

Томкинс А.Г., Маврогенес Дж.А. Происхождение рудоносных фельзитовых магм во время анатексиса земной коры

(Tomkins A.G. and Mavrogenes J.A. Generation of metal-rich felsic magmas during crustal anatexis // *Geology* 2003;31;765-768)

ВВЕДЕНИЕ

Рудные месторождения, связанные с фельзитовой магмой, такие как порфировые Cu-Au-(Mo) месторождения и Au-Ag-(Cu) эпitherмальные месторождения являются наиболее важными в производстве металлов. Поскольку они хорошо обнажены и легкодоступны, то около поверхностные процессы, которые контролируют локализацию рудной минерализации, хорошо изучены. Тем не менее, глубинные коровые процессы, контролирующие поглощение (халькофильных) металлов гранитными расплавами остаются неясными.

Многие наблюдали, что в конкретных металлогенических провинциях немногие интрузии продуцировали рудную минерализацию, тогда как многие были нерудными (Baldwin and Pearce, 1982). В особых месторождениях могли быть лишь одна из нескольких интрузий, которая была связана с рудной минерализацией (далее минерализацией) (Ulrich and Heinrich, 2001). Аналогично. Некоторые регионы продуцировали многие металлоносные магмы, тогда как в других регионах магмы были нерудоносными. Эти наблюдения могли быть в значительной степени следствием изменчивости источников магм. Проблема источника – важна по двум причинам: во-первых, она поднимает вопросы геохимических процессов в эволюции земной коры и, во-вторых, она адресует к земным источникам металлов, характеризующимся повышенной металлоносностью должны рассматриваться геолого-разведчиками (Mathur et al., 2000). Предлагались разные варианты для источника металлов в фельзитовых магмах, связанных с рудными месторождениями. Некоторые считали, что металл попадал: (1) из субдуцируемой океанической плиты в островодужных регионах (Hedenquist and Lowenstern, 1994); (2) из осадочных и вулканических породах в земной коре (Krauskopf, 1967; Noble, 1970); или (3) из нижней коры во время анатексиса (Hedenquist and Lowenstern, 1994). Хотя источник, по-видимому, различается в разных регионах (Hedenquist and Lowenstern, 1994), обычный здравый смысл рассматривает металлы в качестве аборигенного вещества в районе генерации магмы (Mathur et al., 2000). Отсутствие доступа к регионам источника магмы недвусмысленно связанного с рудоносными плутонами вынуждает геологов предполагать процессы, что магмы обогащаются металлами.

Tomkins и Mavrogenes (2002) показали, что частичное плавление вмещающих пород на Челенджер месторождение Au совпадает с плавлением Au + Bi + сульфидов во время высокотемпературного метаморфизма. Выделение этих двух расплавов лейкосомы силикатного расплава, содержащего в некоторых случаях проценты силикатно-несмешиваемого Au-сульфидного расплава. Этот эффект был настолько всеобъемлющим, что >95% видимого Au в месторождении находилось в лейкосомах. Если расплавная экстракция была более результативной в этом месте, то весь силикатный расплав (и Au) мог двигаться. Примеры результативности экстракции силикатного расплава тщательно описаны Sawyer (2001). Однако, может ли малопродуктивная экстракция силикатного расплава приводить к какому-либо обогащению? Чтобы ставить такой вопрос, мы сначала рассмотрим физические свойства расплавов сульфидных металлов (полиметаллов) и современное понимание, как расплав фельзитовых силикатов выделяется из мигматитов, прежде изучения обогащения металлами фельзитовых магм.

ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИЛИКАТНЫХ ОТНОСИТЕЛЬНО СУЛЬФИДНО-МЕТАЛЛИЧЕСКИХ РАСПЛАВОВ

Frost et al. (2002) ввели аббревиатуру LMCE (low-melting-point chalcophile elements – халькофильные элементы низкой точки плавления), чтобы сгруппировать элементы, которые образуют низкотемпературные сульфидные расплавы. LMCE выносят металлы и сульфиды с пониженными температурами плавления (рис. 1). Таким образом, металлы и сульфиды с повышенными температурами плавления способны сохранять низкотемпературные полиметаллические расплавы. Самородные металлы. Такие как Au и Ag встречаются в природе в таких низких концентрациях, что они должны полностью раствориться в металлических расплавах. Это проявилось на месторождении Челенджер (Tomkins and Mavrogenes, 2002), где почти всё Au содержалось в глобулах, как раз находились в полиметаллическом расплаве (рис. 2).

Фельзитовые силикатные расплавы вязкие (Scaillet et al., 1998), хотя растворённая вода понижает их вязкость. Однако, даже влажные силикатные расплавы являются значительно более вязкими, чем жидкие металлы и сульфиды, которые имеют вязкость аналогичную воде (Richardson, 1974; Dobson et al., 2000).

Полиметаллические расплавы, которые могут содержать некоторые тяжёлые элементы, значительно тяжелее. Чем силикатные расплавы. Силикатный расплав более плавучий, чем его рститы (Brown, 1994), тогда как полиметаллический расплав, обычно тяжелее.

Силикатные расплавы кристаллизуются в интервале температур от ~1200 °С для базальтов до ~650 °С для гранитов, насыщенных водой (McBimney, 1993). Однако, полиметаллические расплавы имеют более широкий интервал температур кристаллизации, охватывающий температуры ниже -39 °С, точка замерзания ртути (Frost et al., 2002).

Хорошо известно, что как только силикатный расплав насыщается серой, то выделяется не поддающийся смешиванию сульфидный расплав (Naldrett, 1989). Рассматриваемые металлы имеют низкую растворимость в фельзитовых магмах. Au насыщает при ~1 ppm (Frank et al., 2002), и концентрация Cu до 470 ppm в риолитовом расплаве (в экспериментах насыщения флюида, 800-850 °С и 50-100 ГПа) были показаны Williams et al. (1995).

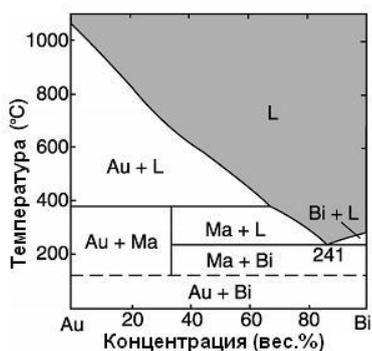


Рис. 1. Au-Bi диаграмма бинарных фаз (after Okamoto and Massalski, 1983). L = жидкость, Ma = малдонит (Au₂Bi).

