

ПЕРЕНОС ФЛЮИДА/РАСПЛАВА ИЗ МАНТИИ В НИЖНЮЮ КОРУ ПРИ ГРАНУЛИТОВОМ МЕТАМОРФИЗМЕ

Ж.Л.Р. Type

Musée de Minéralogie, École des Mines (Mines ParisTech), 60 Bvd Saint-Michel, 75006, Paris, France

«Непредсказуемое» (по Г.Г.Ф. Винклеру) открытие флюидных CO₂-включений в гранулитах породило многочисленные дебаты, которые уже на протяжении более 35 лет не прекращаются и имеют важное значение для метаморфической петрологии. Данные по экспериментам и стабильным изотопам подтверждают «бесфлюидную» модель, которой противостоит «флюидная» гипотеза, базирующаяся на присутствии флюидных включений. Выявлено, что помимо CO₂, другие флюиды, а именно высококонцентрированные водные растворы (рассолы), также играют важную роль и могут сосуществовать с минеральными ассоциациями гранулитов при высоких *PT*-параметрах. Рассолы, которые также встречаются в виде включений, оставляют свой след при широкомасштабных метасоматических изменениях, типичных для ряда обширных территорий: например, межзерновые прожилки калишпата и выделения кварца (мирмекиты); карбонатный метасоматоз вдоль многокилометровых зон сдвига (Норвегия, Индия); «зарождающиеся чарнокиты» (Индия, Шри-Ланка, Скандинавия); высокоокисленные архейские гранулиты. Вместе с тем эти примеры предполагают, что количество флюидов в самой нижней коре (пик метаморфизма) было очень большим и они должны иметь очень локальное происхождение. Следовательно, эти флюиды уходили из системы в процессе постметаморфического подъема (за исключением реликтов, сохранившихся в виде включений в минералах).

Реликты флюидов, идентичные с флюидами в нижнекоревых гранулитах, были выявлены в мантийных минералах, включая алмаз. Главный источник мантийных флюидов имеет непосредственное отношение к процессам плавления: позднемагматические эманации — из щелочно-базальтовых расплавов, карбонатные метасоматические водные флюиды — из глубинных карбонатов. Даже если не исключать возможность того, что какая-то часть флюидов возникла за счет плавления в коревых условиях, в целом большинство флюидов в нижнекоревых гранулитах имеет мантийное происхождение. Они перемещались из мантии в кору посредством синметаморфических интрузий, которые также создавали высокий термальный градиент, обычный для гранулитов, в особенности для HT- или UHT-типов. Эти породы имеют преимущественно докембрийский возраст и образовывались в очень короткие интервалы времени: 500, 1000, 1800, 2500 млн лет. Они широко распространены на суперконтинентах или суперкратонах и появляются как в конце периода их становления, так и в короткий период перед их раскалыванием. Образование этих пород происходило согласно механизму вертикальной аккреции континентального слэба, который существенно дополняет классический вариант латеральной аккреции выше зон субдукции при конвергентных границах.

Гранулиты, флюидные CO₂ включения, включения рассолов, континентальная кора.

MANTLE TO LOWER-CRUST FLUID/MELT TRANSFER THROUGH GRANULITE METAMORPHISM

J.L.R. Touret

The “unexpected” (the word is from H.G.F. Winkler, 1974) discovery of CO₂-rich inclusions in granulites has initiated a debate, which, after more than 35 years, is still an important issue in metamorphic petrology. Experimental and stable isotope data have led to the conception of a “fluid-absent” model, opposed to the “fluid-assisted” hypothesis, derived from fluid inclusion evidence. Besides CO₂, other fluids have been found to be of importance in these rocks, notably, concentrated aqueous solutions (brines), also able to coexist with granulite mineral assemblages at high *P* and *T*. Brines also occur in inclusions or, more impressively, have left their trace in large-scale metasomatic effects typical of a number of high-grade areas, e.g., intergranular K-feldspar veining and quartz exsolution (myrmekites), carbonate metasomatism along km-scale shear zones (Norway, India), “incipient charnockites” (India, Sri Lanka, Scandinavia), and highly oxidized Archean granulites. All together, this impressive amount of evidence suggests that the amount of fluids in the lower crust, under peak metamorphic conditions, was very large indeed, far too important to be only locally derived. Then, except for remnants contained in inclusions, these fluids have left the rock system during postmetamorphic uplift.

Fluid remnants identical to those occurring in deep crustal granulites are also found in mantle minerals, including diamonds. Major mantle fluid source is related to the final stages of melting processes: late magmatic emanations from alkalic basaltic melts, and carbonate-metasomatizing aqueous fluids issued from igneous carbonates. Even if a local derivation of some fluids by crustal melting cannot be excluded, most lower-crustal granulite fluids have the same origin. They are transferred from the mantle into the crust by synmetamorphic intrusives, also responsible for the high thermal gradient typical of granulites, notably, HT- or UHT-types. These

are mostly found in Precambrian times, generated during a small number of time intervals, e.g., around 500, 1000, 1800, 2500 Ma. High-temperature granulites forming events occur at world scale in supercontinents or supercratons, either at the end of amalgamation or shortly before breaking-off. They provide a mechanism for a vertical accretion of the continental slab, which complement the more classical way of lateral accretion above subduction zones at convergent boundaries.

Granulites, CO₂ and brine inclusions, continental crust

ВВЕДЕНИЕ

В геологических учебниках сегодня много пишется о «революции 60-х», при этом упоминается тектоника плит, которая, несомненно, привнесла большие изменения во многие области наук о Земле. Тектоника плит имеет непосредственное отношение к лучшему пониманию того, как океаны образовывались посредством срединно-океанических хребтов, а потом исчезали в результате субдукции океанов, а затем субдукции континентов. Строение океанической коры достаточно простое и включает в себя небольшое количество слоев, расположенных над мантией. Менее известен тот факт, что примерно в это же самое время произошла другая «революция», а именно в понимании структуры континентальной коры, во многом под влиянием работ русских ученых (в частности В.С. Соболева (Новосибирск) и В.В. Белоусова (Москва)). Было осознано, что под тонким осадочным чехлом континентов нет мощных гомогенных масс гранитов. Первоначально для этого явления Э. Суэсс предложил термин «Sal» [Suess, 1883—1909], позднее А. Вегенер трансформировал его в термин «SiAl» — сиалическая кора [Wegener, 1929]. Подобно коровым доменам под океанами, эта часть континентальной коры также стратифицирована и состоит из трех зон примерно одинаковой мощности с преобладанием метаморфитов: низко- и среднеметаморфизованная верхняя кора; гранит-мигматитовая средняя кора и гранулитовая нижняя кора, отделяющаяся от мантии по главному геофизическому разделу — границе Мохо. Магматические породы составляют значительную часть двух нижних зон, но не являются непрерывными слоями. Они встречаются как отдельные тела, образовавшиеся либо за счет частичного плавления дометаморфического коро-

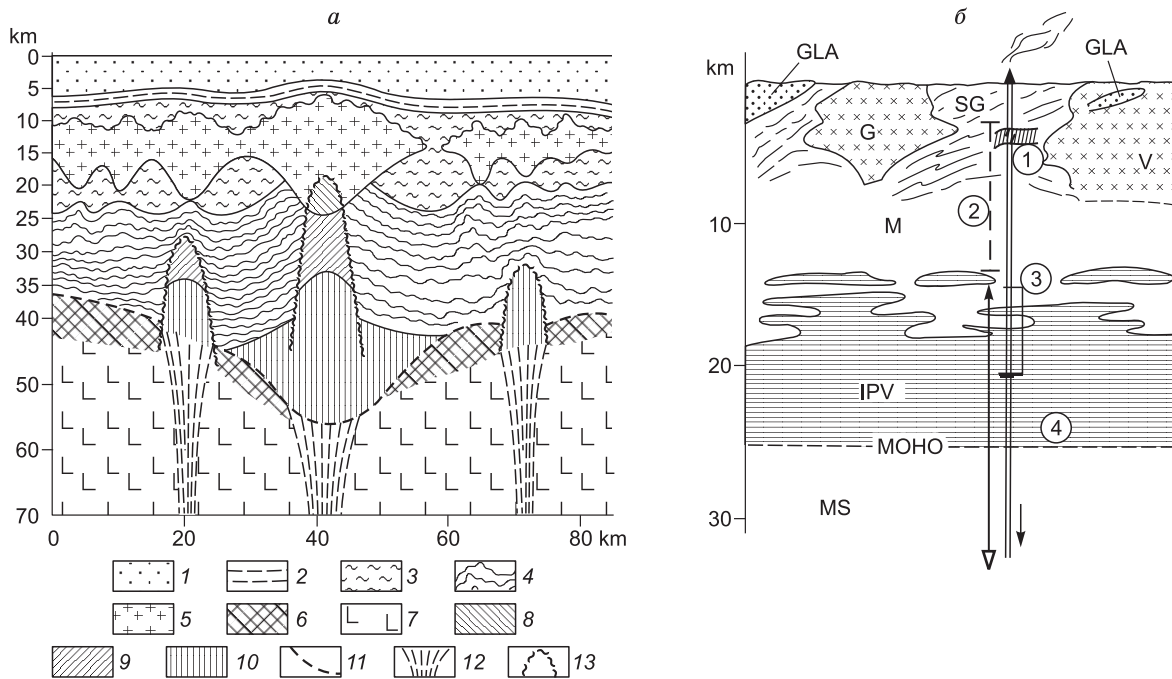


Рис. 1. Строение континентальной коры, по [Belousov, 1966] (а). Кора вариссийского возраста под массивом Централ, Франция [Touret, Huizenga, 1999] (б).

