарогеохимические и изотопные данные минералов месторождения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Термобарогеохимические и изотопные данные исследований минералов Кузнецовского месторождения

Минерал	Кол-во анализов	T _{гом} , °C	Соленость, мас. %-экв.	$\delta^{34}\text{S}$, ‰	$\delta^{13}\text{C}$, ‰	$\delta^{18}\text{O}$, ‰
Геденбергит из скарнов	5	440–450	24–28	–	–	
Кварц из прожилков с сульфидами	4	275–285	12,4–13,1	–	–	
Пирит						
из скарнов	3	–	–	–1,1...–1,7	–	
из прожилков	3	–	–	3,5–5,5	–	
Кальцит						
из кальцит-эпидот-геденбергитовых скарнов	3	320–330	22–24	–	–6,5...–6,7	15,5–16,1
из пострудных прожилков	4	185–190	4,2–5,1	–	–1,2...–1,8	19,0–20,1

Примечание. Изотопный состав серы, кислорода и углерода определен на масс-спектрометре Finnigan MAT 253 в Институте геологии и минералогии СО РАН (Новосибирск).



Температура гомогенизации первичных газожидких включений в минералах скарнового этапа составляла 440–450 °С, первичных включений из кварца гидротермального этапа с сульфидами – 275–285 °С. Пострудные ассоциации характеризуются самыми низкими температурами кристаллизации – 185–195 °С. В этой последовательности снижения температур кристаллизации минералов наблюдается уменьшение солёности включений от 28 до 4,2 мас. %-экв.

В пиритах из скарнов $\delta^{34}\text{S}$, ‰ несколько ниже, чем в пиритах из гидротермальных прожилков, однако близко к значениям для магматогенной серы по [17–19].

Значения $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ в сидеритах и кальцитах различных образований свидетельствуют о смешанном их характере – ювенильно-коровом (см. рис. 1). В то же время изотопные метки углерода карбонатов близки к составу «концентрированной» изотопно «тяжелой» ($\delta^{13}\text{C} = -7,0$ ‰) фазы мантийного углерода (рис. 5). Это также подтверждает предположение и о возможном участии трансмагматических флюидов в коровом рудогенезе Кузнецовского месторождения.

Интерпретация результатов и выводы

Приведенные данные показывают, что Кузнецовская МРМС представляет собой типичный объект, связанный пространственно и парагенетически с интрузивным магматизмом. Рудогенерирующий очаг характеризовался значительной дифференциацией, и его отщепления представлены дайками диоритов, кварцевых диоритов, гранит-порфиров и лейкогранитов сильно эволюционированного магматического очага и имеют вначале щелочной, а затем умеренно-щелочной уклон в заключительных фазах. Магмо-рудно-метасоматическая система контролируется Северо-Восточной зоной смятия и имеет малый уровень среза. Скорее всего, по этой причине на поверхности проявлены только дайковые образования куяганского комплекса, а на глубине могут присутствовать и более крупные интрузивные тела. По геохимическим данным дайковые образования имеют астеносферно-литосферный источник плавления. Магматизм несет в себе черты гибридных магм, образующихся по механизму образования MASH-зоны в основании нижней коры в результате подтока базальтов к основанию коры и плавления коровых субстратов, с образованием гибридных магм [13]. В итоге магматизм и оруденение изученной системы можно отнести к мантийно-коровым образованиям. Отделение рудных металлов (меди, вольфрама и др.), скорее всего, связано с увеличением концентраций воды и фтора в магматогенных флюидах.

Доминируют в рудной части скарны, однако по периферии от них локализованы и жильные золото-полиметаллические проявления. Эволюция термобарогеохимических показателей имеет закономер-

ность, аналогичную для золото-медно-скарновых месторождений: понижение солёности растворов и температур гомогенизации газожидких включений в минералах от ранних этапов к поздним [2]. Месторождение малосернистое, и сера в рудных минералах имеет магматогенный источник. Изотопы углерода и кислорода в минералах месторождения указывают на ювенильно-коровые метки в них.

