

УДК 55(1/9):550.4: 553.3/4

РОЛЬ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В ФОРМИРОВАНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ ЭНДОГЕННОГО ОРУДЕНЕНИЯ

Гусев А.И.

*Алтайская государственная академия образования им. В.М. Шукшина,
Бииск, e-mail: anzerg@mail.ru*

Показана важнейшая роль летучих компонентов в формировании различных типов эндогенного оруденения: медно-молибден-порфировых, золото-черносланцевых, жильных золото-сульфидно-кварцевых, вольфрамовых штокверковых, вольфрамовых скарновых и других редкометалльных систем. Установлены высокие парциальные давления летучих компонентов во флюидах и признаки абиссальной фации глубинности для гигантских магмо-рудно-метасоматических систем. Показана важная роль мантийно-корового взаимодействия при формировании рудогенерирующего магматизма, с которым связано оруденение.

Ключевые слова: летучие компоненты, флюиды, параметры флюидного режима, парциальное давление, фугитивность, хлор, фтор, углекислота, вода, золото, медь, молибден, вольфрам, бериллий, литий

ROLE OF VOLATILE COMPONENTS IN FORMING OF DIFFERENT TYPES ENDOGENETIC OF ORE MINERALIZATION

Gusev A.I.

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

The important role of volatile components in forming of different type of endogenetic ore mineralization showed: copper-molybdenum-porphyrates, gold-black-shales, lodes gold-sulfide-quartz, tungsten stockwork, tungsten skarns and other rare metals systems. High partial pressure of volatile components in fluids and signs of abyssal facies of deep for giant magma-ore-metasomatic systems arrange. The important role of mantle-crust in forming ore generating magmatism with it is related ore mineralization.

Keywords: volatile components, fluids, parameters of fluid regime, partial pressure, fugacity, Cl, F, CO₂, H₂O, Au, Cu, Mo, W, Be, Li

Многие летучие компоненты играют важнейшую роль в становлении магм различной кислотности. Такие летучие компоненты, как F, Cl, P, B, H₂O оказывают значительное влияние на эволюции гранитных магм, гранитных пегматитов, температур солидуса и ликвидуса расплавов, вязкости силикатных расплавов, кристаллизационной последовательности образования минералов, а также на поведение рассеянных, рудных и редких элементов и их разделении между флюидом и расплавом. Актуальность проведенных исследований не вызывает сомнений, так как летучие компоненты магм различных регионов Мира обеспечивают формирование многих типов эндогенного оруденения [1, 2, 3, 4, 5]. **Цель исследования** – обобщить авторские и опубликованные данные о роли летучих компонентов в генерации магм и связанного оруденения.

Результаты исследований

Значительная роль летучих компонентов и флюидного режима отмечена для порфирового оруденения разного состава: медно-порфирового, молибден-порфирового, медно-молибден-порфирового, медно-золото-порфирового [6]. Параметры некоторых летучих компонентов и термодинамические условия флюидов для порфировых магмо-рудно-метасоматических систем (МРМС) приведены в табл. 1.

Порфировые системы характеризуются сложной эволюцией изменения параметров температур и давлений, кислотности и щёлочности среды, окисленности и восстановленности, флюидного режима, оказывающих влияние на их продуктивность. Увеличение парциальных давлений и летучестей углекислоты, повышение восстановленности флюидов заключительных фаз функционирования порфировых систем, резкое увеличение концентраций HF во флюидах можно связывать с открытостью систем по фтору, углекислоте и другим летучим компонентам, которые приносились в глубинные магматические очаги трансмагматическими растворами из мантии с участием плюмтектоники. Следовательно, для формирования крупных порфировых магмо-рудно-метасоматических систем (МРМС) необходимо несколько условий: 1 – резкая нестабильность литосферы и астеносферы; 2 – мощный импульс магмо-флюидодинамических систем астеносферы и более глубоких сфер с участием плюмтектоники.

Более крупным по запасам системам свойственны открытые условия по фтору, углекислоте, воде, на заключительных стадиях развития которых осуществлялся привнос летучих компонентов трансмагматическими флюидами всех основных ингредиентов и заимствование вадозной воды при контаминации родоначальной мантийной магмой

корового материала. Золото-обогащённым порфирировым системам свойственны повышенные содержания и фугитивности со-

ляной кислоты относительно других флюидных компонентов, таких как плавиковая кислота, борные соединения и другие.