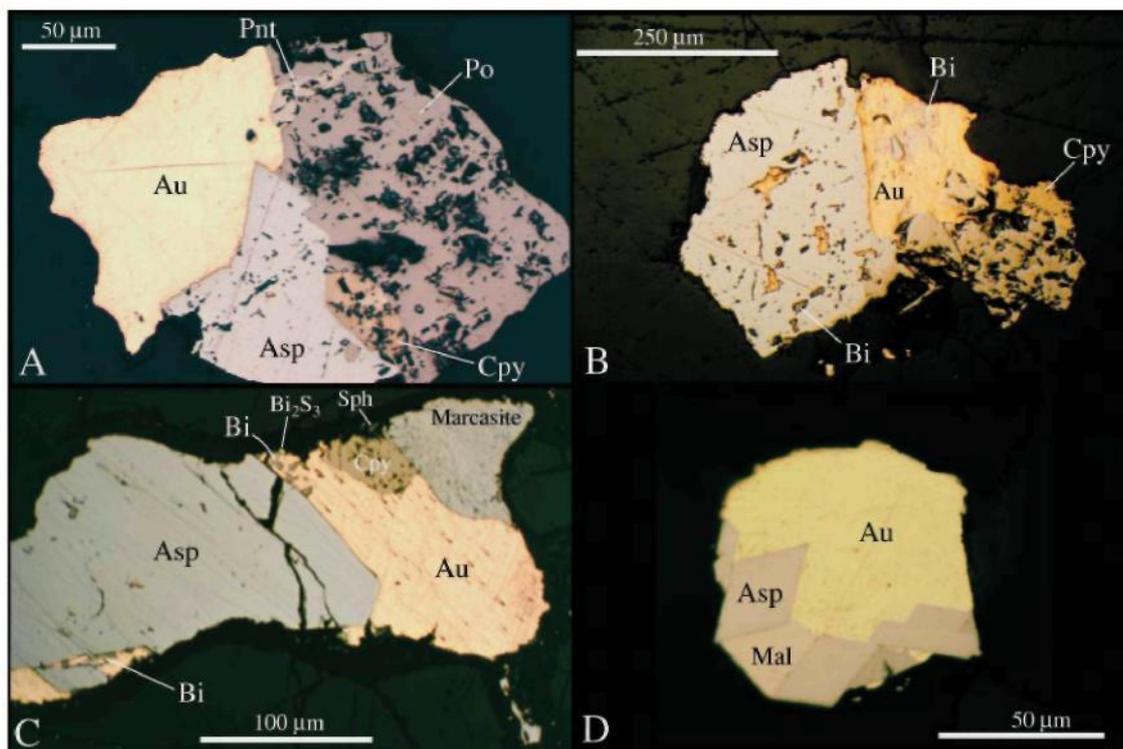


Рис. 2. Примеры из месторождения Au Челенджер зёрен Au-сульфидов, которые когда-то были глобулами полиметаллического расплава, захваченные мигматитовыми лейкосомами (Tomkins and Mavrogenes, 2002). Asp –арсенопирит с твёрдым раствором некоторого количества Ni и Co, Po—пирротин, Cpy—халькопирит, Sph— сфалерит, Pnt— пентландит, Mal— малдонит. Все составы подтверждены сканирующим электронным микроскопом.

Другие металлы показывают похожую низкую растворимость (Candela, 1989; Jugo et al., 1999). Некоторые из этих металлов (в частности Cu) более растворимы в мафических магмах (Ripley et al., 2002). Мы предполагаем, что растворимость металлов в фельзитовом силикатном расплаве может коррелироваться с содержанием H₂O в расплаве (т.н., повышенное содержание H₂O = повышенная растворимость).

ИСТОЧНИКИ МЕТАЛЛОВ В НИЖНЕЙ КОРЕ

Некоторые авторы отмечали, что нижняя кора обеднена металлами (Cameron, 1989). Эти данные наблюдений кажутся обоснованными, поскольку трековые металлы вынесенные флюидами высвобождаются во время наступающего метаморфизма. Однако, многие рудные месторождения выжили гранулитовую фацию метаморфизма (Broken Hill, Mavrogenes et al., 2001; Challenger, Tomkins and Mavrogenes, 2002).

Поскольку гидротермальные рудные месторождения, обычно, образуются из огромным объёмов флюидов, сфокусировано мигрирующих через маленькие объёмы пород, аналогично должны требоваться большие количества флюидов, чтобы переместить металлы во время метаморфизма. Обезвоживание во время наступающего метаморфизма не обеспечивает соответствующее количество воды растворения большого рудного тела. Очевидно, что наилучшими источниками металлов в нижней коре являются ранее существовавшие рудные месторождения, в следствие чего оставшаяся часть земной коры деплетирована.

МЕХАНИЗМЫ ИСТЕЧЕНИЯ ФЕЛЬЗИТОВЫХ РАСПЛАВОВ

Сейчас общепринято. Что мигматиты представляют районы-источники фельзитовых расплавов (Sawyer, 2001). Clemens и Watkins (2001) считали, что большая часть гранитоидных магм - продукт безводного плавления. Обычно, определялось, что плавление нижней коры часто имеет региональное распространение (Sawyer, 2001). Tomkins и Mavrogenes (2002) показали, что одновременно возникшие силикатные и полиметаллические расплавы, обособлялись в лейкосомы месторождения Челенджер во время частичного плавления. Таким образом, процессы, которые контролируют экстракцию силикатного расплава влияют на попадание металлов в истекающую магму.

