

УДК 552.11: 552:551:550.42

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ГЕНЕЗИСА ВОССТАНОВЛЕННЫХ ИНТРУЗИВНО-СВЯЗАННЫХ ЗОЛОТОРУДНЫХ СИСТЕМ

**Гусев А.И.***Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина, Бийск,  
e-mail: anzerg@mail.ru*

Восстановленные интрузивно-связанные золоторудные системы связаны с фельзическими массивами небольших размеров и часто сопровождаются комплексом даек лампрофиров. Золотогенерирующие гранитоиды относятся к трём типам: I – типу сильно контаминированному и редуцированному, шохонитовому (SH) и адакитовому (AD). На некоторых месторождениях отмечено совмещение сильно контаминированных и редуцированных гранитоидов и шохонитовых. Эти системы формируют месторождения скарнового, золото-черносланцевого, жильного золото-сульфидно-кварцевого типов. Восстановленная обстановка сохраняется на всём протяжении эволюции таких систем от магматогенного до гидротермального этапов.

**Ключевые слова:** Золоторудные месторождения, восстановленные системы, магматогенные флюиды, минеральный состав, изотопы стронция, кислорода, серы

## SOME ASPECTS OF THE REDUCED INTRUSIVE-RELATED GOLD SYSTEMS

**Gusev A.I.***The Shukshin Altai State Academy of Education, Biisk,  
e-mail: anzerg@mail.ru*

The reduced intrusive-related gold systems related with felsic massives small size and it accompanied by complex dikes of lamprophyres quickly. The gold-generating granitoids carry to third types: I- type strong contamination and reduced, shoshonitic (SH) and adakititic (AD). Reconciling strong contamination and reduced with shoshonitic types note on some deposits. These systems form deposits of different types: skarns, gold black shist deposits and lode gold-sulfide-quartz. Reduced condition retain on the all extent of evolution of so systems from magmatic to hydrothermal stages.

**Keywords:** Gold deposits, reduced systems, magmatic fluids, mineral composition, isotope strontium, oxygenium, sulfur

Восстановленные или редуцированные золотоносные системы, пространственно и парагенетически связанные с интрузиями, генерируют специфические золоторудные месторождения разного масштаба – от мелких до супергигантских, к числу которых относятся месторождения мирового класса по запасам золота Мурунтау (Узбекистан), Сухой Лог (Забайкалье), Кумтор (Киргизия), Бакырчик (Казахстан) и другие [2, 5, 6, 7]. Этим и определяется актуальность проведения исследований по выявлению генетических аспектов формирования золоторудных систем такого класса. Восстановительная среда во флюидах рудогенерирующих гранитоидов характеризуется тем, что основными переносчиками золота являются комплексы хлора и серы [8].

Цель исследования – на основе авторских материалов и литературных данных осветить некоторые аспекты генезиса восстановленных золоторудных систем.

Редуцированные золоторудные системы формируют Результаты исследований. месторождения жильного золото-сульфидно-кварцевого, штокверкового и скарново-

го типов [8]. Высокая восстановленность прослеживается на всех этапах становления таких месторождений – от магматогенных флюидов рудогенерирующих магматитов до гидротермальных растворов продуктивных ассоциаций [1, 2, 3, 4]. Характерные генетические признаки восстановленных интрузивно-связанных золоторудных систем различных регионов сведены в табл. 1.

Факторы глубинности магмо-рудно-метасоматических систем (МРМС) целиком определяются импактным выбросом в литосферу мощнейших ингредиентов магмо-флюидо-динамических систем, генерированных глубокими сферами Земли (астеносферой и более глубокими горизонтами верхней мантии). Такой сценарий влияния литосферного контроля формирования крупных провинций, вмещающих гигантские месторождения золота (Хоумстейк, Мурунтау, Ашанти, Тэлфер, Голден Майд, Сухой Лог и другие) обрисован в работах [13]. При этом все месторождения золота указанные авторы отнесли к орогенному типу. Вероятно, не все объекты следует рас-

смагивать как чисто орогенными, так как многие из них формировались в период активного функционирования плюмов, порождавших рудогенерирующие магматиты,

несущие изотопные метки и геохимические признаки верхней мантии, а гранитоиды – нередко с анорогенными характеристиками.