1 — осадочные породы; 2 — метаморфические породы зеленосланцевой фации; 3 — то же, амфиболитовой фации; 4 — то же, гранулитовой фации; 5 — граниты; 6 — эклогиты; 7 — гранулитовые перидотиты верхней мантии; кристаллические породы; 8 — кислые, 9 — среднего состава, 10 — основные; 11 — граница Мохоровичича; 12 — воздымание астеносферы; 13 — границы проплавления.

GLA — HP-гранулиты/эклогиты, 400 млн лет (Groupe leptyno-amphibolique); GS — верхняя кора; G, V — вариссийские (углеродсодержащие) граниты; IPV — вариссийская нижняя кора (HT-гранулиты); M — гранитные мигматиты; MS — верхняя мантия. 1 — последняя магматическая камера кайнозойских вулканов; 2 — гранитные мигматиты; 3 — верхний уровень ксенолитов гранулитов; 4 — уровень захвата ксенолитов гранулитов/ультрабазитов, выносимых вулканами.

вого компонента (в большинстве случаев, это граниты средней коры), либо за счет инъекций из мантии (преимущественно габброидные интрузии). Количество этих тел неизменно возрастает по мере приближения к нижележащей мантии. Насколько мне известно, эта модель была впервые четко сформулирована В.В. Белоусовым [Belousov, 1966] (рис. 1, *a*), и в дальнейшем подтверждена многими петрографически и геофизическими данными [Ramberg, Smithson, 1975]. На рис. 1, *b* показан очень яркий пример — существование варисийской коры под массивом Централ (Франция). На этом массиве присутствуют два типа гранулитов или близких к ним пород. Породы первого типа, субдукционные НР-гранулиты и эклогиты (возраст 400 млн л., эогерцинская фаза), на данный момент обнажены на дневной поверхности за счет эксгумации посредством сложной системы субгоризонтальных надвигов и покровов. Породы второго типа, НТ-гранулиты, находятся на глубине в пределах современной нижней коры. Эти породы образовались 300 млн л. назад, когда огромные массы гранитов располагались в средней коре. Эти герцинские гранулиты никогда не обнажались на дневной поверхности, а выносились в виде ксенолитов современными вулканами совместно с большим количеством более глубинных ксенолитов — мантийных пород ультрабазитового состава.

Крупные домены континентального размера, представляющие гранулитовую кору, были выявлены в ядрах большинства докембрийских щитов, тогда как во всех остальных случаях это ксенолиты, выносимые лавами молодых вулканов совместно с большим количеством ультрабазитовых мантийных образцов. Эти гранулиты содержат безводные минеральные ассоциации (пироксены + гранат) и резко отличаются от гранулитовых пород с водосодержащими минералами (слюды, амфиболы), которые типичны для средней и верхней коры.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ: БЕСФЛЮИДНЫЙ РЕЖИМ

Экспериментальная метаморфическая петрология сделала значительный шаг во второй половине XX столетия. Во-первых, стало возможным оценить *PT*-условия, при которых происходили метаморфические реакции. Это было сделано во многом благодаря работам группы, возглавляемой Г.Г.Ф. Винклером в Гёттингене, совместно с экспериментаторами из США и других стран (главным образом из Геофизической лаборатории в Вашингтоне). Было выявлено, что в «нормальных» метаморфических условиях, преобладающих в средней коре, частичное плавление затрагивает большое количество ранних коровых литотипов, генерируя гранитные расплавы, которые потом собираются вместе, мигрируют на разные уровни верхней коры и образуют плутоны или субвулканические интрузии. Температуры плавления в коре (около 700 °С) значительно ниже, чем температуры плавления в мантии (>1000 °С), но в любом случае это требует присутствия воды. Роль других флюидов, главным образом CO₂, второстепенна, поскольку CO₂ не влияет на температуру плавления, а карбонаты, главные CO₂-содержащие минералы проградного метаморфизма, растворяются в кислых растворах на начальных этапах погружения, и флюидная фаза становится преимущественно водной.

Плавлению в коровых условиях предшествует большое количество метаморфических реакций, в ходе которых происходит активное разрушение водных минералов в следующей последовательности: цеолиты, хлориты и слюды (сначала мусковит, затем биотит). Количество молекул воды в каждом минерале неуклонно понижается, что приводит к относительно более сухим условиям с глубиной погружения. Как только происходит плавление, интерстиционные водные флюиды растворяются в гранитных расплавах и оказывают существенное влияние на наклон кривой плавления, т.е. на уровень глубины, на котором расплав будет кристаллизоваться: насыщенные расплавы (отрицательный наклон) застывают почти непосредственно на месте, тогда как недосыщенные расплавы могут подниматься на много километров, иногда достигая поверхности в виде вулканических экструзий. Большинство гранитных магм, зарождавшихся в средней коре, являются водонасыщенными и имеют генетическое родство с нижележащими мигматитами. С другой стороны, нижнекоровые граниты (и мантийные за счет магматической дифференциации) в большинстве случаев являются водоненасыщенными и обычно внедряются в верхнюю кору или образуют огромные риолитовые провинции. Все эти рассуждения совместно с большим количеством данных по стабильности различных минеральных фаз в рассматриваемом *PT*-интервале привели к популярной модели с бесфлюидным режимом [Thompson, 1983], которая является превалирующей для фундамента континентов: все свободные флюиды (как предполагается — только вода) являются связанными в структуре минералов или растворенными в расплавах. Поскольку все рассматривается в аспекте гранулитов, из этой модели следуют два важных вывода:

1. Типичные минералы гранулитов (в первую очередь, пироксены и гранаты, а также многие другие ферромагнезиальные минеральные фазы) являются мультикомпонентными твердыми растворами в силу крайней сложности их появления на прогрессивных метаморфических изоградах. В рамках безводной модели только температура является критическим параметром: в гранулитах она выше, чем в окружающих породах.

2. Поскольку температура повышается с глубиной, достигая в некоторых случаях критического магматического интервала (более чем 1000 °С в УНТ-гранулитах [Kelsey, 2008]), гранулиты должны быть

реститами, оставшимися после удаления гранитного компонента. Эта идея согласуется с общим депле-тированным характером нижнеконтинентальной коры по экзотермическим элементам (K, Rb и т.д.), что было уже давно известно в геохимии.

ДАнные по флюидным включениям: два типа флюида в гранулитах

Понятие «сухая» гранулитовая нижняя кора, сформированная в условиях отсутствия флюида, появилось после «неожиданного открытия» [Winkler, 1974] большого количества флюидных включений в породообразующих минералах гранулитов. Впервые такие находки были сделаны в породах Южной Норвегии [Touret, 1970; 1971], затем практически во всех других гранулитовых террейнах, вне зависимости от расположения, геодинамической обстановки и возраста. Включения в основном содержат чистую углекислоту различной плотности, причем максимальные значения превышают 1.1 г/см^3 в случае «суперплотных» включений, что значительно выше, чем плотность жидкой воды. Затем были обнаружены включения высокосолёных водных растворов (рассолов), но в гораздо меньших количествах. Их состав в некоторых случаях приближается к солевым расплавам. Подобные включения могут также присутствовать и в других геологических обстановках: эвапориты, вскипающий флюид в субвулканических интрузиях, метаморфические карбонатсодержащие породы и т.д. За исключением более специфических характеристик, обсуждаемых ниже (в частности, адекватность между данными по включениям и метаморфическими *PT*-условиями), включения в гранулитах — это обычное явление, и они имеют ряд своих особенностей:

1. Что касается флюидных CO_2 -содержащих включений, то они могут иметь достаточно крупные размеры (от 30 до 50 мкм) и широко распространены. Это свидетельствует о том, что не было постметаморфической перекристаллизации (отжига) (рис. 2). И это так, поскольку любые перекристаллизация или отжиг, которые приводят к уничтожению всех типов включений (флюидных и минеральных), достаточно часто встречаются во многих гранулитах, и это даже имеет специальное название (гранулитовая структура в англоязычном написании). Но, как показывает опыт, при очень тщательных исследованиях пород всегда можно найти участки, где постметаморфическая перекристаллизация отсутствует. Такие участки в этом случае могут содержать гораздо большее количество относительно крупных включений, чем соседние водосодержащие гранитные породы.

2. Существуют различия и в том, что обычно наблюдается в других типах пород. При отжиге гранулитов включения не встречаются не только в кварце, но также и в ряде других минеральных фаз: в гранате, пироксене, полевых шпатах и других. Фактически кварц гранулитов в наибольшей степени подвержен процессу отжига, и включения в этом минерале либо отсутствуют, либо являются поздними и не имеют никакого отношения к гранулитовому метаморфизму. Несмотря на это, мелкие включения рассола были выявлены в «пластинчатом» кварце саксонских гранулитов, являющихся одним из самых ярких примеров отжига минералов.