Brown (1994) предполагал, что физические процессы, контролирующие распределение расплава во время анатексиса, связаны или с плавучестью расплава, или со структурными преобразованиями. Сегрегация, обусловленная плавучестью, является, по существу, компактным процессом, который происходит в отсутствие деформаций, где происходит уплотнение матрицы и вытесняется более лёгкий межзерновой расплав (Petford et al., 2000). Скорость этого процесса изменяется в связи с изменением вязкости расплава и разницы плотностей между твёрдым веществом и расплавом. Однако, при условии почти универсальной сложности структуры мигматитов (Brown, 1994), этот процесс вероятно проявляется редко.

Во время деформации течение расплава гарантируется, поскольку напряжение распределяется на более легко деформируемый расплав (Vigneresse and Tikoff, 1999). Породы реагируют на деформацию изменением формы зёрен, приспособлением границ зёрен к миграции, соответственно позволяя расплаву присутствовать в местах, способствующих движению расплава в сторону понижения гидравлических градиентов (Vigneresse and Tikoff, 1999). Следовательно, районы повышенных напряжений предположительно имеют наивысшую проницаемость для расплавов, поскольку здесь границы зёрен изменяются быстрее. Таким образом, миграция большей части расплава контролируется кинематически. Деформация эффективно выжимает расплав из матрицы в зоны расширения. Это основной способ. В результате которого расплав покидает мигматитовый породы-источники (Vigneresse and Tikoff, 1999).

ЗНАЧЕНИЕ ДЛЯ КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАЛЛОВ ИСТЕЧЕНИЕ МАГМ

Металлы могут экстрагироваться из района мигматитового источника в результате растворения в силикатном расплаве (Frank et al., 2002) и возможно путём транспортировки в виде физически увлекаемого полиметаллического расплава. В редких случаях, где процессы, связанные с уплотнением и всплыванием, ответственны за первичную сегрегацию силикатного расплава из рестита (до того как глобулы сульфидного расплава заключались в капсулу в аккумулируемом силикатном расплаве), вероятно, полиметаллический расплав (будучи очень тяжёлым) мог оставаться в рестите, а металл в истекающей магме находится в растворённом состоянии.

Однако, полиметаллические расплавы, поскольку их вязкость низкая, тем более быстро мобилизовались во время деформации, чем силикатные расплавы. Следовательно, любой процесс сегрегации силикатного расплава, который обусловлен деформацией, несомненно, мобилизует полиметаллический расплав в места растяжений, приводя к накоплению силикатного расплава, содержащего несмешиваемый полиметаллический расплав.

После накопления больших объёмов, миграция вверх силикатного расплава сквозь земную кору может. В основном регулироваться всплыванием. Показано экспериментами по изучению систем сульфидный расплав+мафическая магма (de Bremond d'Ars et al., 2001), что не поддающиеся смешиванию глобулы расплава сульфидных металлов выносятся силикатными расплавами. Однако. Известно, что фельзитовые магмы мигрируют медленнее и более вязкие, чем мафические магмы, и, таким образом, должны рассматриваться отдельно. Закон осаждения Стокса гласит:

$$W = \{[(\rho_s - \rho)g]/18\mu\}d^2, \quad (1)$$

где W - скорость осаждения глобулей сульфидного расплава, ρ_s - плотность глобули сульфидного расплава, ρ - плотность силикатного расплава, g - ускорение силы тяжести, μ - вязкость гранитоидной магмы и d - диаметр глобули сульфидного расплава. Используем принятые значения:

$$W = 1.059 \times 10^{-8} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}. \quad (2)$$