Таблица 1

Параметры флюидного режима некоторых порфирировых систем (фугитивности и парциальные давления даны в килобарах)

МРМС, местоположение	T	f O ₂	f HF	f H ₂ O	p H ₂ O	p CO ₂	M _{HF}	K _{вос}	y
<i>Анорогенные</i>									
Сора, Кузнецкий Алатау	700	-7,1	-0,2	1,3	1,5	1,5	0,0153	0,11	190,5
	750	-5,0	-2,9	1,1	1,3	0,7	0,0878	0,18	191,4
Хендерсон, Колорадо, США	850	-2,5	-0,2	3,2	1,1	0,6	0,0152	0,12	185,6
	550	-3,9	-0,7	3,8	1,4	0,9	0,0703	0,10	184,4
Клаймакс, Колорадо, США	860	-2,7	-0,3	3,1	1,2	0,8	0,0134	0,13	186,1
	610	-3,1	-0,6	3,9	1,7	1,2	0,820	0,11	183,2
Каджаран, Малый Кавказ	930	-7,1	-2,68	1,12	1,1	1,8	0,0297	0,41	189,9
	870	-8,4	-2,98	1,54	1,6	2,3	0,0355	0,53	191,8
<i>Активных континентальных окраин</i>									
Санта-Рита Нью-Мексико, США	745	-13,8	-1,3	1,0	1,2	0,8	0,0037	0,13	189,6
	780	-12,6	-1,5	0,9	1,0	0,7	0,0702	0,12	188,7
	650	-13,6	-0,8	1,2	1,1	1,3	0,0930	0,18	190,8
Бингхем, Провинция Бассейнов и Хребтов, США	910	-3,6	-2,8	1,1	1,2	1,8	0,0174	0,14	188,8
	860	-5,4	-3,2	1,6	1,9	2,3	0,0906	0,34	192,6
Жирекен, Восточное Забайкалье	860	-6,8	-3,0	0,7	0,8	0,9	0,0088	0,64	186,2
	880	-8,0	-3,1	0,8	0,91	1,1	0,0184	0,68	188,1
Чукикамата, Чили	880	-5,5	-2,6	1,3	1,1	1,0	0,0075	0,19	187,2
	720	-6,3	-3,1	1,7	1,9	1,8	0,0970	0,33	190,7
Кульбич, Горный Алтай	590	-10,5	-3,8	0,4	2,4	0,6	0,0386	0,08	196,8
<i>Орогенные</i>									
Аксуг, Тува	770	-6,8	-2,6	0,9	0,95	1,05	0,0493	0,21	187,3
	870	-7,5	-1,8	0,8	0,75	0,8	0,0065	0,18	185,4
Эль-Сальвадор, Чили	890	-8,6	-0,5	2,3	1,8	1,7	0,0475	0,22	187,4
	780	-9,7	-0,1	2,5	2,2	2,5	0,0956	0,33	191,2
Эрдэнуин-Обо, Монголия	810	-5,5	-0,2	2,7	1,9	1,6	0,0112	0,21	186,5
	740	-7,3	-0,1	2,5	2,1	2,2	0,0052	0,30	190,3
<i>Островодужные</i>									
Бошекуль, Казахстан	820	-7,7	-3,04	0,76	0,92	1,02	0,0171	0,37	188,4
	770	-8,9	-2,1	1,2	1,7	2,1	0,0450	0,43	190,6
Салаватская, Урал	910	-8,5	-3,5	1,2	1,1	1,3	0,0205	0,54	186,3
	850	-9,5	-2,1	1,5	1,6	1,9	0,0340	0,61	188,2

Примечание: T, °C – температура кристаллизации пород; f O₂, f H₂O – фугитивности кислорода и воды, соответственно, в 10² кПа; p H₂O, p CO₂ – парциальные давления воды и углекислоты, соответственно, в 10² кПа; K_{вос} – коэффициент восстановленности флюидов по Ф.А. Летникову; y – потенциал ионизации биотита по В.А. Жарикову.