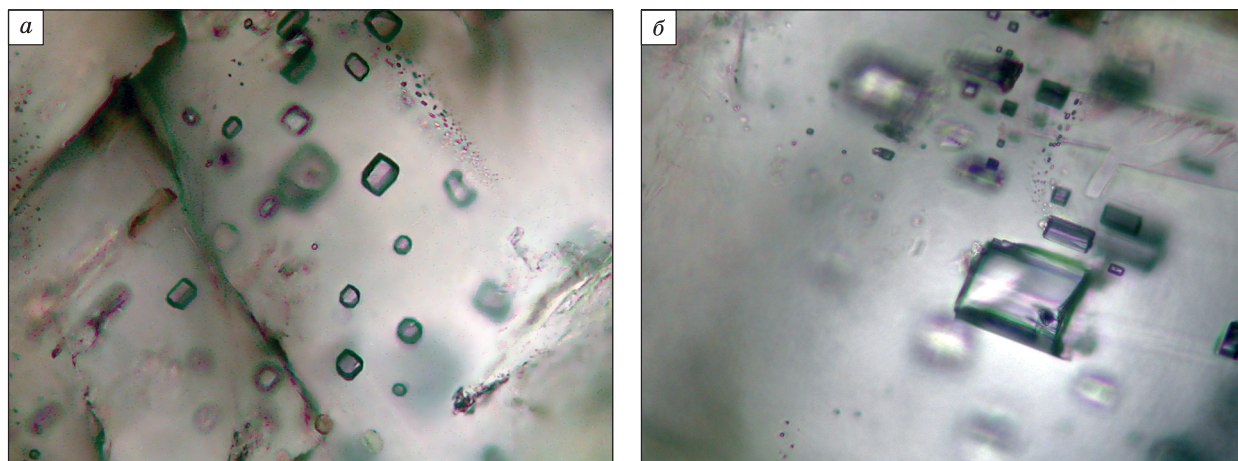


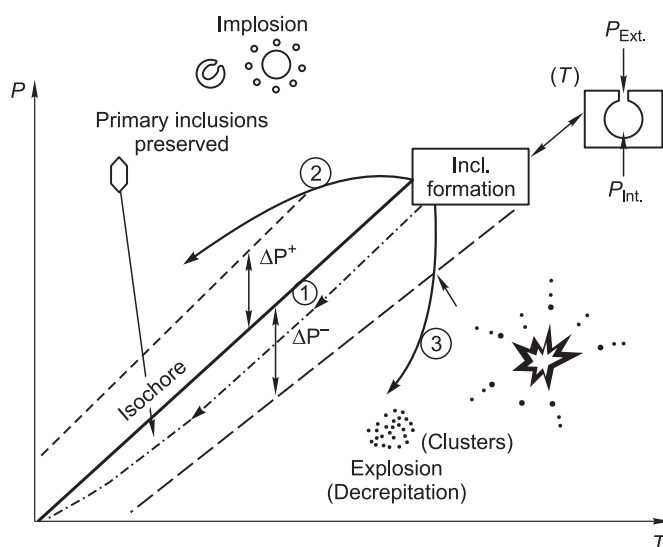
Рис. 2. CO_2 -флюидные включения в полевых шпатах из гранулитов Южной Индии (фотографии предоставлены М. Сантошем), размер включений — 30—40 мкм.

a — высокоплотные ($1.07\text{—}1.095 \text{ г/см}^3$) CO_2 -флюидные включения в плагиоклазе позднэархейских (2.4—2.7 млрд лет) гранатовых гранулитов, Салем, Кондалпатимедду [Santosh, Tsunogae, 2003].

b — CO_2 -флюидные включения умеренной плотности ($0.96\text{—}0.99 \text{ г/см}^3$) в пертитовом калишпате в позднем панафриканском (540 млн лет) УНТ-гранулите (зона сдвига Ачанковил, Пунналатупади). См. также фотографии в работах [Santosh, 1987; Shunsuke et al., 2006].

Рис. 3. Взаимоотношения между метаморфическим P T -путем подъема и изохорами включений.

1 — псевдоизохорный путь (включения сохраняются); 2 — изобарическое охлаждение (включения транспортируются посредством импозии, появляются «выжатые» включения); 3 — декомпрессия (включения транспортируются посредством эксплозии, включения декрепитируются) [Touret, 1981].



3. В целом низкосолёные водные флюиды и водно-углекислотные флюиды, наиболее обычные для среднекорковых жил и для пород вокруг гранитных батолитов, в гранулитах встречаются очень редко или отсутствуют. Яркими исключениями являются ретроградные гранулиты, которые могут содержать большое количество таких включений. Но тем не менее понятно, что эти включения имеют позднее происхождение и относятся к этапу образования поздних водосодержащих минеральных фаз.

Таким образом, на основе большого количества исследований, сделанных для большинства гранулитовых террейнов мира, мы можем построить достаточно четкую картину о доминирующих типах флюида, присутствующих в нижнекорковых породах, которые на данный момент встречаются на земной поверхности [Touret, 1987; Newton, 1989]:

В НТ- и УНТ-гранулитах (давление 5—10 кбар, т.е. глубина 15—30 км) флюидные CO_2 -включения сильно преобладают как по размерам, так и по распространенности. Включения рассолов также встречаются, но главным образом в метаосадочных протолитах (кварциты, бывшие эвапориты) [Touret, 1972]. Они значительно меньше по размерам, их очень трудно выявить, и они содержат малое количество жидкости при комнатной температуре. Газовый пузырек зажат между твердыми фазами, представленными в основном карбонатами и/или солями («сколлапсировавшие» или «выжатые» включения [Touret, Huizenga, 1999] (рис. 3). Очень важно отметить, что идентичные включения, содержащие главным образом чистую CO_2 , были выявлены в ультрабазитовых массивах и в мантийных ксенолитах, выносимых на поверхность щелочными базальтами [Roedder, 1965]. В НР-гранулитах и эклогитах ($P = 10—15$ кбар) количество CO_2 прогрессивно снижается вплоть до полного исчезновения в составе свободной флюидной фазы, поскольку карбонаты становятся более устойчивыми. Такой тренд особенно заметен в НР- и УНР-эклогитах, в которых CO_2 вытесняется N_2 , который становится доминирующей газовой фазой. Типичными флюидами являются карбонат- и/или хлоридсодержащие водные растворы, которые неоднократно выявлялись во всех минералах высоких давлений, включая алмаз [Izraeli et al., 2001]. Эти растворы могут прогрессивно обогащаться силикатами, преобразуясь в водные силикатные расплавы в некоторых эклогитах [Ferrando et al., 2005].

Находки таких включений позволили предложить другую модель формирования гранулитов. Региональная дегидратация вызвана не частичным плавлением, а появлением флюида с низкой активностью H_2O , который забирал воду из интерстиционной свободной флюидной фазы. Я был первым, кто применил термин «углеродный метаморфизм», который потом трансформировался в термин «углеродная волна» [Newton et al., 1980]. Оба термина не совсем правильно отражают процесс: CO_2 не является единственным флюидным компонентом, и даже если модель требует привлечения газотранспортных процессов, сегодня мы знаем, что расстояния были значительно короче того, что предполагает термин «волна». Я предпочитаю использовать термин «флюидная дегидратация» (или метаморфизм), чтобы соблюдать строгую параллель с бесфлюидной концепцией.

ПОЛЕМИКА ПО ПРОИСХОЖДЕНИЮ ГРАНУЛИТОВ

Если находка и присутствие флюидных включений в гранулитах достаточно быстро были восприняты геологическим сообществом, то идея о метаморфизме с участием флюидов на этом глубинном уровне была признана не сразу и породила многочисленные дебаты, которые продолжаются уже более 40 лет. В данной статье сделан только краткий обзор по дискутируемым моментам. Более полная информация содержится в серии [NATO ASI, 1985—1990] Критика, главным образом со стороны экспериментальных петрологов и специалистов по стабильным изотопам, сконцентрирована вокруг нескольких основных моментов.

Глубинные включения не могут сохраниться при подъеме на поверхность. На глубинах 30—50 км, характерных для гранулитового метаморфизма, давления достигают 10—20 кбар с магнитудой более чем несколько килобар, при которой большинство включений взрывается в процессе экспериментов [Наумов, Малинин, 1968]. Но эти эксперименты были сделаны с использованием водных включений в кварце, тогда как безводные включения, например флюидные CO_2 -включения в оливине ксенолитов из вулканитов, могут выдерживать давление более чем в 10 кбар, когда выносятся на поверхность магмой. Кроме того, идея о невозможности сохранности глубинных включений, достаточно широко распространенная среди неспециалистов по включениям (и даже среди некоторых специалистов!), игнорирует этот факт, не обращая внимания на второстепенность эффекта в изменении объема в минерале-хозяине и на то, что включение является изохорной системой (с постоянной плотностью), т.е. при любой температуре давление в нем — это не абсолютное давление флюида, а разница с внешним давлением и определяется постметаморфическим *PT*-путем подъема (см. рис. 3) [Touret, 1981]. Методика изучения флюидных включений, поддержанная многочисленными экспериментами, не позволяет детально отследить некоторые моменты: декрепитацию при сверхдавлении флюида, уменьшение объема газового пузыря при низком давлении флюида и сохранность включений, когда метаморфический *PT*-путь близкопараллелен изохоре флюида. В частности, такой сценарий реализуется для высокоплотных CO_2 -включений во многих гранулитах, а именно в НТ- и УНТ-типах [Touret, HuiZenga, 1999]. Напротив, водно-солевые включения, которые имеют более крутые изохоры, будут автоматически образовываться при очень низком давлении флюида либо исчезать, либо существовать только в виде очень мелких «выжатых» включений. Но в любом случае исчезнувший флюид оставляет неизгладимый след в породе, что четко фиксируется: по границам зерен натрового полевого шпата, окружающих большинство метаморфических фенокристов, по большому количеству мирмекитов, по метасоматическому замещению некоторых минералов натровым полевым шпатом (альбитизация) [Perchuk et al., 2000; Harlov et al., 2006]. Несмотря на то что все это игнорировалось в течение многих лет, эти особенности указывают на обширное воздействие флюидов, обогащенных щелочами, на межзерновое пространство в течение и после пика высокоградного метаморфизма [Перчук и др., 1994].