Таблица 1

Характерные признаки некоторых восстановленных интрузивно-связанных золоторудных систем с использованием данных по [13]

Характерные признаки	Мурунтау (Узбекистан)	Олимпиада (Енисейский край)	Бакырчик (Казахстан)	Дублин Галч (Юкон)
Геодинамическая обстановка магмо- и рудогенерации	Плюмтек тоника	Плюмтектоника	Комбинация субдуцирующего слэба и плюмтектоники	Постколлизийная
Петрогенетический тип рудогенерирующих гранитоидов	I-SCR (I- тип сильно-контаминированный и редуцированный) +SH (шошонитовые гранитоиды)	I-SCR (I- тип сильно-контаминированный и редуцированный)	AD – тип гранитоидов (адакитовых)	I-SCR (I- тип сильно-контаминированный и редуцированный)
Петрогеохимические особенности рудогенерирующих гранитоидов	Метаалюминиевые, сильно- редуцированные	Метаалюминиевые, сильно- редуцированные	Мета-высокоалюминиевые, сильно редуцированные	Метаалюминиевые, сильно- умеренно редуцированные
Соотношения изотопов стронция и эпсилон неодима	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (0,70618 - 0,70786)$ ; $\epsilon\text{Nd} - (+1,5) - (+6,3)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (0,70683 - 0,70816)$ ; $\epsilon\text{Nd} - (+1,3) - (+7,3)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (0,70538 - 0,70681)$ ; $\epsilon\text{Nd} - (+3,8) - (+6,7)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - >0,71$ ; $\epsilon\text{Nd} - (-7) - (-15)$
Параметры флюидного режима рудогенерирующего магматизма	Высокие фугитивности $\text{CO}_2$ , HCl, парциальные давления $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ , HCl	Высокие фугитивности $\text{CO}_2$ , HCl, парциальные давления $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ , HCl	Высокие фугитивности $\text{CO}_2$ , HCl, HF и парциальные давления $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$	Высокие фугитивности парциальные давления $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$
Уровни становления рудогенерирующих массивов и мощности роговиков	10-15 км; Поле роговиков более 5 км	8-10 км; Поле роговиков до 2 км	8-10 км; поле роговиков до 2 км	5-9 км; поле роговиков до 2 км
Особенности ранних ассоциаций рудных тел	Восстановленные существенно пирит-пирротиновые агрегаты с арсенопиритом	Восстановленные существенно пирит-пирротиновые агрегаты с арсенопиритом	Восстановленные существенно пирит-пирротиновые агрегаты с арсенопиритом	Восстановленные существенно пирит-пирротиновые агрегаты
Состав дистальных поздних фаз оруденения	Ag- обогащённые Pb-Zn кварцевые жилы	Ag- обогащённые Pb-Zn кварцевые жилы	Ag- обогащённые Au-Pb-Zn кварцевые жилы	Ag- обогащённые Pb-Zn кварцевые жилы
Геохимические особенности руд	Повышенные концентрации W, Bi, Te, As, Pt, Pd	Повышенные концентрации W, Bi, Te, As, Hg, Pt, Pd	Повышенные концентрации W, Bi, Te, As, Pt, Os, Ir, Pd	Повышенные концентрации W, Bi, Te, As
Особенности состава газовой-жидких включений в рудном кварце	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ , HCl.	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ , HCl.	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ , HCl.	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ .
Вариации $\delta^{34}\text{S}$	(+3,5) до (+5,6) ‰	(+6,1) до (+8,2) ‰	(-13,74) – (+11,59)	до (-3) ‰