Приуроченность месторождения к транспресивной Северо-Восточной зоне смятия, а также признаки мантийно-корового взаимодействия в формировании МРМС, мантийная изотопия серы и углерода в минералах руд не исключает возможности отнесения месторождения к объектам нелинейной металлогении по [8], в генерации которых могли принимать участие не только магматогенные, но и трансмагматические рудоносные флюиды.

Состав руд Кузнецовского месторождения показывает близость к типичным железо-оксид-медно-золоторудным объектам (IOCG класса) с повышенными концентрациями Au, Ag, Pt, Pd, Y, Yb, W. Специфическая особенность Кузнецовской МРМС – повышенные концентрации в рудах платины и палладия. Наиболее высокие суммарные концентрации редких земель характерны для турмалинов и геденбергитов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гусев, А. И.** Железо-оксид-медно-золоторудный класс месторождений западной части Алтае-Саянской области и прилегающих территорий [Текст] / А. И. Гусев, Н. И. Гусев // *Природа и экономика Кузбасса*. – Новокузнецк, 2007. – С. 10–14. – (Регион. сб. науч. статей; вып. 11, т. 10).
2. **Гусев, А. И.** Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории [Текст] / А. И. Гусев. – Томск : STT, 2003. – 308 с.
3. **Гусев, А. И.** Тетрадный эффект фракционирования редкоземельных элементов и его использование в решении проблем петрологии гранитоидов [Текст] / А. И. Гусев, А. А. Гусев // *Успехи современного естествознания*. – 2011. – № 5. – С. 45–49.
4. **Гусев, Н. И.** Верхнепалеозойские и мезозойские железо-оксидные медно-золоторудные системы юго-запада Алтае-Саянского региона Сибири [Текст] / Н. И. Гусев, Л. С. Николаева, А. И. Гусев // *Региональная геология и металлогения*. – 2006. – № 29. – С. 116–126.
5. **Гусев, Н. И.** Возраст магматизма (U-Pb, SHRIMP II), контролирующего эпитемальное оруденение Новофирсовского золоторудного узла (Алтай) [Текст] / Н. И. Гусев, С. П. Шокальский, А. И. Гусев // *Региональная геология и металлогения*. – 2011. – Вып. 45. – С. 98–105.
6. **Петрографический кодекс России.** Магматические, метаморфические, метасоматические, импактные образования [Текст]. Изд. 3-е, испр. и доп. Утв. МПК 10 января 2008 г. – СПб. : ВСЕГЕИ, 2009. – 200 с.



7. **Соловьев, С. Г.** Железооксидно-золото-медные и родственные месторождения [Текст] / С. Г. Соловьев. – М. : Научный мир, 2011. – 472 с.

8. **Щеглов, А. Д.** Нелинейная металлогения и глубины Земли [Текст] / А. Д. Щеглов, И. Н. Говоров. – М. : Наука, 1985. – 325 с.

9. **Anders, E.** Abundances of the elements: meteoric and solar [Text] / E. Anders, N. Greevesse // *Geochim. et Cosmochim. Acta.* – 1989. – Vol. 53. – P. 197–214.

10. **De Paolo, D. J.** Neodymium isotopes in basalts of the southwest Basin and Range and lithosphere thinning during continental extension [Text] / D. J. De Paolo, E. E. Daley // *Chemical Geology.* – 2000. – Vol. 169. – P. 157–185.

11. **Gandhi, S. S.** Magmatic-hydrothermal Fe oxide±Cu±Au deposits: classification for a digital database and an overview of selected districts [Electronic resource] / S. S. Gandhi // IAVCEI General Assembly 2004, Pucón, Chile. – CD-ROM, Abstracts 01a., 2004. – P. 169.

12. **Gusev, A. I.** The IOCG class deposits of West Altai-Sajan region and lapout territories of Mongolia and China [Text] / A. I. Gusev, N. I. Gusev // *Алтай: экология и природопользование : тр. IX российско-монгольской науч. конф. молодых ученых и студентов.* – Бийск, 2010. – С. 6–10.

