

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, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, 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, H<sub>2</sub>O 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 <sub>2</sub>	f HF	f H <sub>2</sub> O	p H <sub>2</sub> O	p CO <sub>2</sub>	M <sub>HF</sub>	K <sub>вос</sub>	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 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<sub>вос</sub> – 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	<i>n</i>	T, °C	lg fO <sub>2</sub>	f H <sub>2</sub> O	pH <sub>2</sub> O	pCO <sub>2</sub>	lgfO <sub>2</sub> /fH <sub>2</sub> O	lgfHF/fHCl	<i>k</i>	<i>y</i>
<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, углекислоты) 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 <sub>2</sub>	-13,3	-14,8	-12,4	-13,6	-14,3
fHF	2355	2456	3225	3116	3872
pH <sub>2</sub> O	2450	2345	2820	2610	3550
pCO <sub>2</sub>	2560	3100	2950	2390	3728
lgfHF/lgfHCl	-2,1	-1,7	-2,25	-2,14	-1,55
K <sub>вос</sub>	0,65	0,67	0,71	0,77	0,85
M <sub>HF</sub>	0,012	0,076	0,023	0,084	0,112

Примечание. T, °C – температура кристаллизации; lg fO<sub>2</sub> – логарифм фугитивности кислорода; fHF, fH<sub>2</sub>O – фугитивности плавиковой кислоты и воды; pH<sub>2</sub>O, pCO<sub>2</sub> – парциальное давление воды и углекислоты; K<sub>вос</sub> – коэффициент восстановленности флюидов; M<sub>HF</sub> – концентрации плавиковой кислоты во флюидах в моль/дм<sup>3</sup>; 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<sub>HF</sub> 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<sup>VI</sup> к Al<sup>IV</sup> 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 углекислоты 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 <sub>2</sub>	f H <sub>2</sub> O	P H <sub>2</sub> O	K	Lg fHF/fHCl
<b>Горный Алтай</b>						
<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 fO<sub>2</sub> – логарифм фугитивности кислорода; f H<sub>2</sub>O – фугитивности воды; P H<sub>2</sub>O – 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 порфировых 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.