Включения захватываются после гранулитового метаморфизма (и независимо от этого). Некоторые исследователи утверждают, что все включения (даже флюидные CO_2) являются поздними и были захвачены после гранулитового пика метаморфических условий [Lamb et al., 1987]. В целом это так для большинства включений, которые переуравновесились в процессе постметаморфического подъема и встречаются в виде вторичных цепочек, на первый взгляд они вполне могут выглядеть как вторичные включения. Однако, если учитывать данные по некоторым образцам (в частности, НТ-гранулиты из Южной Финляндии, показывающие псевдоизохорный *PT*-путь ретроградного метаморфизма) и соответствующую методику исследований, то существование синметаморфических включений может быть доказано, не прибегая к каким-либо оправданным сомнениям [Touret, Hartel, 1990; Tsunogae et al., 2002]: присутствие первичных включений в метаморфических минералах, в частности в гранате, соответствие *PT*-данных по флюидным включениям и по минеральным равновесиям, и т.д. В участках, где отсутствует постметаморфическая перекристаллизация, количество флюида во включениях может оставаться очень высоким, иногда до нескольких весовых процентов в центре некоторых зерен граната из эндербитов Южной Индии [Touret, Hansteen, 1988]. Похожие результаты были недавно получены для пород других проявлений, большинство из них расположено в Южной Индии и Шри Ланке [Santosh, Tsunogae, 2003].

Данные по изотопии углерода свидетельствуют об отсутствии значительного взаимодействия флюид/расплав в процессе гранулитового метаморфизма. Большинство региональных гранулитовых террейнов, например провинция Гренвилл в Северной Америке или Южная Скандинавия, содержат многокилометровые зоны бывших известняков, иногда с графитом, которые обычно сохраняются в виде кальцит- или доломитсодержащих мраморов. Данные по стабильным изотопам углерода на границе карбонатных слоев указывают на то, что они до сих пор сохраняют черты осадочного углерода и практически не несут следов влияния окружающих пород [Valley et al., 1983]. В других случаях было показано, что отдельные зоны дегидратации могут появляться в краевых частях зон бывших осадочных карбонатов, но масштаб этих явлений не превышает нескольких дециметров [Knudsen, Lidwin, 1996]. Когда карбонаты трансформируются в гранат-пироксеновые скарны, как например в регионе Арендал (Южная Норвегия), можно увидеть, что включения не являются CO_2 -содержащими, а представлены солесодержащим водным раствором, фактически предполагая то, что изменение карбонатов в меньшей степени происходило за счет метаморфизма, а в большей степени за счет гидротермального морского изменения во время или немного позже седиментации. Эти данные четко указывают на то, что дометаморфические карбонаты не могли являться главным источником CO_2 -флюидов в гранулитах. Эта гипотеза была потом подтверждена данными по среднему мантийному составу для флюида включений [Hoefs, Touret, 1974], а также тем фактом, что флюидные CO_2 -включения широко распространены и вблизи синметаморфи-

ческих интрузивов мантийного происхождения, которые необходимы для обеспечения тепла, требуемого для НТ- и особенно для УНТ-гранулитов [Kelsey, 2008]. Бывшие осадочные карбонаты в большей степени нужны не столько как источник CO_2 , сколько для сохранения внешнего давления CO_2 флюида при высокоградном метаморфизме, поскольку это единственный путь стабилизировать неустойчивые минералы при экстремальных температурах гранулитового метаморфизма.

При высоких PT -параметрах проницаемость пород была слишком низкой для объяснения значительных перемещений флюида. Эксперименты, смоделированные для нижнекоровых условий, указывают на очень низкую проницаемость, что явно не сочетается с огромными перемещениями флюида через массы пород. Эти результаты не согласуются с наблюдениями по цепочкам вторичных включений, обильных в некоторых высокоградных метаморфитах, что фиксирует многократные эпизоды проникновения флюида через породы в широком интервале PT -условий. Вопрос, на который до сих пор не получен ответ и который требует более тщательных исследований при экспериментах, — это эволюция системы флюид—твердое тело при варьирующих P и T . В этом аспекте можно предположить, что оба флюида в гранулитах, а именно CO_2 и рассол, должны вести себя по-разному. Из-за большого угла смазываемости [Watson, Brenan, 1987], CO_2 достаточно легко захватывается в виде включений, постоянно эволюционируя в псевдвторичных и вторичных цепочках. Проницаемость пород существенно зависит от системы одновременных и микротрещин, которая не связана непосредственно с минералом-хозяином. С другой стороны, рассолы являются более мобильными в межзерновом пространстве. Они играют важную роль в кристаллизации и эволюции минералов. Следует упомянуть тот факт, что они достаточно легко перемещаются из-за более крутого наклона их изохоры. Это подразумевает, что они в большей степени важны для адаптации состава породообразующих минералов при изменении PT -условий. Тем не менее они очень редко сохраняются в виде включений.

Приток CO_2 должен приводить к появлению графита. Состав Ti-Fe-оксидов фиксирует, что по f_{O_2} -условиям большинство гранулитов находятся в поле стабильности графита. И, как следствие, огромный привнос внешнего CO_2 должен приводить к отложению огромного количества графита [Lamb, Valley, 1984]. Такой механизм, несомненно, работает в некоторых случаях и объясняет появление крупных отложений графита на Шри-Ланке и Мадагаскаре [Katz, 1987]. Но в нашем случае это вещь исключительная: в целом, не было обнаружено следов графита в гранулитах ни в самих породах, ни во флюидных CO_2 -включениях. Фактически, большинство гранулитов кристаллизовалось в более окисленных условиях [Harlov et al., 1997], предполагая, что во многих случаях ассоциация Ti-Fe-минералов отражает более позднее переуравновешивание. Кроме того, мы склонны полагать, что кривые f_{O_2} / T стабильности для графита и Fe-Ti-оксидов могут пересекаться в интервале давлений для гранулитов при температуре около 600 °C [Lamb, Valley, 1984]. Если даже CO_2 привносится в систему при высоких температурах, то это будет уже за пределами поля стабильности графита. CO_2 , однажды захваченная в виде включений, будет сохраняться за счет контроля со стороны оксидных минералов и в дальнейшем будет устойчивой фазой при более низких температурах, поскольку хорошо известны определенные трудности для нуклеации графита.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ АРГУМЕНТЫ В ПОДДЕРЖКУ ДЕГИДРАТАЦИИ ПРИ УЧАСТИИ ФЛЮИДА

Обсуждение (краткое!) всех аргументов, которые высказаны против модели с участием флюида, конечно же, выявляет некоторые недостатки этой модели для происхождения гранулитов. Но в целом финальная цель этой дискуссии незначительна: модель с участием флюида поддерживается большим количеством фактов, некоторые из них очень существенны, поскольку могут быть обнаружены практически во всех гранулитовых террейнах.

Изограды проградного гранулитового метаморфизма определено не зависят от температуры. Из-за мультивариантного характера большинства метаморфических реакций нелегко определить точную позицию различных изоград в поле. Более того, такое систематическое изучение — это огромный труд, особенно когда (и как правило!) региональная структура имеет очень сложное строение. В этом отношении несколько регионов изучено достаточно хорошо, в частности Южная Норвегия, которая используется как полигон для обучения студентов из университетов Голландии (в частности Утрехт), Дании и Великобритании. Обобщение по региональным PT -оценкам минеральных равновесий, основанное на сотнях анализов, приведено на рис. 4 [Nijland, Maijer, 1993]. Ясно, что региональные метаморфические изограды, например изограды пироксена, которые определяют границы гранулитовых доменов, точно не соответствуют изотермам. В качестве альтернативы, изолированные «острова» гранулитов достаточно четко фиксируются за пределами гранулитового ядра, которые, по данным изучения включений, относятся к локальному этапу воздействия посредством высокосолёных растворов-рассолов [Nijland et al., 1998]. Такое локальное повышение степени метаморфизма, которое в меньшей степени связано с температурой и в большей степени с воздействием флюидов, вероятно, не является широко распространенным явлением.