Большую роль в составе и особенностях поведения летучих компонентов в расплавах имеют процессы контаминации мантийными магмами корового материала. Особенно это заметно для рудогенерирующего магматизма, внедряющегося в углерод-содержащие толщи. Такие магмы относятся к сильно-восстановленным и контаминированным I-типам. Это особенно важно для золоторудных МРМС. Наибольшая степень контаминации корового материала магмами мантийной природы отмечается для золото-черносланцевого оруденения, где происходит максимальная контаминация корового

материала, представленного черносланцевыми образованиями с повышенным содержанием углерода. Такие магмы переходят из окисленных в разряд сильно восстановленных и контаминированных. Супергигантские и гигантские месторождения мирового класса такие, как Мурунтау, Бакырчик, Олимпиада, Сухой Лог и другие характеризуются и повышенными значениями восстановленности флюидов за счёт обогащения углеродом вмещающих толщ [6]. На этапе становления даек пёстрого состава от долеритов до гранит-порфириров отмечается та же закономерность увеличения концентраций

золота и сопутствующих металлов в конечных кислых дифференциатах. Однако для гранитоидных дайковых образований характерны более высокие концентрации, пар-

циальные давления и фугитивности фтора, углекислоты, воды (табл. 2), указывающие на открытость систем по фтору и углекислоте и участие трансмагматических флюидов.

Таблица 2

Параметры флюидного режима I-типов гранитоидов Алтае-Саянской складчатой области (фугитивности и парциальные давления в барах)

Рудно-магматические системы, породы	n	T, °C	lg fO ₂	f H ₂ O	pH ₂ O	pCO ₂	lgfO ₂ /fH ₂ O	lgfHF/fHCl	k	y
<i>Кузнецкий Алатау</i>										
Берикульская										
Гранодиориты	7	780	-14,7	1,7	2,3	1,9	-17,7	-3,5	0,66	193,4
Федоровская										
Гранодиориты	6	770	-14,3	1,1	1,4	1,6	-17,3	-4,0	0,68	193,2
Натальевская										
Гранодиориты	8	780	-12,4	0,96	1,2	1,3	-15,5	-3,6	0,37	187,4
Центральнинская										
Гранодиориты	7	740	-13,5	1,06	1,28	1,22	-16,5	-3,2	0,62	191,6
Диориты кварц.(дайки)	3	750	-13,6	1,4	1,55	1,83	-16,6	-3,5	0,72	190,3
<i>Салаир</i>										
Кварцитовая Сопка										
Гранодиориты	5	850	-5,0	0,42	0,51	0,49	-8,2	-3,9	0,12	190,9
<i>Горная Шория</i>										
Майская										
Тоналиты	7	730	-13,5	2,1	3,2	1,9	-15,1	-3,0	0,60	191,4
Монцониты (дайки)	6	725	-13,8	2,5	4,0	3,1	-16,8	-2,9	0,78	191,6
<i>Тува</i>										
Тарданская										
Гранодиориты	12	705	-11,2	0,42	0,50	0,50	-14,3	-3,6	0,24	189,3
Монцодиориты (Зубов)	3	760	-8,5	0,30	0,31	0,29	-11,5	-3,4	0,21	187,5
<i>Восточный Саян</i>										
Зун-Холбинская										
Тоналиты	6	800	-10,1	0,76	0,92	1,1	-13,1	-2,9	0,32	193,2
Гранит-аплиты (дайки)	4	720	-15,2	3,45	5,0	2,0	-18,2	-2,3	0,81	199,9
Ольховская										
Гранодиориты	9	700	-16,1	0,38	0,45	0,35	-19,1	-2,7	0,70	191,0
<i>Горный Алтай</i>										
Синюхинская										
Тоналиты	15	840	-4,9	0,9	1,1	1,3	-7,9	-3,8	0,12	190,3
Гранодиориты (дайки)	9	845	-4,8	1,2	1,7	1,8	-7,8	-3,9	0,14	190,6
Гранодиориты (Арганак)	6	830	-4,9	0,5	0,7	0,5	-7,9	-3,9	0,10	188,6
Ульменская										
Монцониты кварцевые	8	785	-13,5	3,1	4,5	2,1	-17,5	-3,3	0,70	189,3
Сиениты	5	790	-14,1	3,3	4,8	3,5	-17,1	-3,5	0,72	189,2
Югалинская										
Монцониты (дайки)	5	760	-4,1	1,7	2,7	1,9	-7,1	-2,9	0,09	189,8
Сиениты (дайки)	4	710	-10,5	2,1	3,6	4,4	-13,5	-2,9	0,27	189,1
Чойская										
Гранодиориты	11	645	-15,0	0,47	0,56	0,55	-18,0	-2,7	0,55	189,0
Керсантиты (дайки)	9	670	-12,5	0,9	1,4	3,6	-15,5	-2,9	0,58	188,7
Караминская										
Лейкограниты	8	610	-12,4	0,5	0,61	0,87	-17,4	-2,4	0,18	191,8
Гранодиориты (дайки)	6	680	-13,0	0,7	0,85	1,05	-17,0	-2,5	0,57	190,4
Сиениты (дайки)	3	730	-12,1	2,2	2,5	3,7	-15,1	-2,7	0,40	189,8

Примечания: n – количество проб биотита; остальные условные см. табл. 1.