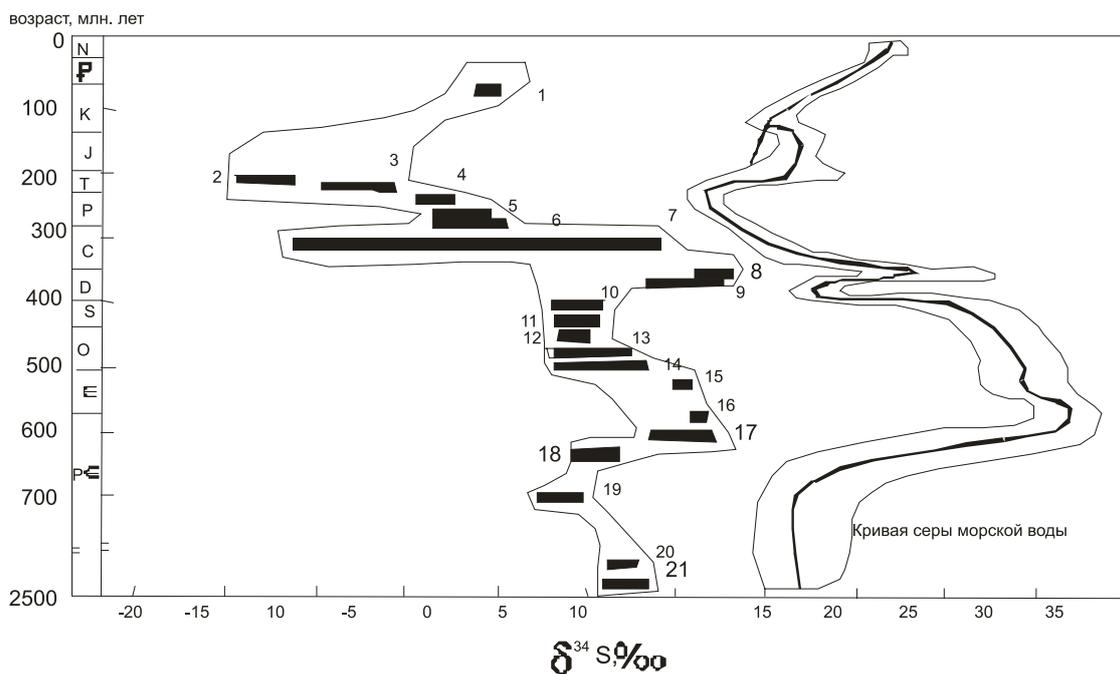
Окончание табл. 1

Характерные признаки	Форт Нокс (Аляска)	Лог № 26 (Горный Алтай)	Саралинское (Кузнецкий Алатая)
Геодинамическая обстановка магмо- и рудогенерации	Постколлизийная	Плюмтектоника	Коллизийная
Петрогенетический тип рудогенерирующих гранитоидов	I-SCR (I- тип сильно-контamинированный и редуцированный)	I-SCR (I- тип сильно-контamинированный и редуцированный + SH (шошонитовые гранитоиды)	ISCR+SH
Петрогеохимические особенности рудогенерирующих гранитоидов	Метаалюминиевые, сильно- умеренно редуцированные	Метаалюминиевые, сильно- редуцированные	Метаалюминиевые, сильно редуцированные
Соотношения изотопов стронция и эpsilon неодима	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} > 0,71$ ; $\epsilon\text{Nd} - (-7) - (-15)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (0,70550 - 0,70812)$ ; $\epsilon\text{Nd} - (+1,2) - (+5,1)$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} - (0,70427 - 0,70561)$
Параметры флюидного режима рудогенерирующего магматизма	Высокие фугитивности парциальные давления $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$	Высокие фугитивности $\text{CO}_2$ , $\text{HCl}$ , парциальные давления $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{CO}_2$ , $\text{HCl}$	Высокие фугитивности, парциальные давления $\text{CO}_2$ , $\text{H}_2\text{O}$ , $\text{HCl}$
Уровни становления рудогенерирующих массивов и мощности роговиков	5-9 км; поле роговиков до 2 км	5-9 км; поле роговиков до 1,5 км	4-6 км; поле роговиков до 1,5 км
Особенности ранних ассоциаций рудных тел	Восстановленные существенно пирит-пирротиновые агрегаты	Восстановленные дископидовые скарны (без граната)	Восстановленные существенно пирит-пирротиновые агрегаты
Состав дистальных поздних фаз оруденения	Ag- обогащённые Pb-Zn кварцевые жилы	Ag- обогащённые Pb-Zn кварцевые жилы	Ag- обогащённые Pb-Zn кварцевые жилы
Геохимические особенности руд	Повышенные концентрации W, Bi, Te, As	Повышенные концентрации W, Bi, Te, As, Pt, Pd	Повышенные концентрации W, Mo, Bi, Te, As, Pt, Pd
Особенности состава газовой-жидких включений в рудном кварце	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ .	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ , $\text{HCl}$ .	Повышенные концентрации $\text{CO}_2$ , $\text{CH}_4$ , $\text{N}_2$ , C, $\text{H}_2$ , $\text{HCl}$ .
Вариации $\delta^{34}\text{S}$	до (-3) ‰	(+10,76) до (+13,5) ‰	(+2,0) до (+9,1) ‰

Примечание. Петрогенетические типы гранитоидов: I-SCR – I- тип сильно контamинированный и редуцированный; SH – шошонитовые гранитоиды; AD – адакитовые гранитоиды.

