

**МЕТАМОРФИЗМ,  
ВЫЗЫВАЕМЫЙ ПОДЪЕМОМ МАГМЫ**

**Ревердатто В.В., Бабичев А.В., Коробейников С.Н., Полянский О.П.**  
*Институт геологии и минералогии СО РАН, Новосибирск, rever@igm.nsc.ru*

Признаком интенсивности теплопереноса в земной коре является величина геотермического градиента. В данном сообщении рассматривается метаморфизм, который вызывается привнесением тепла в земную кору посредством подъема магмы, при этом геотермический градиент при метаморфизме пород обычно превышает  $40^{\circ}\text{C}/\text{км}$ . Магма в земной коре перемещается или посредством диапиризма – всплывания легких кислых расплавов – или путем магматических интрузий кислого или основного состава. Причиной перемещения является гравитационная неустойчивость расплавленного материала в окружении более плотных холодных пород. Диапиризм возможен только в достаточно пластичных и горячих породах нижних-средних частей земной коры, и наибольшее развитие он получил, по-видимому, в архее и раннем протерозое. Диапиризму посвящается специальный доклад на данном совещании; его подготовили О.П.Полянский и др. (см. тезисы в материалах конференции). Магматические интрузии являются важнейшим механизмом привноса дополнительного тепла в породы земной коры и метаморфизма на умеренных глубинах. Геологические данные и анализ моделей свидетельствуют о том, что теплоперенос, связанный с фильтрацией флюида, играл подчиненную роль.

Интрузивный магматизм в земной коре вызывает контактовый метаморфизм и зональный метаморфизм умеренных давлений; последний известен также как «метаморфизм низких давлений и высоких температур». Эти два типа метаморфизма имеют одинаковую физическую природу, будучи генетически и пространственно связанными с привнесением тепла интрузивной магмой, но различаются по РТ-условиям образования и сочетаниям метаморфических фаций; при тех же самых размерах магматических интрузивных тел и прочих равных условиях они могут иметь разную ширину метаморфической зональности, разную длительность формирования и т.п. Принимается, что при контактовом метаморфизме начальная температура вмещающих пород (исходя из среднеземной величины геотермического градиента  $\sim 25^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ) обычно не достигает  $100\text{-}120^{\circ}\text{C}$ . Геотермический градиент может достигать при контактовом метаморфизме более  $100^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ; причем термический градиент – нелинейный: его крутизна возрастает при приближении к контакту. Граница между контактовым и зональным метаморфизмом умеренных давлений неопределенна, однако принимается, что контактовый метаморфизм ограничен глубиной  $\sim 5$  км и давлением  $\sim 1.5$  кбар. На такой глубине контактовые ореолы в неметаморфизованных породах выражены весьма отчетливо, что является характерным признаком и диагностическим критерием метаморфизма низких давлений. Зональный метаморфизм умеренных давлений происходит на глубинах более 5 км, где начальная температура вмещающих пород больше  $100\text{-}120^{\circ}\text{C}$ . Поэтому при прочих равных условиях вблизи глубинных магматических интрузивных тел достигаются температуры более высокие, чем при контактовом метаморфизме, длительность прогрева вмещающих пород увеличивается, а ширина зон термических преобразований становится больше. Последнее обстоятельство обуславливает также менее крутой термический градиент, чем при контактовом метаморфизме.

Возникает вопрос: какова максимальная глубина и литостатическое давление, где еще возможен зональный метаморфизм, исходя из температуры интрузивной магмы и начальной температуры вмещающих пород? Поскольку температура зонального метаморфизма умеренных давлений, как правило, не превышает  $\sim 900^{\circ}\text{C}$  (о такой температуре свидетельствует устойчивость минеральные ассоциации пород гранулитовой фации во внутренних частях зональности), максимальная его глубина в земной коре должна быть ограничена 25-28 км. Это следует из оценок температуры интрузивных контактов с учетом начальной температуры вмещающих пород –  $600\text{-}700^{\circ}\text{C}$  (при начальном геотермическом градиенте  $25^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ) и температуры основной магмы  $\sim 1100^{\circ}\text{C}$ . При тех же условиях и начальном геотермическом градиенте  $30^{\circ}\text{C}/\text{км}$  максимальная глубина зонального метаморфизма должна быть ограничена 20-23 км. Вместе с тем, глубина, где температура на интрузивном контакте мало отличается от температуры вмещающих пород,