Этот расчёт базируется на вязкости гранитного расплава (10^5 пуаз; из Scaillet et al. 1998), плотности риолитового расплава при 800°C ($2220 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$; из McBirney, 1993), и плотности глобулей сульфидных расплавов - $10,000 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$. Размер глобулей сульфидных расплавов, примерно, равны большинству глобулей, на месторождении Челенджер ($500 \text{ }\mu\text{м}$; Tomkins and Mavrogenes, 2002). Эти факторы консервативны в том, что (1) риолиты менее плотные, чем силикатные расплавы, образовавшиеся во время анатексиса, (2) плотность глобулей сульфидных расплавов со значениями $10 \text{ кг}\cdot\text{м}^{-3}$, по-видимому, тяжелее, чем большинство, возможных, сульфидных расплавов и (3) более крупные глобули осаждаются быстрее. Исходя из этих факторов наиболее решающим является диаметр глобулей, так, например, глобуля с диаметром 5 мм должна падать на два порядка величины быстрее, $\sim 1 \times 10^{-6} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$. При сравнении скоростей в гранитном расплаве 1×10^{-7} до $10^{-8} \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}$ (Watt et al., 1996), мы определили, что скорость осаждения глобулей $< 500 \text{ }\mu\text{м}$ - недостаточная для дифференциации. Таким образом, маленькие глобули заключённого в корпускулу сульфидного расплава, должен физически выноситься скоплениями восходящего силикатного расплава.

МИГРАЦИЯ МАГМЫ К ПОВЕРХНОСТИ

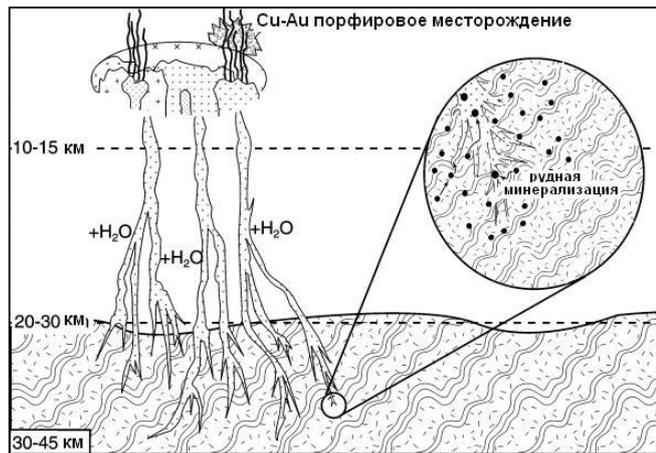


Рис. 3. Концептуальная модель разреза земной коры, показывающая связь между анатексисом рассеянного сульфидного месторождения в нижней коре и формированием фельзитовой магмы, связанной с рудными месторождениями в верхней коре. Стрелки в круговом увеличении показывают миграцию полиметаллического расплава (чёрные точки) с силикатным расплавом, сначала в лейкосомы и в итоге в постепенно увеличивающиеся магматические линзы.

Расплавы в нижней коре (\pm увлекаемый полиметаллический расплав) большого района фундамента, в конечном счёте, сливается с гранитными плутонами (рис. 3). Однако, глобули несмешиваемого полиметаллического расплава лишь в редких случаях наблюдались в гранитах. Действительно, предполагается, что, обычно, металлы растворены в трековых концентрациях в магме. Тем не менее некоторые лейкосомы на месторождении Челенджер содержат до 1%-2% Au (или - 4% полиметаллического расплава). Если большие количества полиметаллического расплава могут постепенно растворяться во вмещающем силикатном расплаве во время миграции магмы к земной поверхности, то, непременно, произойдёт большое разбавление концентрации металлов. Так, например, объём силикатного расплава, содержащий 2% Au в виде полиметаллического расплава, то должно произойти разбавление, благодаря фактору 20,000 для растворения всего Au (на основании растворимости Au в магме 1 ппм). Однако, этот расчёт базируется на экспериментах по растворимости, с включением насыщенности водой и при низком давлении, так что реальный фактор разбавления может отличаться. Всё таки ясно, что требуется значительное разбавление. Поскольку вязкость фельзитового расплава высокая, то маленькие глобули полиметаллического расплава. Вероятно, могут быть относительно неподвижными в нём. Однако, обычно принято, что большая часть миграции фельзитовой магмы происходит по тонким структурно контролируемым коммуникациям в виде даек и батолиты не образуются до тех пор, пока магма не достигнет верхней коры (Petford et al., 2000). Принимая во внимание, что плавление нижней коры, обычно, происходит при 5-10 килобарах (-18-34км глубина), расплавы должны пройти много километров по узким