Оптимальное сочетание параметров флюидного режима анализируемых магматитов определяет поле их кристаллизации вблизи никель-бунзенитовой буферной смеси. Высоко восстановленное состояние расплавов создаёт условия для кристаллизации таких

аксессуаров, как ильменит и пирит. Известно, что в сильно восстановленных магмах сера присутствует в виде  $\text{HS}^-$ , которая более растворима в силикатных расплавах и способствует образованию сульфидных глобулей, селекционирующих золото из расплава.



*Вариации составов изотопов серы в золоторудных месторождениях, залегающих в осадочных вмещающих породах (составлена с учётом данных [12]:*

*Чугач Терранс; 2 – Спениш Маунтейн; 3 – Джунеу; 4 – Наталка; 5 – Макраес;  
6 – Нежданинское; 7 – Бакырчик; 8 – Фанинг; 9 – Лог № 26; 10 – Чармитан; 11 – Мурунтау;  
12 – Чойское; 13 – Бендиго; 14 – Саралинское; 15 – Бивер Дам; 16 – Сунгай; 17 – Сухой Лог;  
18 – Кумтор; 19 – Телфер; 20 – Олимпиада; 21 – Хоумстейк*

Параметры флюидного режима конкретных объектов весьма разнообразны, но характерной чертой всех является высокая восстановленность магматогенных флюидов, выявляемая по коэффициенту восстановленности [2, 6]. Примером может служить месторождение Бакырчик в Казахстане. Весьма своеобразной является восстановленная золоторудная система Бакырчикского месторождения. Ранее нами было показано, что плагиограниты Бакырчикской МРМС относятся адакитовому (AD) типу [7]. Анализ приведенных данных показывает, что температурный режим формирования гранитоидов был высок и варьировал от 805 до 910 °С. Все без исключения проанализированные биотиты характеризуются аномальными составами и параметрами флюидного режима, характерного для золотогенерирующих гранитоидов [7, 8]. В составе биотитов Меридиональной дайки месторождения Бакырчик наблюдается значительное увеличение всех летучих компонентов (F, Cl, H<sub>2</sub>O, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> и других), что отразилось на основных параметрах

флюидного режима магматитов. При этом, обращает на себя внимание резкое увеличение значений таких параметров, как парциальные давления углекислоты и воды, а также фугитивностей HCl и HF (табл. 2) в Меридиональной дайке месторождения Бакырчик. На фоне более высоких значений коэффициента восстановленности флюидов (κ) для Бакырчикских плагиогранитов характерны более высокие содержания плавиковой кислоты во флюидах и низкие значения потенциала ионизации биотитов, указывающего на снижение кислотности среды минералообразования при формировании более поздних даек, с которыми парагенетически и пространственно связывается оруденение золота. Такая картина увеличения роли летучих компонентов в дайковых образованиях интерпретируется открытостью системы (глубинного очага) по фтору и подтоком более глубоких мантийных высоко восстановленных флюидов на момент отделения более поздних дайковых дериватов из глубинного очага [15].

Таблица 2

Параметры флюидного режима адakitовых гранитоидов Калбы

Температуры кристаллизации и параметры флюидного режима	1	2	3	4	5	6	7	8
T°С	810	805	830	820	870	860	910	905
lg fO <sub>2</sub>	-14,9	-4,8	-15,1	-14,87	-14,65	-9,7	-13,2	-13,1
fH <sub>2</sub> O	1170	1230	1360	1270	1350	1400	1570	1550
pH <sub>2</sub> O	1550	1580	1430	1310	1420	1440	1620	1680
pCO <sub>2</sub>	1490	1510	1570	1460	1470	1490	1830	1900
fHF	0,07	0,09	0,08	0,08	0,09	0,10	0,33	0,31
fHCl	34,1	34,3	39,7	37,7	37,8	36,6	45,9	46,2
M <sub>HF</sub>	0,124	0,11	0,137	0,08	0,07	0,06	0,43	0,42
k	0,67	0,23	0,67	0,69	0,68	0,41	0,77	0,78
y	182,3	183,1	181,6	182,2	183,1	183,3	180,3	180,1

