

ГОРНЫЕ ПОРОДЫ И МИНЕРАЛЫ КАК ОБЪЕКТЫ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2008 г. Ю. С. Геншафт¹, А. К. Гапеев², С. К. Грибов², В. А. Цельмович²

¹Институт физики Земли и.о. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

²Геофизическая обсерватория "Борок", ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, пос. Борок (Ярославская обл.)

Поступила в редакцию 14.05.2008 г.

Представлены результаты изучения комплекса петрофизических свойств и минералогии различных по условиям образования и составам горных пород, минералов и модельных объектов. Исследованы петро- и палеомагнитные характеристики образцов горных пород и проведены эксперименты по моделированию процессов кристаллизации ферритмагнитных минералов в широкой области давлений и температур. Изучены минералы горных пород разного генезиса и возраста (магматические и метаморфические породы, ксенолиты и мегакристаллы), проведены реконструкции физико-химических условий их образования. Оценены окислительно-восстановительные режимы существования пород, глубинность магматических очагов, роль вторичных, наложенных процессов метасоматоза и метаморфизма в изменении физических свойств глубинного вещества Земли. Показано большое значение структурного фактора в формировании магнитных свойств оксидов железа. Минеральная геотермобарометрия позволила оценить глубинное распределение температуры, летучести кислорода под вулканически активными областями.

Ключевые слова: магнетизм горных пород, титаномагнетиты, ильмениты, гидроокислы железа, метакхронная намагниченность.

PACS:91.25.F-

Последние десятилетия знаменуют все большее интегрирование результатов изучения свойств недр Земли и протекающих в них процессов геофизическими и "геологическими" методами (изучение упруго-плотностных характеристик, аномалий гравитационного, теплового, магнитного полей, добротности, блокового строения земной коры и мантии, изотопно-геохимических, минералогических, структурно-текстурных характеристик горных пород, их деформационных свойств; моделирование свойств и поведения вещества Земли при высоких РТ параметрах и др.). Представления о плюмах как источниках мантийных магм, сохранивших изотопно-геохимический облик первичного вещества нашей планеты и поднимающихся к верхам мантии из слоя D" (область перехода от нижней мантии к жидкому ядру), подкреплены данными сейсмической томографии, выявляющими относительно высокоскоростные и низкоскоростные области мантии. Гравитационные аномалии и сейсмические границы в глубинах Земли находят объяснение в рамках фазовых превращений минералов, химико-минерального состава глубинного вещества и процессов вторичного преобразования пород под действием метасоматических и метаморфических процессов в динамическом поле напряжений и деформаций глубинной среды.

В ГО "Борок" в эти годы проводилось изучение комплекса петрофизических свойств и минералогии различных по условиям образования и составам горных пород, минералов и модельных объектов. Значительную долю в этих работах составляли исследования петро- и палеомагнитных характеристик образцов горных пород и эксперименты по моделированию процессов кристаллизации ферритмагнитных минералов в широкой области давлений и температур. Результаты этих исследований опубликованы в научных журналах, материалах различных конференций и симпозиумов. В данной работе приводятся основные полученные результаты, которые, по нашему мнению, помогают лучше понять природу формирования свойств вещества верхних оболочек Земли, отвечающих за физические поля планеты. Так как многие результаты неоднократно публиковались [Геншафт и др., 1995; 1998; 1999; 2003 и др.], основные выводы приводятся в краткой форме.

В группу ферритмагнитных минералов в первую очередь следует отнести феррошпинели (твердые растворы на базе магнетита и ульвошпинели), ильменит, гетит, сульфиды железа [Печерский, Геншафт, 2002]. В магматических породах основного и кислого составов наиболее распространены феррошпинели и ильменит. Магнитные свойства последних сильно зависят от их химического состава.