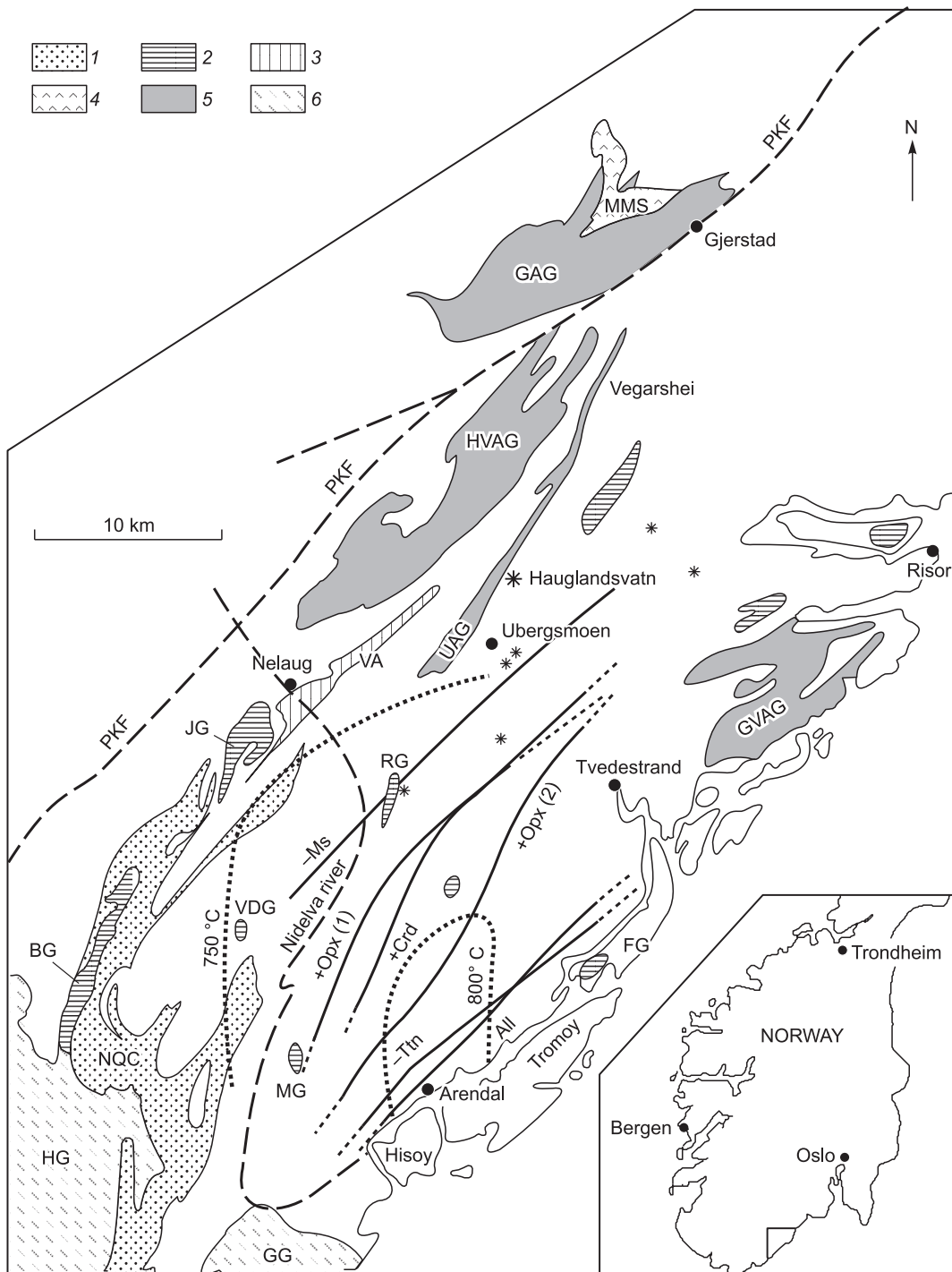


Рис. 4. Региональные изограды для провинции Бамбл, Южная Норвегия [Nijland, Maijer, 1993].

1 — кварциты комплекса Ниделва; 2 — метагаббро; 3 — К-амфиболиты; 4 — монзониты; 5 — чарнокит-гранитные гнейсы; 6 — посттектонические граниты. Жирная линия — метаморфические изограды с отметкой для критических минералов: (+) — появление; (-) — исчезновение (Ms — первичный мусковит; Орх(1) — ортопироксен в метабазах; Орх(2) — ортопироксен в метапелитах; Crd — кордиерит; Ttn — титанит). Пунктирная линия — изотермы (750 и 800 °C). Звездочки — гранулитовые «острова» за пределами главного ядра, расположенного в море. Они образовались за счет локального воздействия солевых флюидов [Nijland et al., 1998].

Наиболее важные региональные единицы: GAG, HVAG, UAG, GVAG — гнейсы Gjerstad, Hovdefjell-Vegarshei, Ubergsmoen, Gjeving, соответственно; HG, GG — граниты Herefoss и Grimstad; PKF — линейный разлом Porsgrunn—Kristiansand, разделяющий провинции Бамбл и Телемарк («Great Breccia» — по [Ramberg, Smithson, 1975; Oftedahl, 1980]).

Не все гранулиты — реститы. Как было уже отмечено для метакарбонатных пород, большинство региональных гранулитов содержит остатки дометаморфических раннекорковых пород, которые до сих пор ясно различимы, несмотря на метаморфизм. Для некоторых типов пород, в частности для кварцосодержащих, допускается, что они могли не подвергаться частичному плавлению из-за несоответствия состава. И даже в случае Южной Норвегии, мы находим образцы метаграувакков, являющихся идеальными породами для выплавления гранитов. Они достаточно хорошо сохранились и даже несут следы дометаморфических структур (конгломераты, поперечная или разноразмерная слоистость и т.д.) [Touret, 1974]. Частичное плавление также присутствует, но оно захватывает не более 10—20 об.% породы. Изучение включений продемонстрировало, что флюидная фаза в расплавленной части породы имеет существенно углеродный состав (CO_2 + более восстановленные газы, в частности метан), и образовалась за счет реакции воды и дометаморфического графита [Touret, Dietvorst, 1983]. Иными словами, частичное плавление присутствует, но в очень ограниченных объемах. Это один из путей образования свободных флюидов с низкой фугитивностью воды: либо за счет растворения воды в гранитном расплаве, либо за счет реакции между водой и органическим графитом, особенно в метапелитах. Таким образом, бесфлюидная и флюидная модели скорее дополняют друг друга, чем взаимно исключают, и обе играют существенную роль при контроле флюидного режима в нижней коре.

Солевые флюиды оставляют большое количество следов в минеральных ассоциациях гранулитов, даже если они практически не сохранились во включениях. Обсуждая экспериментальные данные, которые позволили Н.Л. Боуэну сформулировать концепцию серий магматических реакций, некоторые петрологи все-таки полагали, что некоторые плутонические породы, в частности граниты, не являются результатом кристаллизации из жидкой магмы, а произошли за счет твердофазной диффузии ионов и атомов в структуре минералов. Эти контрастирующие точки зрения привели к знаменитому противостоянию между «магматистами» и «твердофазниками», которое являлось одним из главных разногласий в науках о Земле в течение первой половины двадцатого столетия. Эти баталии сейчас полностью закончились с убедительной и полной победой первой группы ученых: сейчас уже никто не отвергает магматическое происхождение гранитов (смотри обзор в [Touret, Nijland, 2002]). Но все-таки не стоит отвергать тот факт, что следы метасоматоза могут присутствовать во многих гранитных породах, в частности, растворение минералов (полевой шпат в грейзенах, кварц в «эписенитах»), материнские породы на многих месторождениях урана [Leroo, 1984] или замещение минералов (альбитизация). И этот метасоматоз не является «сухим», способствующим спонтанной диффузии атомов или ионов в решетке минералов. Сейчас мы знаем, что этот процесс связан с воздействием межзернового флюида, который отделяется от магмы в процессе ее кристаллизации. Подобные признаки широко распространены в гранулитах, фактически значительно шире, чем в гранитных породах. Л.П. Перчук и его группа в Москве были первыми, кто обнаружил калишпатовые микрожилки на границе между кварцем и полевым шпатом в некоторых гранулитах России [Perchuk, Gerya, 1993]. Позднее подобная ассоциация была также обнаружена и вокруг других минералов гранулитов из разных проявлений мира [Frantz, Harlov, 1998; Harlov et al., 1998; Harlov, Förster, 2002]. Интересно отметить, что существованию этих межзерновых ассоциаций не

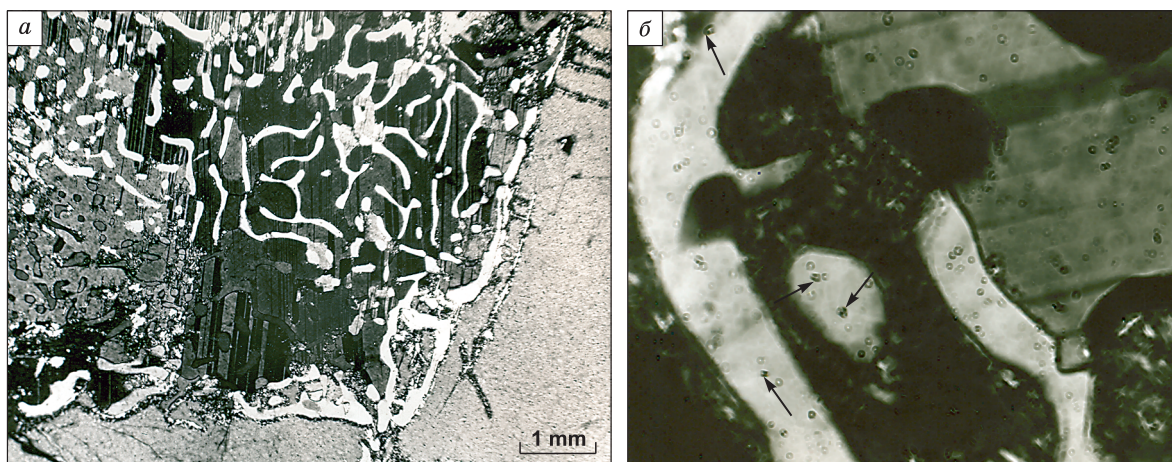


Рис. 5. «Гигантский» мирмекит на контакте между кварцем и кордиеритом в кварц-кордиерит-антофиллитовой породе, Акланд бай Зонделед, провинция Бамбл (Южная Норвегия).

a — общий вид мирмекита (кордиерит справа).