является предельной для метаморфизма, который обусловлен внедрением гранитной магмы. При начальном геотермическом градиенте  $25^{\circ}\text{C}/\text{км}$  эта глубина для интрузивов гранитной магмы составляет 26-28 км. Внешняя граница метаморфической зональности, фиксируемая по минеральным превращениям, на таких больших глубинах (в средней части земной коры) становится неопределенной (однако можно полагать, что ширина зональности, во всяком случае, превышает 20 км). Исходя из вышесказанного, глубину в 25-28 км предполагается принять в качестве предельной для зонального метаморфизма умеренных давлений. На такой глубине максимальное литостатическое давление ограничивается 7-8 кбар. В этих условиях, благодаря регионально повышенному уровню температур, частично плавятся кислые породы и формируются мигматиты, однако очевидно, что в основных породах проявляется и метаморфизм, вызываемый интрузиями магмы. Это подтверждается характерными примерами, где зональный метаморфизм реализовывался при 5-8 кбар. Давление до 7-8 кбар и глубина до 25-28 км являются, помимо прочего, причиной того, что для зонального метаморфизма умеренных давлений (РТ-условия амфиболитовой фации) вряд ли следует использовать название «метаморфизм низких давлений и высоких температур – LP/HT».

Для приблизительного определения глубины становления магматического интрузива можно использовать данные о распределении изоград в окружающей метаморфической зональности. Хельмут Винклер был первым, кто в 1967 г. обратил внимание на эту проблему. Необходимая информация получается из расчетов (путем решения уравнения теплопроводности) по остыванию магматического тела и нагреванию вмещающих пород при определенных (начальных и граничных) условиях. Расчетные данные по распределению изотерм в околоинтрузивном пространстве должны сравниваться с фактическим распределением изоград во вмещающих породах для конкретного интрузива. При этом предполагается, что изотермы представляют собою максимумы соответствующих температур, достигаемых при прогреве экзоконтактовых пород в разное время; некоторые из них проявляются как изограды. Для расчетов необходимо знать форму интрузива, состав и начальную температуру магмы, региональный геотермический градиент в земной коре во время внедрения магмы, теплофизические свойства пород и расплава, распределение изоград / изотерм во вмещающих породах и т.п. Получаемые оценки глубинности не могут претендовать на большую точность, поскольку являются результатом расчетов в упрощенной модельной постановке, однако они все же могут иметь определенный практический интерес.

Нельзя не упомянуть о метаморфизме пород, слагающих древние щиты. Он проявлялся при огромной роли магматического тепла. При гранулитовом метаморфизме в архее и раннем протерозое обычно достигались почти однородные высокие давления и температуры на больших площадях. Диапазон давлений укладывался в 7-15 кбар, а температур – в  $700-1000^{\circ}\text{C}$ . Для этого типа метаморфизма может быть предложен механизм с длительным прогревом вышележащей толщи пород постоянным тепловым источником – конвектирующей мантийной магмой. Модельные расчеты показывают, что для континентальной коры мощностью 40-60 км при постоянной температуре на нижней границе в  $1000-1100^{\circ}\text{C}$  стационарное распределение температур устанавливается в течение 30-40 млн. лет. Другие объяснения Р-Т условий образования гранулитов древних щитов должны учитывать прогрев пород вблизи крупных базитовых / ультрабазитовых плутонов наряду с интенсивной деформацией земной коры. Неоднократность этих событий приводила к полиметаморфизму.

*Данная работа выполнялась в рамках Программы фундаментальных исследований РАН, проект ОНЗ-8, при финансовой поддержке РФФИ (грант 08-05-00166), а также Совета при Президенте РФ для поддержки ведущих научных школ НШ-258.2008.5.*