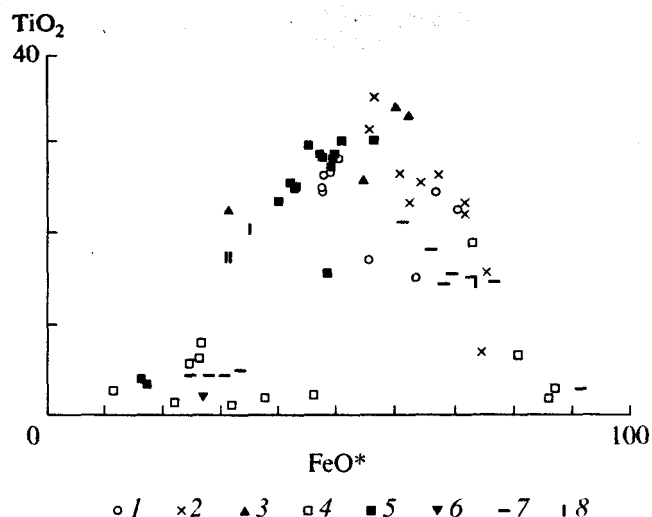


Рис. 1. Соотношение оксидов Fe и Ti (все железо в виде FeO*), мас. %, в шпинелях. Разными значками показаны горные породы, на основе которых готовились исходные смеси, и давления кристаллизации, кбар: 1 – ЩБ, 50; 2 – ЩБ, 15; 3 – ПД, 15; 4 – КК, 15; 5 – КК, 50; 6 – КК, 31; 7 – СК, 15; 8 – СК, 50.

Наиболее высокими магнитными характеристиками обладает магнетит, тогда как увеличение в твердом растворе ульвошпинели (т.е. увеличение содержания в составе минерала TiO_2) приводит к заметному снижению магнитной восприимчивости, естественной остаточной намагниченности. Для ильменита долгое время господствовало представление, что его магнезиальность, т.е. вхождение в твердый раствор гейкилита (Mg_2TiO_4), в первую очередь зависит от глубины (или давления) кристаллизации. Эта точка зрения подкреплялась находками пикроильменита (ильменит с высоким содержанием MgO) в наиболее глубоких магматических образованиях – кимберлитах. Поэтому был выполнен цикл исследований при высоких РТ параметрах по выяснению условий формирования твердых растворов ферримангнитных минералов разного состава. Эксперименты проводились на распространенной аппаратуре высоких давлений и температур типа “чечевица” и “тороид” (твердосплавные наковальни с лункой) и “поршень–цилиндр” [Геншафт, 1977] до давлений 60 кбар и до температуры 1500°C. Составы кристаллизующихся минеральных фаз определялись методом рентгено-спектрального микрозондирования.

Уже первые результаты экспериментальных исследований кристаллизации феррошпинели из силикатных расплавов до давления 10 кбар показали, что рост давления приводит к увеличению доли ульвошпинели в твердом растворе титаномангнетита при одновременном росте содержания MnO и снижении MgO, Cr_2O_3 , Al_2O_3 [Геншафт,

Саттаров, 1982]. В последующих работах было установлено, что титаномангнетит с относительно низким содержанием примесных элементов кристаллизуется только до давления около 25 кбар, а дальнейший рост давления до 50 кбар приводит к образованию феррошпинели с переменной концентрацией титанистой составляющей и росту содержания MgO, Cr_2O_3 , Al_2O_3 (рис. 1). Этот результат был получен при изучении различных по составам пород и, по-видимому, отражает взаимодействие расплавов с различными флюидными (расплавными?) составляющими [Геншафт и др., 2003]. Полученные данные хорошо коррелируют с минералогией горных пород из различных глубинных уровней. Так, титаномангнетит обнаруживается во всех магматических образованиях, раскристаллизованных в пределах земной коры. В мантийных ксенолитах ультраосновного состава шпинелевой и гранатовой фаций глубинности обнаруживается только высокохромовая шпинель с пониженным содержанием TiO_2 [Геншафт и др., 1987]. При этом было показано, что независимо от кислотности расплава магматические породы формируются в узком интервале окислительных условий – вблизи буферов QFM и NNO [Геншафт, 2006]. С увеличением глубин кристаллизации пород в верхней мантии происходит постепенный сдвиг в сторону более восстановительных параметров, вплоть до буфера WI [Кадик, 2006]. Отметим, что изучение собственной летучести кислорода в минералах перидотитов и в мегакристаллах силикатных фаз и пикроильменита из щелочных базальтов и кимберлитов дает не столь ясную картину в глубинном распределении летучести кислорода [Жаркова, Кадик, 2007; Жаркова и др., 2007]. Вероятно, авторы этих публикаций справедливо отмечают большую роль состава флюидов в изменении глубинного распределения летучести кислорода и соответствующего вторичного преобразования химического и минерального составов горных пород в геологической истории Земли.