б — детали для кварц-плагиоклазовой ассоциации, стрелки — солевые включения (жидкая H_2O + газообразная H_2O + кристаллы галита, размер включений ≈ 15 мкм).

придавалось ранее большого значения до тех пор, пока исследования по флюидным включениям не обосновали возможность появления межзернового флюида на таких глубинах.

Другим доказательством проявления метасоматоза являются мирмекиты, червеобразные выделения кварца в плагиоклазе, которые обычно встречаются около или по краям крупных зерен калишпата. Большое количество гипотез было выдвинуто для объяснения этих необычных структур. Наиболее общепринятая гипотеза — это замещение полевошпатовой ассоциации под воздействием Na-Ca-обогащенных водных флюидов. Мирмекиты — достаточно обычное явление в гранитах в особенности тогда, когда деформация способствовала притоку внешних флюидов. Но в некоторых гранулитах это явление имеет более широкий размах, и даже может иметь «гигантский» масштаб (например пояс Лимпопо, Южная Африка [Touret, Huizenga, 1999]). Наиболее типичным примером является образец из провинции Бамбл, Южная Норвегия (рис. 5). Мирмекиты не располагаются по краям зерен калишпата, поскольку этот минерал, по-видимому, полностью отсутствует в породе, которая содержит только крупные кристаллы кварца, кордиерита и антофиллита (протолит — гидротермально измененные подводные базальтовые лавы). Крупные мирмекиты встречаются на контакте между кварцем и кордиеритом (см. рис. 5, а). В некоторых округлых зернах кварца четко видны мелкие солевые включения, которые, вероятно, являются реликтами гидротермальных флюидов (см. рис. 5, б). Очень сомнительно, что в данном случае кварц-плагиоклазовая ассоциация мирмекитов образовалась за счет калишпата.

ФЛЮИДЫ ГРАНУЛИТОВ, КАКОВ ИХ ОБЪЕМ?

Исходя из вышеприведенных аргументов, можно с уверенностью предположить, что какое-то количество безводной (CO₂ или рассол) свободной флюидной фазы действительно существовало на пике гранулитового метаморфизма, хотя собственно флюидные включения не дают достоверной информации об общем количестве вовлеченного флюида. Единственный косвенный признак — это значительное количество CO₂, которое до сих пор сохранилось в ядрах некоторых минералов, как в чарнокитах и эндербитах Индии (см. ниже), но даже эти данные не дают четкой информации о свободном флюиде на глубине. Следует также отметить (в особенности для рассолов), что общее количество свободного флюида не должно быть очень большим. Из-за своей высокой мобильности и способности просачиваться между зернами минералов, небольшое соотношение флюид/порода может предполагаться для всех выявленных процессов, особенно для гидратации биотита и для широко распространенного окисления [Newton, Manning, 2006].

Однако ряд полевых наблюдений, выявленных на краях гранулитовых доменов, свидетельствуют о признаках того, что флюиды могли покидать или внедряться в гранулитовое ядро. Видимо, количество флюида на пике метаморфизма значительно больше того, что образуется на месте. Когда нижнекоровый сегмент подвергся метаморфизму, температура в его основании достигла или даже превысила 1000 °С, т.е. он функционировал как огромный флюидный резервуар, способный производить и сохранять флюиды, типичные для гранулитов, в первую очередь, высокоплотную CO₂, а также рассолы [Touret, 1992]. Интересно отметить, что большинство таких полевых наблюдений долгое время оставались незамеченными и необъясненными, даже если эти объекты детально изучались опытными петрологами. Они только выявили те моменты, которые можно было легко объяснить: перемещения флюида могли играть большую роль в течение и после формирования минеральных ассоциаций гранулитов. Два из этих моментов заслуживают детального рассмотрения.

Зоны дегидратации с участием флюида (зарождающиеся чарнокиты). С.С. Пишамуту [Pichamuthu, 1961] опубликовал данные о локальной трансформации биотит-амфиболовых гнейсов в чарнокиты, штат Мусор (Южная Индия). К сожалению, его наблюдения не вызвали значительного интереса до 1980-х годов, когда было выявлено, что некоторые из этих «зарождающихся» чарнокитов, образующие в большинстве случаев локальные участки неправильной формы дециметрового или метрового размера (рис. 6), возможно, не зависят от состава протолита (от метавулканитов до осадочных метапелитов), и могут иногда встречаться вдоль системы ориентированных разломов и трещин, предполагая флюидную проработку. Эти зарождающиеся чарнокиты были найдены во многих местах в Южной Индии и Шри-Ланке, а также совсем недавно — в Норвегии [Knudsen, Lidwin, 1996] и Швеции [Harlov et al., 2006]. Детальные исследования Л. Перчука с соавторами [Perchuk et al., 2000] показали, что гнейсы могут метасоматически замещаться под воздействием рассолов при минимальных параметрах плавления постметасоматического состава. Следовательно, магматические чарнокиты могут образовываться на месте, не выявляя каких-либо признаков присутствия реститового материала на краях зон плавления. CO₂ присутствует во включениях во второстепенных количествах и, по-видимому, этот компонент не играл значительной роли в процессах трансформации. Скорее всего, этот флюидный компонент имел другой источник (близлежащее гранулитовое ядро) или образовался за счет распада карбонатных минералов, которые изначально кристаллизовались из рассолов.

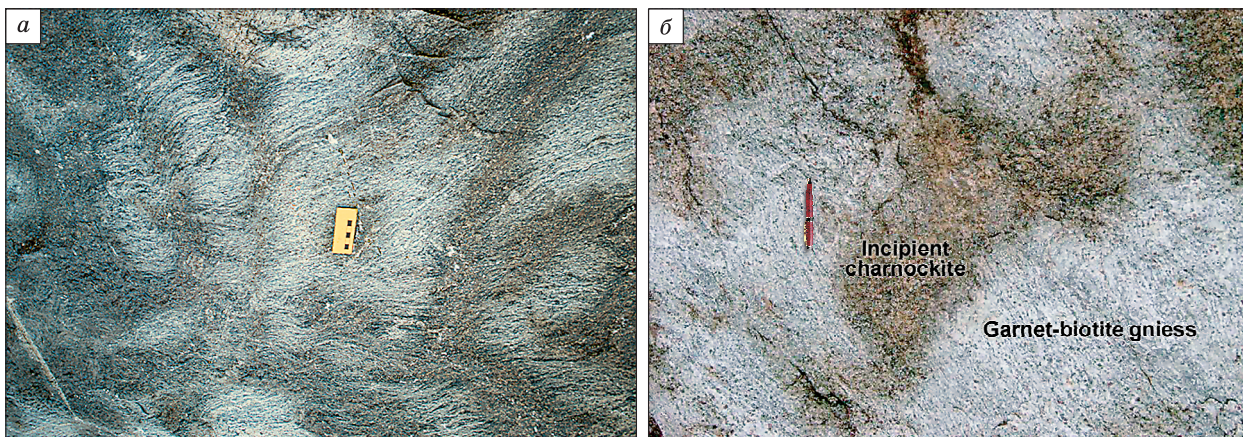


Рис. 6. «Зарождающийся» чарнокит в гранатсодержащем метапелите, Курунегала (Шри Ланка).

a — темные слои чарнокитов, пересекающие слоистость гнейса (светло-серое), фотография А. Кронера. Контакт не интрузивный, а является результатом трансформации и непосредственного плавления гнейса под влиянием внешних флюидов.
б — детали контакта, фотография М. Сантоша.

Карбонатсодержащие мегасдвиговые зоны. Ряд средне- и высокометаморфических областей, а именно в Китае, Индии и Норвегии [Dahlgren et al., 1993; Newton, Manning, 2002], содержат зоны сдвига регионального размера (обычно более 100 км при ширине в 10 км), в которых до 20 об.% вмещающих пород замещено массивными карбонатами (кальцит и/или доломит). Замещение карбонатами происходит при 500—700 °С и давлении в несколько килобар, а однотипный изотопный состав углерода четко указывает на исходное мантийное происхождение [Dahlgren et al., 1993]. Источник карбонатов — это концентрированные хлоридно-карбонатные растворы (или водносолевые магмы), образовавшиеся за счет несмешиваемости флюидов на поздних стадиях щелочного мантийного магматизма. Этот тип магматизма, синхронный с гранулитовым метаморфизмом, широко распространен в гранулитовых террейнах, особенно в тех, которые относятся к НТ- и УНТ-типам. Породы, образовавшиеся таким путем, появляются после метаморфической перекристаллизации в виде дупироксеновых гранулитов, которые становятся все более и более распространенными на более глубоких горизонтах [Bohlen, Mezger, 1989]. Следовательно, мы имеем существенные различия между гранулитами, обнажившимися на поверхности во многих регионах и представленных в основном бывшими коровыми породами, и гранулитами, встречающимися в виде ксенолитов в вулканитах и имеющие исключительно магматическое происхождение.