каналам со значительным притоком недонасыщенных серой силикатных расплавов из других источников прежде чем они будут формировать подруды (Fig. 3). Природа индуцированной деформацией этой миграции, вероятно, гарантирует, что произойдет значительное физическое смешивание, соответственно позволяющее каждому глобулу сульфидного расплава химически взаимодействовать с большим объемом силикатной магмы. Следовательно, во время подъема этот смешанный расплав с увеличением силикатного расплава относительно к полиметаллическому расплаву начинает растворение сульфидов, так как магма становится всё в большей степени ненасыщенная серой. Если дополнительные магмы более мафические.. то повышение растворимости увеличивается. Если H₂O привносится в расплав во время миграции в средней коре, то мы предполагаем, что растворимость металлов будет увеличиваться далее. Несмотря на эти факторы полная растворимость захваченных сульфидных расплавов не всегда может состояться. Прямая связь между включениями сульфидного расплава (сохранившихся в фельзитовых интрузиях) и порфиоровыми месторождениями была интерпретирована Halter et al. (2002).

Поскольку давление понижается во время подъема, то расплав приближается к состоянию насыщения водой. В итоге насыщение водой достигается так как магма размещается в верхней коре и силикатный расплав выделяет рудоносный гидротермальный флюид. Так, например, если гранитный расплав содержащий—3.5 вес.% H₂O, образовался в результате безводного плавления, характерным для месторождения Челенджер, при -850 °C и 7.5 килобарах, следовавшим траекторией изотермальной декомпрессии, то он должен быть насыщенным водой и выделять флюид при - 1 килобаре, или на глубине 3км, типичном уровне земной коры для формирования порфиоровых или эпитеpmальных месторождений. Если H₂O поступала в гранитную магму во время её подъема, то насыщение и выделение гидротермальных флюидов происходит на большей глубине.

РАСПОЗНАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СУЛЬФИДНОГО РАСПЛАВА И СИЛИКАТНОГО РАСПЛАВА В МИГМАТИТАХ

Многие мигматиты содержат некоторое количество силикатного расплава. В этих случаях некоторые сульфидные расплавы также могут сохраняться в лейкосомах. Кроме того, сульфидный расплав может захватываться в виде включений в минералах лейкосом, даже когда расплав почти полностью удален.

Мигматитовые породы, которые свидетельствуют о взаимодействии сульфидных и силикатных расплавов, могут распознаваться по уменьшению в мезозомах и по повышенным содержаниям в лейкосомах тревковых металлов и минералов, которые распределились в сульфидные расплавы (так, например, Au, Ag, Bi, Sb- и Tl-содержащие сульфиды; Frost et al., 2002). Вероятно, обычные сульфиды могут свидетельствовать аналогичное, но менее очевидное гетерогенное распределение. Некоторые минералы, такие как сфалерит и пирротин привносятся реже в сульфидный расплав, чем галенит (Mavrogenes et al., 2001), арсенопирит и стибнит. Определение плавления сульфидов требует анализа фаз связанных с сосуществующими минеральными фазами, поскольку некоторые минеральные комплексы плавятся при очень высоких температурах.

В большем масштабе, районы, которые лишались сульфидных и силикатных расплавов, всё-таки, по-видимому, могли сохранить повышенные концентрации сульфидных минералов, потому что. Даже при наивысшей стадии метаморфизма, маловероятно, чтобы сульфидные комплексы полностью расплавились полностью. Хотя они попадают в сульфидные расплавы, вероятно, некоторые минералы концентрируются в релиттах, если они составляют большую долю сульфидного комплекса (Mavrogenes et al., 2001).