13. **Highly** evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China [Text] / B.-M. Jahn, F. Wu, R. Capdevila [et al.] // *Lithos.* – 2001. – Vol. 59. – P. 171–198.

14. **Hildreth, W.** Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile [Text] / W. Hildreth, P. F. Moorbath // *Contributions to Mineralogy and Petrology.* – 1988. – Vol. 98. – P. 455–489.

15. **Iron** oxide copper gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits [Text] / D. I. Groves, F. P. Bierlein, L. D. Meinert, M. W. Hitzman // *Econ. Geol.* – 2010. – Vol. 105. – P. 641–654.

16. **Ishihara, S.** The granitoid series and mineralization [Text] / S. Ishihara // *Econ. Geol.* – 1981. – 75-th Anniversary volume. – P. 458–484.

17. **Ohmoto, H.** Hydrogen and oxygen isotope composition of fluid inclusion in the Kuroko deposits [Text] / H. Ohmoto, R. O. Rye // *Econ. Geol.* – 1974. – Vol. 69. – P. 947–953.

18. **Ohmoto, H.** Isotopes of sulfur and carbon [Text] / H. Ohmoto, R. O. Rye // *Geochemistry of hydrothermal ore deposits.* – N.Y. : Wiley Interscience, 1979. – P. 509–567.

19. **Porter, T. M.** Hydrothermal Iron Oxide Copper Gold and Related Deposits: A Global Perspective [Text] / T. M. Porter. – Adelaide : PGC Publishing, 2000. – 350 p.

20. **Porter, T. M.** Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective [Text] / T. M. Porter. – Adelaide : PGC Publishing, 2002. – 377 p.

21. **Villaseca, C.** A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts [Text] / C. Villaseca, L. Barbero, V. Herberos // *Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science.* – 1998. – Vol. 89. – P. 113–119.

22. **Wasson, J. T.** Composition of chondrites [Text] / J. T. Wasson, G. W. Kallemeyn // *Phil. Trans. Royal Soc. Lond.* – 1988. – Vol. 78. – P. 535–544.

23. **William, P. J.** Iron oxide-copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin [Text] / P. J. Williams, M. D. Barton, D. A. Johnson // *Econ. Geol.* – 2005. – Vol. 100. – P. 371–405.

REFERENCES

1. Gusev A.I., Gusev N.I. [Iron-oxide-copper-gold-ore class of deposits in the western part of the Altai-Sayan region and adjacent territories]. *Priroda i ekonomika Kuzbassa. Regional'nyy sbornik nauchnykh statey* [Nature and economics of Kuzbass. Regional collection of scientific papers]. Novokuznetsk, 2007, issue 11, vol. 1, pp. 10–14. (In Russ.).

2. Gusev A.I. *Metallogeniya zolota Gornogo Altaya i yuzhnoy chasti Gornoy Shorii* [Gold Metallogeny of the Mountain Altai and the southern part of the Mountain Shoria]. Tomsk, STT Publ., 2003. 308 p. (In Russ.).

3. Gusev A.I., Gusev A.A. [Tetradic effect fractionation of rare-earth elements and its application to granitoid petrology]. *Uspekhi sovremennogo estestvoznaniya – Advances in Modern Natural Science*, 2011, no. 5, pp. 45–49. (In Russ.).

4. Gusev N.I., Nikolaeva L.S., Gusev A.I. [The Upper Paleozoic and Mesozoic iron-oxide copper-gold-ore systems in the southwest of the Altai-Sayan region of Siberia]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya – Regional Geology and Metallogeny*, 2006, no. 29, pp. 116–126. (In Russ.).

5. Gusev N.I., Shokalsky S.P., Gusev A.I. [The U-Pb and SHRIMP II age of magmatism controlling the epithermal mineralisation of the Novofirsovsky gold-ore cluster (Altai)]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya – Regional Geology and Metallogeny*, 2011, issue 45, pp. 98–105. (In Russ.).