Присутствие синметаморфических интрузий также необходимо привлекать для объяснения экстремальных температур на умеренных глубинах (30—50 км) при УНТ-метаморфизме [Kelsey, 2008]. Таким образом, мы приходим к гипотезе, что континентальная кора приобретает свою структуру в течение основных этапов гранулитового метаморфизма за счет четкого распределения флюида в вертикальной колонне [Touret, 1987]: H_2O является резко доминирующей фазой вблизи поверхности вплоть до достижения «водного барьера», созданного гранитными мигматитами. Растворенная в расплаве и/или связанная в минералах (в частности в слюдах и амфиболе), она будет исчезать из интерстиционной свободной флюидной фазы. И в это же самое время она будет замещаться флюидами с низкой фугитивностью, CO_2 и концентрированными водными растворами (рассолами), которые на пике метаморфизма могут сохраняться в породах вплоть до очень больших глубин, что позднее фиксируется на земной поверхности. Эти флюиды поднимаются вверх посредством синметаморфических интрузивов, которые способствуют утолщению коры за счет внедрения магмы и силлоподобных интрузий в основание коры. Эти интрузии играют очень большую роль в инициации гранулитового метаморфизма, в частности для НТ- и УНТ-типов. Они не только ответственны за создание экстремального термального градиента, но и также обеспечивают флюидами, сопровождающими ассоциации гранулитовой фации и локальный анатексис вмещающих пород. Флюиды транспортируются из мантии не как диффузионная «волна», а как компоненты, растворенные в щелочных расплавах основного—среднего состава. Далее они отделяются от расплава на первых стадиях кристаллизации, что сопоставимо с взаимоотношениями между карбонатными и ультраосновными расплавами на большой глубине. Недавние наблюдения [Webster et al., 1999] показали, что хлор является высокорастворимым компонентом в водонасыщенных основных магмах при повышенных P и T , так что он может способствовать ранней дегазации в процессе подъема, выделяясь в виде концентрированных рассолов (Р.С. Ньютон, устное сообщение). Происхождение CO_2 , которая как и рассолы в значительной части образовалась в мантии, более проблематично. Она либо также была растворена в расплаве, образуясь на нижнекоровом уровне за счет разложения карбонатов, как это было выяв-

лено в некоторых ксенолитах из вулканитов [Frezzotti et al., 2002], либо она выделялась за счет последующей несмесимости из хлоридно-карбонатных растворов [Newton, Manning, 2002].

По существу эта модель не сильно отличается от той, что была предложена в начале 1970-х годов, как только были выявлены первые включения в гранулитах [Touret, 1974]. Но в то время только CO₂ рассматривалась как главный флюид. Как это было блестяще предсказано Д.С. Коржинским в начале 1960-х годов, более поздние исследования как полевые [Perchuk, Gerya, 1993; Harlov et al., 1998], так и экспериментальные (в частности, недавняя работа Р.С. Ньютона и К. Маннинга [Newton, Manning, 2006]), выявили значимую роль рассолов на больших глубинах. В нижней коре, а также на глубинах мантийного уровня, циркулирующие рассолы ответственны за широкомасштабные метасоматические явления, которые дополняли и/или инициировали процессы более свободного плавления (как это указывается в литературе), предполагая не один, а множество путей дифференциации пород на глубине.

ГРАНУЛИТЫ И ЭВОЛЮЦИЯ КОРЫ: ФАКТОР ВРЕМЕНИ

Рассматривая всю историю Земли, некоторые гранулиты приурочены к коллизионным орогенам. Например, для варисцийского времени в Средней Европе углеродсодержащие гранулиты слагают основание современной коры, доставляемой сейчас на поверхность посредством современных вулканов, в частности массив Централ (Франция) (см. рис. 1, б). В фанерозойское время гранулиты, встречающиеся на поверхности (400 млн лет, GLA эклогиты/гранулиты, Варисцийский ороген, см. рис. 1, б), относятся к HP-типу, формируясь в течение компрессионной стадии при начальной коллизии континента. С другой стороны, нижнекоровые гранулиты на 100 млн лет моложе и образовались в течение релаксации при растяжении, которая происходила, когда коллизионный эпизод подходил к концу. Следовательно, гранулиты формируют обычную часть любого орогена, в период широкомасштабной периодической эволюции, включающей сначала HP-, а затем HT-метаморфические типы. Возможно, в докембрийское время картина была принципиально другой, поскольку большинство гранулитов этого возраста представлены UT- или УНТ-типами [Kelsey, 2008]. Некоторые из них выявляют антипериодичную *PT* метаморфическую эволюцию [Harley, 1989], которую трудно согласовать с широкомасштабной компрессией на начальных этапах метаморфической эволюции. Кроме того, давно было известно, что гранулиты преимущественно образовывались в строго определенных интервалах времени: Панафриканский ороген — около 500 млн лет, провинция Гренвилл — на 500 млн лет древнее и т.д. Совместно с другими метаморфическими типами, распределение по возрасту для гранулитов было недавно детализировано М. Брауном [Brown, 2007]. Он показал, что УНТ-гранулиты в целом характерны для четырех периодов, каждый из которых соответствует формированию «суперконтинента» или, для архейского времени, «суперкратона»: 500 млн лет (Гондвана), 1000 млн лет (Родиния), 1900 млн лет (Нуна/Колумбия), 2600 млн лет (Валбара, Суперия и Склавия) (все данные ±100 млн лет). Возраст различных метаморфических этапов относительно закономерно расширяется на весь период существования суперконтинента, в некоторых случаях (в частности для Родинии) это относительно близко к периоду становления суперконтинента, в других случаях — непосредственно перед его раскалыванием. Большая работа была недавно проделана по этой проблеме [Santosh, Ohmori, 2008a], причем некоторые исследователи видят перспективы исследований по глубинному переносу флюида в связи с теорией о постоянно расширяющихся оболочках [Santosh, Omori, 2008b]. Таким образом, после стольких лет исследований гранулиты продолжают оставаться притягательными и загадочными породами, которые до сих пор не раскрыли все свои секреты.

Данная статья основана на тысячах наблюдений по флюидным включениям, сделанным в Нанси, Париже и Амстердаме на протяжении более 30 лет, не только мною, а, по большей части, всеми моими студентами, многие из которых стали моими коллегами. В начале 1970-х годов я получил возможность и честь познакомиться с академиком В.С. Соболевым, которой совместно с профессором Ю.А. Долговым помог мне освоить азы необъятных исследований по включениям в минералах. Такие работы долгое время игнорировались на Западе, но постоянно проводились в бывшем Советском Союзе. Автор крайне признателен Р.С. Ньютонову за критические замечания ранних версий статьи, а также рецензентам, И.П. Солововой (ИГЕМ, Москва) и В.В. Шарыгину (ИГМ, Новосибирск). Автор также благодарен Д. Джонстону (Горная школа, Париж) за финальную «полировку» английского варианта статьи.

ЛИТЕРАТУРА

- Наумов В.Б., Малинин С.Д.** Новый метод определения давления по газовой-жидким включениям // Геохимия, 1968, № 4, с. 432—441.
- Перчук Л.Л., Геря Т.В., Корсман К.** Модель чарнокитизации гнейсовых комплексов // Петрология, 1994, т. 2, с. 451—479.
- Belousov V.V.** Modern concepts of the structure and development of the Earth's crust and the upper mantle of continents // Q. J. Geol. Soc. Lond., 1966, v. 122, p. 293—314.