Им свойственны и более высокие значения восстановленности флюидов, что указывает на подток более редуцированных мантийных ингредиентов в промежуточные магматические очаги. Становление дайковых серий происходило или из остаточных расплавов глубинных магматических очагов, или в результате поступления новых порций базальтоидных расплавов и флюидов мантийной природы в первоначальные глубинные очаги. В пользу последнего предположения говорят дайки долеритов и лампрофиров Синюхинской и других МРМС, являющиеся поздними поступлениями из более глубоких мантийных источников. Происходил подток новых порций базальтоидной магмы, последующей контаминации корового материала на путях

движения расплавов и значительного его обводнения. Только высокие концентрации водной фазы и обилие других летучих компонентов (хлора, фтора, бора, уголекислоты) могли обеспечивать селекционирование металлов и золота из расплавов и их транспортировку в зоны рудоотложения, а это свойственно более поздним выплавкам кислых по составу магм.

Показательны данные по летучим компонентам во флюидах для гигантских месторождений золота. Параметры флюидного режима для рудогенерирующих гранитоидов типичных представителей золото-черносланцевого оруденения и жильно золото-сульфидно-кварцевого, приуроченного к зеленокаменному поясу приведены в табл. 3.

Таблица 3
Некоторые параметры флюидного режима гигантских золоторудных МРМС

Параметры флюидного режима	1	2	3	4	5
T, °C	910	920	900	890	900
fO ₂	-13,3	-14,8	-12,4	-13,6	-14,3
fHF	2355	2456	3225	3116	3872
pH ₂ O	2450	2345	2820	2610	3550
pCO ₂	2560	3100	2950	2390	3728
lgfHF/lgfHCl	-2,1	-1,7	-2,25	-2,14	-1,55
K _{вос}	0,65	0,67	0,71	0,77	0,85
M _{HF}	0,012	0,076	0,023	0,084	0,112

Примечание. T, °C – температура кристаллизации; lg fO₂ – логарифм фугитивности кислорода; fHF, fH₂O – фугитивности плавиковой кислоты и воды; pH₂O, pCO₂ – парциальное давление воды и уголекислоты; K_{вос} – коэффициент восстановленности флюидов; M_{HF} – концентрации плавиковой кислоты во флюидах в моль/дм³; МРМС Киркленд Лейк 1 – Интрузия; 2 – дайка гранит-порфира; МРМС Мурунтау; 3 – гранодиориты Сардаринского массива; 4 – дайка сиенитов; 5 – дайка гранодиорит-порфиров.

Для обоих типов МРМС реставрируются очень высокие значения общего давления при их кристаллизации, а также флюидов, что свойственно абиссальной фации глубинности становления рудогенерирующих гранитоидов. Характерны более высокие значения восстановленности флюидов и концентрации M_{HF} в постгранитных дайках, указывающие на подток более глубоких трансмагматических флюидов при их формировании.

Давление в очаге системы при формировании лейкогранитов и даек оценено в пределах 6–9 МПа (по соотношениям Al^{VI} к Al^{IV} в биотитах), указывающее на абиссальную фацию магматитов

Редкометалльное оруденение Горного Алтая (вольфрам, молибден, бериллий, литий, тантал, ниобий, олово) связано с редкометалльными гранитоидами щелочного

ряда, плюмазитовыми редкометалльными лейкогранитами и палингенными гранитами известково-щелочного ряда [4, 5]. Для них оценены некоторые параметры флюидного режима (табл. 4).

Редкометалльные гранитоиды щелочного ряда кристаллизовались при температурах 650–850 °C и широком варьировании фугитивностей кислорода, воды и парциальных давлений уголекислоты и воды. К Калгутинской рудно-магматической системе приурочено самое крупное в регионе по запасам молибден-вольфрамовое месторождение.