Примечание. Плагииграниты: 1 – Борисовского плутона; 2 – Куношского массива; 3, 4 – Жиландинского массива; 5, 6 – Точкинского массива; плагиигранит-порфиры: 7, 8 – Меридиональной дайки месторождения Бакырчик. T°С – температура кристаллизации пород; f O<sub>2</sub>, f H<sub>2</sub>O – фугитивности кислорода и воды, соответственно, в 10<sup>2</sup> кПа; p H<sub>2</sub>O, p CO<sub>2</sub> – парциальные давления воды и углекислоты, соответственно, в 10<sup>2</sup> кПа; K вос. – коэффициент восстановленности флюидов по Ф.А. Летникову; y – потенциал ионизации биотитов по В. А. Жарикову; M<sub>HF</sub> – концентрации плавиковой кислоты во флюидах в моль/дм<sup>3</sup>.

Главной геохимической отличительной особенностью восстановленных золото-рудных систем от окисленных интрузивно-связанных является ассоциация золота с вольфрамом и отсутствие аномалий меди. Вольфрам в скарновых месторождениях (Рэй Галч вольфрамовый скарн на Дублин Галч, Чойское скарновое золото-теллуридное месторождение Горного Алтая) пространственно обособлен от золота. Как правило, золото на таких объектах накладывается в составе сложных прожилков на вольфрамовые скарны.

На месторождении Форт Нокс золото сильно коррелируется с висмутом и теллуrom. Слабее наблюдается корреляция золота с W, Mo, Sb. Золото не коррелируется с мышьяком.

Вертикальная геохимическая зональность на месторождениях жильного типа сводится к увеличению роли вольфрама и молибдена с глубиной. На месторождении Форт Нокс с глубиной заметно уменьшаются концентрации золота и увеличиваются – W и Mo.

Большинство Au-W-Bi-Te жильных месторождений содержит ранние высокотемпературные (300-380°С), CO<sub>2</sub> – обогащённые (5-15%), низко солёные (2-6 вес. % NaCl в эквиваленте) газовой-жидкие включения в кварце с восстановленными форма-

ми: CH<sub>4</sub> и N<sub>2</sub>. В последующих ассоциациях флюиды становились более низкотемпературными (250-280°С, иногда до 160°С). Выделяются не смешивающиеся газовой-жидкие включения в кварцах: а- низко солёные (0,2 вес. % NaCl в эквиваленте) и б- высоко солёные (6-15 вес. % NaCl в эквиваленте) существенно водные флюиды со значительно меньшими концентрациями CO<sub>2</sub>, которые формировали As-, Sb-, и Ag-Pb-Zn жилы.

В газовой-жидких включениях рудных кварцев золото-черносланцевых восстановленных систем в повышенных количествах отмечены CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, C, H<sub>2</sub>, HCl (табл. 1).

Стабильные изотопы кислорода и серы в жильных Au-W-Bi-Te месторождениях также своеобразны. Значения δ<sup>18</sup>O кварца ранжируются от 14 до 16‰. Эти значения слабо утяжелены относительно вмещающих гранитов (11-13‰) и близки к значениям вмещающих осадочных пород (13-16‰).

Соотношения изотопов серы для жильных Au-W-Bi-Te месторождений варьируют от 0 до – 3‰, в скарновых системах – от 2 до – 7‰, от – 0,5 до +4,2‰ в арсенопиритах золото-черносланцевых месторождений (табл. 1) и от – 9 до – 11‰ для Ag-Pb-Zn для жил дистальных ореолов зональных Au-W-Bi-Te жильных месторождений. Значения δ<sup>32</sup>S в большинстве случаев близки к меткам неконтаминированных мантийных магм.

**Интерпретация результатов.** Фактические данные по рассмотренным золоторудным системам показывают, что резко восстановительная обстановка генерации рудогенерирующих магматитов на начальных этапах становления этих систем сохраняется и в последующих скарновом и гидротермальном процессах. Магмогенерация изученных систем имеет весьма глубинный источник и связана с активизацией и возбуждением мантии, импактным выбросом мощных магмо-флюидных струй резко восстановительного характера из астеносферы и нередко – функционированием плюмов [11]. Рудогенерирующий магматизм относится не только к орогенному типу, как это считают канадские исследователи [13], но в значительной степени и к посторогенному (постоллюзионному) и анорогенному этапам [1, 7, 8]. Такой сложный сценарий генерации формирования редуцированных интрузивно-связанных золоторудных систем обуславливает и комплексный характер руд. Редуцированная обстановка магмогенных флюидов обусловлена, вероятно, двумя факторами: сильно восстановленным режимом глубинных флюидов и контаминацией углеродистого корового материала на месторождениях золото-черносланцевого типа.