- Bohlen S.R., Mezger K.** Origin of granulite terrains and the formation of the lowermost continental crust // *Science*, 1989, v. 244 (4902), p. 326—329.
- Brown M.** Metamorphism, plate tectonics and the supercontinent cycle // *Earth Science Frontiers*, 2007, v. 14, p. 1—18.
- Dahlgren S., Bogoch R., Magaritz M., Michard A.** Hydrothermal dolomite marbles associated to charnockitic magmatism in the Proterozoic Bamble Shear Belt, south Norway // *Contr. Miner. Petrol.*, 1993, v. 113, p. 394—408.
- Ferrando S., Frezzotti M.L., Dallai L.** Compagnoni R. Multiphase solid inclusions in UHP rocks (Su-Lu, China): remnants of supercritical silicate-rich aqueous fluids released during continental subduction // *Chem. Geol.*, 2005, v. 223, № 1—3, p. 68—81.
- Franz L., Harlov D.E.** High-grade K-feldspar veining in granulites from the Inrea-Verbano zone, Northern Italy: fluid flow in the lower crust and implications for granulite facies genesis // *J. Geol.*, 1998, v. 106, p. 455—472.
- Frezzotti M.L., Touret J.L.R., Neumann E.R.** Ephemeral carbonate melts in the upper mantle: carbonate-silicate immiscibility in microveins and inclusions within spinel peridotite xenoliths, La Gomera, Canary Islands // *Eur. J. Miner.*, 2002, v. 14, № 5, p. 891—904.
- Harley S.** The origin of granulites: a metamorphic perspective // *Geol. Mag.*, 1989, v. 126, p. 215—247.
- Harlov D.E., Förster H.J.** High-grade fluid metasomatism on both a local and a regional scale: the Seward Peninsula, Alaska, and the Val Strona di Omegna, Ivrea-Verbano Zone, Northern Italy. Part 1: Petrography and silicate mineral chemistry // *J. Petrol.*, 2002, v. 43, № 5, p. 769—799.
- Harlov D.E., Newton R.C., Hansen E.C., Janardhan A.S.** Oxide and sulfide minerals in highly oxidized, Rb-depleted Archean granulites of the Shevaroy Hills Massif, Southern India: oxidation states and the role of metamorphic fluids // *J. Metam. Geol.*, 1997, v. 15, p. 707—717.
- Harlov D.E., Hansen E.C., Bigler C.** Petrologic evidence for K-feldspar metasomatism in granulite facies rocks // *Chem. Geol.*, 1998, v. 151, № 1—4, p. 373—386.
- Harlov D.E., Johansson L., van den Kerkhof A.M., Förster H.J.** The role of advective fluid flow and diffusion during localized, solid-state dehydration: Söndrum Stenhyggeriet, Halmstad, SW Sweden // *J. Petrol.*, 2006, v. 47, № 1, p. 3—33.
- Hoefs J., Touret J.L.R.** Fluid inclusion, and carbon isotope study from Bamble granulites (South Norway) // *Contr. Miner. Petrol.*, 1974, v. 52, p. 165—174.
- Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O.** Brine inclusions in diamonds: a new upper mantle fluid // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 187, № 3—4, p. 323—332.
- Katz M.B.** Graphite deposits of Sri-Lanka: a consequence of granulite facies metamorphism // *Miner. Deposita*, 1987, v. 22, p. 18—25.
- Kelsey D.E.** On ultrahigh-temperature crustal metamorphism // *Gondwana Res.*, 2008, v. 13, p. 1—29.
- Knudsen T.L., Lidwin A.** Magmatic CO₂, brine and nitrogen inclusions in Sveconorwegian dehydration vein and a gabbro from the Bamble sector, southern Norway // *Eur. J. Miner.*, 1996, v. 8, p. 1041—1063.
- Lamb W., Valley J.W.** Metamorphism of reduced granulites in low-CO₂ vapor-free environment // *Nature*, 1984, v. 312, p. 56—58.
- Lamb W.M., Valley J.W., Brown P.E.** Post-metamorphic CO₂-rich inclusions in granulites // *Contr. Miner. Petrol.*, 1987, v. 96, p. 485—494.
- Leroy J.** Episyenitisation dans le gisement d'uranium de Bernardan (Marche) // *Miner. Deposita*, 1984, v. 19-1, p. 26—35.
- NATO ASI Series** // 1985, v. C-158; 1987, v. C-218; 1989, v. C-281; 1990, v. C-311.
- Newton R.C.** Fluids in metamorphism // *An. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1989, v. 17, p. 385—410.
- Newton R.C., Manning C.E.** Experimental determination of calcite solubility in NaCl-H₂O solutions at deep crust/upper mantle pressures and temperatures: implications for metasomatic processes in shear zones // *Amer. Miner.*, 2002, v. 87, p. 1401—1409.
- Newton R.C., Manning C.E.** Solubilities of corundum, wollastonite and quartz in H₂O-NaCl solutions at 800 °C and 10 kbar: interaction of simple minerals with brines at high pressure and temperature // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2006, v. 70, p. 5571—5582.
- Newton R.C., Smith J.V., Windley B.F.** Carbonic metamorphism, granulites and crustal growth // *Nature*, 1980, v. 288, p. 45—50.
- Nijland T.G., Maijer C.** The regional amphibolite to granulite facies transition at Arendal, Norway: evidence for a thermal dome // *N. Jb. Miner. Abh.*, 1993, v. 165, p. 191—221.
- Nijland T., Touret J.L.R., Visser D.** Anomalously low temperature orthopyroxene, spinel and sapphirine occurrences in metasediments from the Bamble amphibolite-to-granulite facies transition zone (South Norway): possible evidence for localized action of saline fluids // *J. Geol.*, 1998, v. 106, p. 575—590.

- Oftedahl C.** Geology of Norway // Norges Geologisk Undersökelse, 1980, v. 208, 370 p.
- Perchuk L.L., Gerya T.V.** Fluid control of charnockitisation // Chem. Geol., 1993, v. 108, p. 175—186.
- Perchuk L.L., Safonov O.G., Gerya T.V., Fu B., Harlov D.E.** Mobility of components in metasomatic transformation and partial melting of gneisses: an example from Sri Lanka // Contr. Miner. Petrol., 2000, v. 14, p. 212—232.
- Pichamutu C.S.** Transformation of peninsular gneisses into charnockites in Mysore state, India // J. Geol. Soc. India, 1961, v. 2, p. 46—49.
- Ramberg I.B., Smithson S.B.** Geophysical interpretation of crustal structure along the Southeastern coast of Norway and Skagerrak // Geol. Soc. Amer. Bull., 1975, v. 86-6, p. 769—774.
- Roedder E.** Liquid CO₂ inclusions in olivine-bearing nodules and phenocrysts from basalts // Amer. Miner., 1965, v. 50, p. 1746—1782.
- Santosh M.** Cordierite gneisses of southern Kerala, India: petrology, fluid inclusions and implications for crustal uplift history // Contr. Miner. Petrol., 1987, v. 96, № 3, p. 343—356.
- Santosh M., Tsunogae T. J.** Extremely high density pure CO₂ fluid inclusions in a garnet granulite from southern India // J. Geol., 2003, v. 111, p. 1—16.
- Santosh M., Omori S.** CO₂ flushing: a plate tectonic perspective // Gondwana Res., 2008a, v. 13, p. 86—102.
- Santosh M., Omori S.** CO₂ windows from mantle to atmosphere: models on ultrahigh-temperature metamorphism and speculations on the link with melting of snowball Earth // Gondwana Res., 2008b, v. 14.
- Shunsuke I., Tsunogae T., Santosh M.** Ultrahigh-temperature metamorphism in the Achankovil Zone: implications for the correlation of crustal blocks in southern India // Gondwana Res., 2006, v. 10, № 1—2, p. 99—114.
- Suess E.** Das Antlitz der Erde. 4 vol., F. Tempsky, Wien und G. Freytag, Leipzig, 1883—1909.
- Thompson A.B.** Fluid-absent metamorphism // J. Geol. Soc. London, 1983, v. 140 (4), p. 533—547.
- Touret J. L.R.** Le faciès granulite, métamorphisme en milieu carbonique // C. R. Acad. Sci. Paris, Sér. D, 1970, v. 271, p. 2228—2229.
- Touret J.L.R.** Le faciès granulite en Norvège Méridionale. I: Les associations minéralogiques, II: Les inclusions fluides // Lithos, 1971, v. 4, p. 239—249; p. 423—436.
- Touret J. L.R.** Le faciès granulite en Norvège méridionale et les inclusions fluides. Paragneiss et quartzites // Sci. Terre (Nancy), 1972, v. 17 (1—2), p. 179—193.
- Touret J.L.R.** Faciès granulite et fluides carboniques / Eds. P. Bellière and J.C. Duchesne. Géologie des domaines cristallins // Soc. Géol. Belgique, 1974, P. Michot volume, p. 267—287.
- Touret J.L.R.** Fluids in metamorphic rocks // Chapter 8 in Short Course in Fluid Inclusions: Application to Petrology // Miner. Assoc. Canada, 1981, v. 6 (Calgary), p. 182—208.
- Touret J.L.R.** Fluid distribution in the continental lithosphere // Proterozoic lithospheric evolution, Amer. Geoph. Union, 1987, p. 27—33.
- Touret J.L.R.** CO₂ transfer between the upper mantle and the atmosphere: temporary storage in the lower continental crust // Terra Nova, 1992, v. 4, p. 87—98.
- Touret J.L.R., Dietvorst P.** Fluid inclusions in high grade anatectic metamorphites // J. Geol. Soc. London, 1983, v. 140, p. 635—649.
- Touret J.L.R., Hansteen T.** Geothermometry and fluid inclusions in a rock from the Doddabetta charnockite complex, Southwest India // Rendiconti Soc. It. Miner. Petrol., 1988, v. 43, p. 65—82.
- Touret J.L.R., Huizenga J.M.** Intraplate magmatism at depth: high-temperature lower crustal granulites // J. African Earth Sci., 1999, v. 27-2, p. 376—382.
- Tsunogae T., Santosh M., Osanai Y., Owada M., Toyoshima T., Hokada T.** Very high-density carbonic fluid inclusions in sapphirine-bearing granulites from Tonagh Island in the Archean Napier Complex, East Antarctica: implications for CO₂ infiltration during ultrahigh-temperature ($T > 1100$ °C) metamorphism // Contr. Miner. Petrol., 2002, v. 143 (3), p. 279—299.
- Valley J.W., McLelland J., Essene E.J., Lamb W.** Metamorphism of reduced granulites in low-CO₂ vapour free environment // Nature, 1983, v. 301, p. 226—228.
- Watson E.B., Brenan J.M.** Fluids in the lithosphere 1. Experimentally determined wetting characteristics of CO₂-H₂O fluids and their implication for fluid transport, host-rock physical properties and fluid inclusion formation // Earth Planet. Sci. Lett., 1987, v. 85, p. 497—515.
- Webster J.D., Kintzler R.J., Mathez E.D.** Chloride and water solubility in basalts and andesite liquids and implications for magmatic degassing // Geochim. Cosmochim. Acta, 1999, v. 63, № 5, p. 729—738.
- Wegener A.** Le dérive des continents (French translation of Die Entstehung der Kontinente und Ozeane, 1915, Friedrich Vieweg & Sohn, Braunschweig, 1929, 94 p.
- Winkler H.G.F.** Petrology of metamorphic rocks. 3rd ed., Springer, 1974.

Поступила в редакцию
24 сентября 2008 г.