6. *Petrograficheskiy kodeks Rossii. Magmaticheskie, metamorficheskie, metasomaticheskie, i impaktnye obrazovaniya* [Petrographic code of Russia. Magmatic, metamorphic, metasomatic, and impact formations]. *Petrographic code of Russia*. 3rd edition, revised and enlarged. Adopted by MPK on the 10th of January 2008. St. Petersburg, VSEGEI Publ., 2009. 200 p. (In Russ.).

7. Solovyev S.G. *Zhelezoosidno-zoloto-mednye i rodstvnyye mestorozhdeniya* [Iron-oxide-gold-copper and related deposits]. Moscow, Nauchny mir Publ., 2011. 472 p. (In Russ.).

8. Shcheglov A.D., Govorov I.N. *Nelineynaya metallogeniya i glubiny Zemli* [Non-linear metallogeny and the Earth's subsurface]. Moscow, Nauka Publ., 1985. 325 p. (In Russ.).



9. Anders E., Greevesse N. Abundances of the elements: meteoric and solar. *Geochim. et Cosmochim. Acta*, 1989, vol. 53, pp. 197–214.
10. De Paolo D.J., Daley E.E. Neodymium isotopes in basalts of the southwest Basin and Range and lithosphere thinning during continental extension. *Chemical Geology*, 2000, vol. 169, pp. 157–185.
11. Gandhi S.S. Magmatic-hydrothermal Fe oxide±Cu±Au deposits: classification for a digital database and an overview of selected districts. IAVCEI General Assembly 2004, Pucón, Chile. CD-ROM, Abstracts 01a., 2004, p. 169.
12. Gusev A. I. The IOCG class deposits of West Altai-Sajan region and lapout territories of Mongolia and China. *Altai: Ecology and Nature: Proc. IX Russian-Mongolian Conf. of young scientists and students*. Biysk, 2010, pp. 6–10.
13. Jahn B.-M., Wu F., Capdevila R., et al. Highly evolved juvenile granites with tetrad REE patterns: the Wodue and Baerzhe granites from the Great Xing'an Mountains in NE China – *Lithos*, 2001, vol. 59, pp. 171–198.
14. Hildreth W., Moorbath P.F. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1988, vol. 98, pp. 455–489.
15. Groves D.I., Bierlein F.P., Meinert L.D., Hitzman M.W. Iron oxide copper gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits. *Econ. Geol.*, 2010, vol. 105, pp. 641–654.
16. Ishihara S. The granitoid series and mineralization – *Econ. Geol.*, 1981, 75-th Anniversary volume, pp. 458–484.
17. Ohmoto H., Rye R.O. Hydrogen and oxygen isotope composition of fluid inclusion in the Kuroko deposits. *Econ. Geol.*, 1974, vol. 69, pp. 947–953.
18. Ohmoto H., Rye R.O. Isotopes of sulfur and carbon. *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. N.Y., Wiley Interscience, 1979, pp. 509–567.
19. Porter T.M. Hydrothermal Iron Oxide Copper Gold and Related Deposits: A Global Perspective. Adelaide, PGC Publishing, 2000. 350 p.
20. Porter T.M. Hydrothermal iron oxide copper-gold and related deposits: A global perspective. Adelaide, PGC Publishing, 2002. 377 p.
21. Villaseca C., Barbero L., Herreros V.A re-examination of the typology of peraluminous granite types in intracontinental orogenic belts – *Trans. of Royal Soc. of Edinburg Earth Science*, 1998, vol. 89, pp. 113–119.
22. Wasson J.T., Kallemeyn G.W. Composition of chondrites. *Phil. Trans. Royal Soc. Lond*, 1988, vol. 78, pp. 535–544.
23. William P.J., Barton M.D., Johnson D.A. Iron oxide-copper-gold deposits: Geology, space-time distribution, and possible modes of origin – *Econ. Geol.*, 2005, vol. 100, pp. 371–405.

© А. И. Гусев, 2016