### Выводы

На основании рассмотренных данных можно сформулировать следующие выводы.

Рудогенерирующие магматиты восстановленных интрузивно связанных золоторудных систем следует отнести к трём петрогенетическим типам: 1 – типу сильно-контаминированному и редуцированному, 2 – адакитовому (AD) и 3 – шошонитовому (SH), а также к комбинации сильно-контаминированных и редуцированных I-типов с шошонитовыми.

Природные восстановленные системы подтверждают экспериментальные данные о предпочтительной редуцированной обстановке для экстракции золота из фельзических расплавов, их переносе хлоридными и HS<sup>-</sup> комплексами в составе магмогенных флюидов к местам рудокализации.

Восстановительная среда предрудных этапов сохраняется для скарнового этапа, где формируются без гранатовые диопсидовые скарны с плагиоклазом.

На гидротермальном этапе восстановительная обстановка подтверждается присутствием таких восстановленных форм, как CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, C, H<sub>2</sub>, HCl и других.

Восстановленные МРМС относятся к наиболее крупным золоторудным объектам мирового класса по запасам металла.

Крупные и гигантские восстановленные МРМС характеризуются комплексностью руд, где помимо золота, присутствуют W, Bi, Te, Pt, Pd.

### Список литературы

1. Гусев А.И. Металлогения золота Горного Алтая и южной части Горной Шории. – Томск, Изд-во STT, 2003. – 308 с.
2. Гусев А.И., Гусев Н.И. Магмо-флюидодинамическая концепция эндогенного рудообразования на примере Горного Алтая и других регионов // Региональная геология и металлогения, 2005. – № 23. – С. 119-129.
3. Гусев А.И. Минерагения и полезные ископаемые Республики Алтай. – Бийск: Изд-во АГАО, 2010. – 385 с.
4. Гусев А.И. Минерагения и полезные ископаемые Алтайского края. – Бийск: Изд-во ГОУВПО АГАО, 2011. – 365 с.
5. Гусев А.И., Гусев А.А. Шошонитовые гранитоиды: петрология, геохимия, флюидный режим, рудоносность. – Москва: Изд-во РАЕ, 2011. – 125 с.
6. Гусев А.И., Гусев Н.И. Петролого-геохимические критерии и флюидный режим гигантских магмо-рудно-метасоматических золоторудных систем // Современные наукоемкие технологии, 2011. – № 4. – С. 12-16.
7. Гусев А.И. Металлогения золота: на примере Горного Алтая и Горной Шории. – Gamburg: Palmarium Academic Publishing, 2012. – 370 с.
8. Гусев А.И., Гусев Н.И., Красова А.С. Восстановленная интрузивно-связанная Чойская магмо-рудно-метасоматическая W-Au-Te система Горного Алтая // Современные наукоемкие технологии, 2012. – № 3. – С. 23-27.
9. Гусев А.И., Гусев Н.И., Табакаева Е.М и др. Петрология и рудоносность магмо-рудно-метасоматических систем Солонешенского рудного района Алтая. – Бийск, АГАО, 2013. – 205 с.
10. Гусев А.И. Поведение и фракционирование золота в расплавах // Успехи современного естествознания, 2013. – № 1. – С. 68-72.
11. Летников Ф.Л. Флюидные фазы континентальной литосферы и проблемы рудообразования // Вестник ОГТГН РАН, 1999. – Т. 1. – № 4(10). – С. 5-20.
12. Chang Z. Sulfur isotopes in sediment-hosted orogenic gold deposits: Evidence for an early timing and a seawater sulfur source / Z. Chang, R.R. Large, V. Maslennikov // Geology. – 2008. – V. 36. – № 12. – Pp. 971-974.
13. Hart C.J.R. Reduced Intrusion-Related Gold Systems // Econ.Geol., 2006. – V. 101. – № 7. – Pp. 1415-1427.