Для проверки сделанных ранее некоторыми авторами выводов о роли давления в кристаллизации высокомагнезиального пикроильменита были выполнены эксперименты при высоких РТ параметрах, показавшие определяющее влияние магнезиальности пород и окислительного режима на вхождение в твердый раствор гейкилита (рис. 2) [Геншафт и др., 2000].

На примере щелочного базальта было показано влияние давления (в интервале 15–27 кбар) на состав кристаллизующегося титаномангнетита. Рост давления привел к сильному сокращению концентрации TiO_2 (от 25 до 14 мас. %) и соответствующему росту содержания Al_2O_3 , Cr_2O_3 , MgO, NiO (рис. 3 и рис. 4) [Геншафт и др., 2007].

Поскольку в осадочных породах гидроокислы железа играют важную роль, был выполнен цикл исследований по образованию гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) и маггемита ($\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$) при дегидратации гетита ($\alpha\text{-FeOOH}$) и лепидокрокита ($\gamma\text{-FeOOH}$) [Гапеев, Грибов, 2006б; 2007; 2008; Гапеев и др., 2006]. В ходе этих магнитноминералогических превращений в геомагнитном поле возникает метакронная компонента естественной остаточной намагниченности химического происхождения, в значительной степени определяющая намагниченность осадочных пород в зонах гипергенеза. Проведенные исследования показали, какое большое значение в формировании магнитных свойств оксидов железа играет структурный фактор при одном и том же химическом составе исходного минерала. Если преобразование гетита происходит достаточно просто с четкими зависимостями величин магнитных характеристик от температуры и размера зерен, то в случае лепидокрокита образование маггемита с последующим переходом в гематит обусловлено сложными трансформациями связей О-Н...О и Fe-ОН, образованием промежуточных модификаций маггемита и кинетическими факторами дегидратации. Во всех случаях активность процессов перехода и уровень формирования магнитных характеристик сильно зависят от размера зерен. Эти исследования ставят задачу выяснения условий стабилизации истинно равновесного и псевдоравновесного состояния ферримангнетиков. К этой проблеме также приводят исследования равновесной смесимости в системе магнетит-ульвошпинель при различных температурах. Анализ опубликованных данных показывает значительное расхождение в полученных значениях равновесных составов твердых растворов в интервале температур 350–450°C. Однозначно показано, что при увеличении температуры распада доля ульвошпинели в твердом растворе уменьшается [Гапеев, Грибов, 2006а].

Большой объем работ был выполнен по изучению минералов горных пород разного генезиса и возраста (магматические и метаморфические породы, ксенолиты и мегакристаллы), реконструкции физико-химических условий их образования. И в этом комплексе исследований ферримангнитные минералы и магнитные характеристики пород позволили независимо оценить окислительно-восстановительные режимы существования пород, глубинность магматических очагов, роль вторичных, наложенных процессов метасоматоза и метаморфизма в изменении физических свойств глубинного вещества Земли. Минеральная геотермометрия позволила оценить глубинное распределение температуры, летучести кислорода под вулканически активными областями (Йемен, Германия, Болгария, Вьетнам, Монголия, Исландия, Кавказ и др.). На уровнях существования шпинелевой фазии ультрабазитов различие в температу-