ВЫВОДЫ

Мы показали две возможности в результате которых рудообразующие металлы могут встроиться в фельзитовые силикатные расплавы во время анатексиса. Металлы могут просто раствориться в силикатных расплавах и сульфидные расплавы могут быть физически вовлечены в истекающих силикатных расплавах. Различные физические свойства сульфидных расплавов в отличие от силикатных расплавов оказывают воздействие, как и когда сульфидные расплавы попадают в виде несмешиваемых включений в силикатные расплавы. Синхронное плавление сульфидных комплексов (месторождений любого типа) и силикатных вмещающих пород во время деформации представляют наиболее благоприятный сценарий для смешивания наибольшей доли и комплексного состава металлов с силикатной магмой. Эти физически увлекаемые сульфидные расплавы, по-видимому, могут постепенно раствориться во время миграции силикатной магмы в верхнюю кору.

Поскольку рудные месторождения относительно редкие, то ожидается гетерогенность в концентраций металлов фельзитовых магм, сформированных в каком-либо одном регионе. Возможно, мигматиты, подверженные этим процессам, распознаются по повышенным содержаниям сульфидов, мезозомы которых деплетированы относительно хальковильным металлов и минералов и соответственно обогащены лейкосомами.

REFERENCES CITED

- Baldwin, J.A., and Pearce, J.A., 1982, Discrimination of productive and nonproductive porphyritic intrusions in the Chilean Andes: *Economic Geology*, v. 77, p. 664-674.
- Brown, M., 1994, The generation, ascent and emplacement of granite magma: The migmatite-to-crustally-derived granite connection in thickened orogens: *Earth-Science Reviews*, v. 36, p. 83-130.
- Cameron, E.M., 1989, Scouring of gold from the lower crust: *Geology*, v. 17, p. 26-29.
- Candela, P.A., 1989, Magmatic ore-forming fluids: Thermodynamic and mass transfer calculations of metal concentrations, in Whitney, J.A., and Naldrett, A.J., eds., *Ore deposition associated with magmas: Reviews in Economic Geology*, v. 4, p. 203-221.
- Clemens, J.D., and Watkins, J.M., 2001, The fluid regime of high-temperature metamorphism during granitoid magma genesis: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 140, p. 600-606.
- de Bremond d'Ars, D., Arndt, N.T., and Hallot, E., 2001, Analog experimental insights into the formation of magmatic sulfide deposits: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 186, p. 371-381.
- Dobson, D.P., Crichton, W.A., Vocadlo, L., Jones, A.P., Wang, Y., Uchida, T., Rivers, M., Sutton, S., and Brodholt, J.P., 2000, In situ measurement of viscosity of liquids in the Fe-FeS system at high pressures and temperatures: *American Mineralogist*, v. 85, p. 1838-1842.
- Frank, M.R., Candela, P.A., Piccoli, P.M., and Glascock, M.D., 2002, Gold solubility, speciation, and partitioning as a function of HCl in the brine-silicate melt-metallic gold system at 800°C and 100 MPa: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 66, p. 3719-3732.
- Frost, B.R., Mavrogenes, J.A., and Tomkins, A.G., 2002, Partial melting of sulfide ore deposits during medium and high grade metamorphism: *Canadian Mineralogist*, v. 40, p. 1-18.
- Halter, W.E., Pettke, T., and Heinrich, C.A., 2002, The origin of Cu/Au ratios in porphyry-type ore deposits: *Science*, v. 296, p. 1844-1846.
- Hedenquist, J.W., and Lowenstern, J.B., 1994, The role of magmas in the formation of hydrothermal ore deposits: *Nature*, v. 370, p. 519-527.