Плюмазитовые редкометалльные лейкограниты, с которыми связано оруденение лития, тантала, ниобия, формировались при самых низких температурах (530–550 °C) и значениях фугитивностей кислорода и воды. Этим параметрам отвечает максимальная восстановленность

флюидов (табл. 3). Для гранитоидов Алахинского месторождения (литий, тантал, ниобий) в группе плюмазитовых лейкогранитов свойственны максимальные величины фугитивности воды при минимальных значениях температур кристаллизации, фугитивностей кислорода, отношений фугитивностей кислорода и воды, парциальных давлений углекислоты. Палингенные граниты известково-щелочного ряда в отличие

от предыдущей группы кристаллизовались при более широком диапазоне температур (690–800 °С). Для них характерны повышенные значения фугитивности кислорода и логарифма отношений фугитивности кислорода и воды и сравнительно низкие показатели парциального давления углекислоты. С этими гранитоидами связаны небольшие по масштабам месторождения вольфрама, молибдена и бериллия.

Таблица 4

Некоторые параметры флюидного режима редкометалльных гранитоидов Горного Алтая (давление и фугитивность даны в барах)

Массивы, фазы	T, °C	lg fO ₂	f H ₂ O	P H ₂ O	K	Lg fHF/fHCl
Горный Алтай						
<i>Редкометалльные гранитоиды щелочного ряда</i>						
Калгутинский I ф	680	-12,1	231	400	0,47	-2,35
Калгутинский II ф	690	-8,1	417	550	0,24	-0,92
Дайки эльванов	650	-2,0	415	540	0,22	-0,81
Осокинский	805	-4,1	488	820	0,06	-3,11
Кольванский	850	-5,1	330	470	0,08	-2,62
Турочакский	710	-8,0	427	490	0,18	-2,5
Цыганский	730	-8,0	390	480	0,18	-1,6
Бабырганский	840	-5,1	271	450	0,13	-2,61
<i>Плюмазитовые редкометалльные лейкограниты</i>						
Алахинский	530	-18,0	349	580	0,65	1,52
Каракольский	550	-15,1	310	465	0,57	0,51
Джудалю	545	-16,1	267	600	0,51	0,49
Чиндагатуйский	550	-15,8	305	520	0,55	0,50
<i>Палингенные граниты известково-щелочного ряда</i>						
Мяснухинский	675	-8,9	220	450	0,30	-2,78
Тагарский	800	-3,9	235	460	0,21	-1,61
Шибетинский	700	-2,9	420	610	0,12	-0,85
Белокурихинский	690	-2,1	210	360	0,11	-1,28

Примечание: T, °C – температура кристаллизации гранитоидов; lg fO₂ – логарифм фугитивности кислорода; f H₂O – фугитивности воды; P H₂O – парциальное давление воды; Lg fHF/fHCl – логарифм отношений фугитивности плавиковой и соляной кислот; K – коэффициент восстановленности флюидов.

Выводы

Таким образом, роль летучих компонентов в магматогенных флюидах для формирования различных типов оруденения в различных регионах весьма велика. Для гигантских месторождений характерны признаки абиссальной фации глубинности и высокие парциальные давления летучих компонентов. В формировании гигантских месторождений важная роль принадлежит мантийным процессам, связанным с функционированием плюмов и мантийно-коровым взаимодействием.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гусев А.И., Гусев Е.А. Некоторые петрохимические особенности золотоносных гранитоидов Алтае-Саянской складчатой области // Руды и металлы. – 2000. – № 5. – С. 25–32.

2. Гусев А.И. Петрология редкометалльных магматогенно-метасоматических систем Горного Алтая // Известия Томского политехнического университета. – Томск, 2005. – № 4. – Т. 307. – С. 43–47.

3. 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.

4. Гусев А.И. Эпитермальное оруденение благородных металлов Горного Алтая и Горной Шории // Известия Томского политехнического университета. Томск. – 2005. – Т. 308. – № 3. – С. 32–35.

5. Гусев А.И. Петрология и флюидный режим порфирировых систем // Успехи современного естествознания. – 2011. – № 6. – С. 16–19.

6. Гусев А.И., Гусев Н.И. Флюидный режим и петрология шшонитовых гранитоидов супергигантского золоторудного месторождения Мурунтау // Фундамент. исследования. – 2012. – № 6 (часть 1). – С. 13–18.