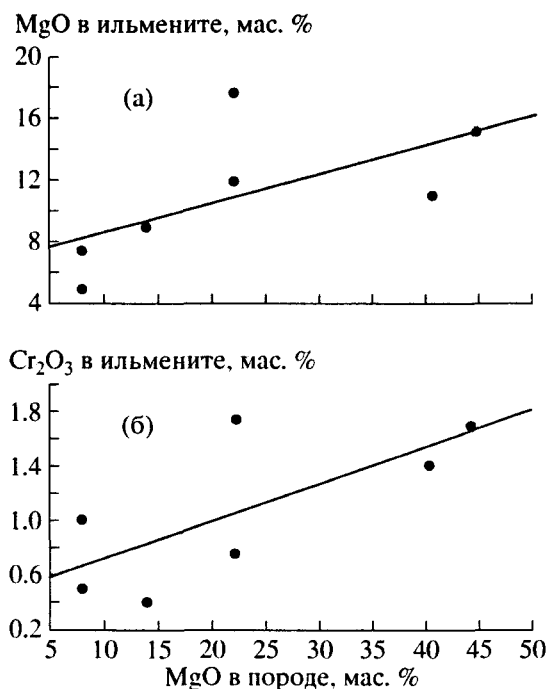


Рис. 2. Зависимость содержаний MgO и Cr_2O_3 от магнезиальности пород.

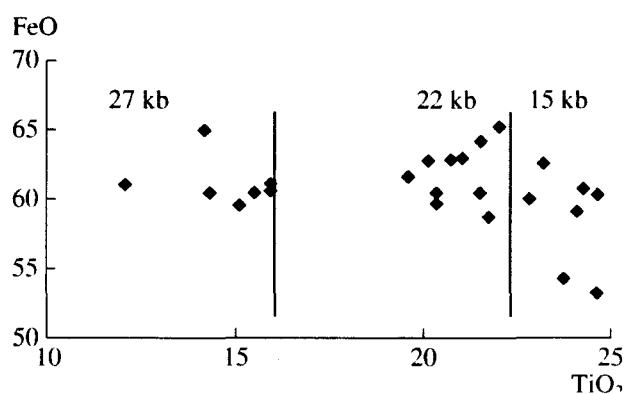


Рис. 3. Влияние давления на содержание TiO_2 в титаномангнетите.

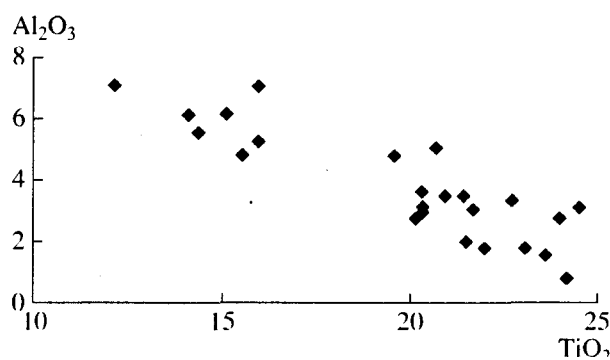


Рис. 4. Соотношение Al_2O_3 и TiO_2 в титаномангнетите.

рах под разными тектоническими структурами – внутриконтинентальными и океаническими, в области перехода от континента к океану – достигает 300°C. При этом относительно низкотемпературные породы (Ю. Йемен, Монголия) содержат амфибол. Обобщение данных по термобарометрии магматических пород разной петрохимической принадлежности в координатах SiO_2 – ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$) приводит к заключению, что увеличение щелочности магм и снижение их кремнекислотности обусловлены относительно низкотемпературным метасоматическим преобразованием мантийных пород перед плавлением. Этот процесс, скорее всего, проходит в условиях сдвиговых деформаций пород мантии, приводящих к ярко выраженному их текстурированию и расслоению по минералогии. Ксенолиты из кимберлитов и щелочных базальтов демонстрируют справедливость этих представлений [Геншафт, 1993].

Было показано, что развитие рифтогенеза сопровождается повышением температуры в верхних частях литосферы, при этом происходит изменение петрохимического и изотопно-геохимического состава магм в сторону большей щелочности. Среди ксенолитов ультрабазитов выделены породы "зеленой" и "черной" серий, минералы которых отражают как кристаллизацию базальтовой магмы, так и воздействие на мантийный субстрат глубинных флюидов разного состава (различных окислительно-восстановительных условий). В пределах Байкало-Монгольского региона устанавливается разогрев подкоровой мантии с юга на север – от плато Дариганга к Байкалу [Салтыковский, 2003].