- Jugo, P.J., Candela, P.A., and Piccoli, P.M., 1999, Magmatic sulfides and Au:Cu ratios in porphyry deposits: An experimental study of copper and gold partitioning at 850°C, 100 MPa in a haplogranitic melt-pyrrhotite-intermediate solid solution-gold metal assemblage, at gas saturation: *Lithos*, v. 46, p. 573-589.
- Krauskopf, K.B., 1967, Source rocks for metal bearing fluids, in Barnes, H.L., ed., *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*: New York, Holt, Rinehart and Winston, p. 1-33.
- Mathur, R., Ruiz, J., Titley, S., Gibbins, S., and Margotomo, W., 2000, Different crustal sources for Au-rich and Au-poor ores of the Grasberg Cu-Au porphyry deposit: *Earth and Planetary Science Letters*, v. 183, p. 7-14.
- Mavrogenes, J.A., MacIntosh, I.W., and Ellis, D.J., 2001, Partial melting of the Broken Hill galena-sphalerite ore—experimental studies in the system PbS-FeS-ZnS-(Ag₂S): *Economic Geology*, v. 96, p. 205-210.
- McBirney, A.R., 1993, *Igneous petrology*: Boston, Jones and Bartlett, 508 p.
- Naldrett, A.J., 1989, *Magmatic sulfide deposits*: Oxford, Clarendon Press, 186 p.
- Noble, J.A., 1970, Metal provinces of the western United States: *Geological Society of America Bulletin*, v. 81, p. 1607-1624.
- Okamoto, H., and Massalski, T.B., 1983, Au-Bi (gold-bismuth), in Massalski, T.B., et al., eds., *Binary alloy phase diagrams, Volume 1: Ac-Au to Fe-Rh*: Ohio, ASM International, p. 238-240.
- Petford, N., Cruden, A.R., McCaffrey, K.J.W., and Vigneresse, J.-L., 2000, Granite magma formation, transport and emplacement in the Earth's crust: *Nature*, v. 408, p. 669-673.
- Ripley, E.M., Brophy, J.G., and Li, C., 2002, Copper solubility in a basaltic melt and sulfide liquid/silicate melt partition coefficients of Cu and Fe: *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 66, p. 2791-2800.
- Richardson, F.D., 1974, *Physical chemistry of melts in metallurgy, Volume 1*: Cambridge, Academic Press, 156 p.
- Sawyer, E.W., 2001, Melt segregation in the continental crust: Distribution and movement of melt in anatectic rocks: *Journal of Metamorphic Geology*, v. 19, p. 291-309.
- Scaillet, B., Holtz, F., and Pichavant, M., 1998, Phase equilibrium constraints on the viscosity of silicate magmas—Volcanic-plutonic association: *Journal of Geophysical Research*, v. 103, p. 27,257-27,266.
- Sillitoe, R.H., 1972, Relation of metal provinces in western America to subduction of oceanic lithosphere: *Geological Society of America Bulletin*, v. 83, p. 813-818.
- Tomkins, A.G., and Mavrogenes, J.A., 2002, Mobilization of gold as a polymetallic melt during pelite anatexis at the Challenger deposit, South Australia: A metamorphosed Archean gold deposit: *Economic Geology*, v. 97, p. 1249-1271.
- Ulrich, T., and Heinrich, C.A., 2001, Geology and alteration geochemistry of the porphyry Cu-Au-deposit at Bajo de la Alumbrera, Argentina: *Economic Geology*, v. 96, p. 1719-1741.
- Vigneresse, J.L., and Tikoff, B., 1999, Strain partitioning during partial melting and crystallizing felsic magmas: *Tectonophysics*, v. 312, p. 117-132.

- Watt, G.R., Burns, I.M., and Graham, G.A., 1996, Chemical characteristics of migmatites: Accessory phase distribution and evidence for fast melt segregation rates: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 125, p. 100-111.
- Williams, T.J., Candela, P.A., and Piccoli, P.M., 1995, The partitioning of copper between silicate melts and two-phase aqueous fluids: An experimental investigation at 1 kbar, 800°C and 0.5 kbar, 850°C: *Contributions to Mineralogy and Petrology*, v. 121, p. 388-399.