Наличие в базальтах сибирских траппов титаномагнетитов с дискретным распределением (полимодалным) температур Кюри позволило прийти к выводу об одновременном существовании разноглубинных магматических очагов [Геншафт и др., 2008в]. Эта ситуация, вероятно, не является уникальной, можно ожидать ее повторения в различных структурах Земли на разных этапах ее эндогенной активности. Во всяком случае, представления о смешении разноглубинных магм согласуются с таким заключением. Метасоматическая проработка пород приводит к замещению титаномагнетита низкопримесным магнетитом и преобразованию относительно слабо магнитных пород в высоко магнитные. Это было показано на примере пород Коготокской и Арыджангской свит Хатанги [Геншафт и др., 2008б].

Выполненные исследования, дополненные обобщением публикаций различных авторов, приводят к выводу о сложной геологической истории развития Земли, в которой существенную роль играет преобразование пород и минералов на самых различных глубинных уровнях под воздействием тектонических сил (деформации в неоднородном поле на-

пряжений) и взаимодействия с флюидами, меняющими существенно изотопно-геохимический и минеральный состав недр.

Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 03-05-64477, 03-05-64478, 06-05-64588, 06-05-64692, 06-05-65162, 06-05-65135).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гапеев А.К., Грибов С.К. К вопросу о смесимости в системе Fe_3O_4 - Fe_2TiO_4 . Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. Материалы семинара. М.: ГЕОС. 2006а. С. 45-47.
- Гапеев А.К., Грибов С.К. Новые данные о свойствах химической остаточной намагниченности, образующейся в процессе дегидратации синтезированных гетитов. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. Материалы семинара. М.: ГЕОС. 2006б. С. 48-50.
- Гапеев А.К., Грибов С.К. Особенности кинетики разложения у- FeOOH в изотермических условиях. Палеомагнетизм и магнетизм горных пород: теория, практика, эксперимент. Материалы семинара. М.: ГЕОС. 2007. С. 30-33.
- Гапеев А.К., Грибов С.К. Особенности кинетики температурных фазовых и магнитных превращений природного лепидокрокита. Материалы докладов XVII научных чтений памяти проф. И.Ф. Трусовой "Проблемы магматической и метаморфической петрологии". РГГРУ. М. 2008. С. 11-14.
- Гапеев А.К., Грибов С.К., Косарев С.И. К вопросу о синтезе и особенностях термического разложения лепидокрокитов. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. Материалы конференции. М. 2006. С. 10-12.
- Геншафт К.С. Экспериментальные исследования в области глубинной минералогии, петрологии. М.: Наука. 1977. 208 с.
- Геншифт Ю.С. Текстурированность глубинных ксенолитов как отражение динамических процессов в литосфере Земли // Физика Земли. 1993. № К). С. 44-59.
- Геншифт Ю.С. Окислительно-восстановительные условия в литосфере и мантийный магмогенезис // Геофиз. журнал. 2006. Т. 28. № 5. С. 52-56.
- Геншифт Ю.С., Гапеев А.К., Цельмович В.А. Особенности вхождения примесных атомов Al, Mg, Mn в структуру титаномагнетита // Физика Земли. 2(М)Ка. № 1.С. 81-86.
- Геншафт Ю.С., Ладыгин В.М., Цельмович В.А., Тихонов Л.В., Гапеев А.К., Салтыковский А.Я. Изменения ферритмагнитных минералов и магнитных свойств горных пород при наложениях процессов метаморфизма и метасоматоза. Материалы докладов XVII научных чтений памяти проф. И.Ф. Трусовой "Проблемы магматической и метаморфической петрологии". РГГРУ. М. 2008б. С. 17-22.
- Геншафт Ю.С., Печерский Д.М., Шаронова З.В., Миронова Н.А., Цельмович В.А., Специус З.В., Илхпин И.П. Магнитопетрологическое изучение условий формирования недр континентальной земной коры (на