

НЕКОТОРЫЕ АНАЛОГИИ МЕЖДУ ФАЗОВЫМИ ПРЕВРАЩЕНИЯМИ В ЗЕМНОЙ КОРЕ И ТЕРМОУПРУГИМИ ПЕРЕХОДАМИ В СПЛАВАХ С ПАМЯТЬЮ ФОРМЫ

А.А. Мовчан

*Институт прикладной механики РАН,
Москва, Ленинский проспект, 32а*

Минералогические фазовые превращения в нижней части континентальной земной коры могут рассматриваться как одна из причин быстрых опусканий участков коры, образования в ней глубоких прогибов, эпиплатформенного горообразования и т.д. Обнаружен ряд аналогий между минералогическими фазовыми переходами и термоупругими превращениями в сплавах с памятью формы. Эти аналогии весьма полезны для формулировки определяющих уравнений, описывающих фазовые переходы в земной коре, а также для понимания причин целого ряда тектонических явлений.

Минералогические фазовые превращения, происходящие в нижней части континентальной земной коры [1-12] играют весьма существенную роль в целом ряде тектонических процессов. По некоторым данным они могут быть причиной таких явлений, как быстрые опускания участков земной коры [1, 5, 6], образования глубоких прогибов, эпиплатформенное горообразование [1] и т.д. Экспериментальное исследование этих превращений затруднено тем, что при не слишком высоких температурах скорость соответствующих реакций чрезвычайно мала, так что продолжительность фазовых переходов, характерных для земной коры, измеряется миллионами лет. В результате, имеющиеся в литературе данные об этих переходах [2-4, 7, 8] весьма скудны и часто противоречивы, отсутствуют адекватные системы определяющих уравнений, описывающих соответствующие процессы, не разработаны методы решения краевых задач механики для элементов земной коры, испытывающих фазовые переходы.

В то же время, минералогические фазовые переходы по целому ряду свойств аналогичны хорошо изученным в экспериментальном и теоретическом планах термоупругим фазовым превращениям [13-15], происходящим в сплавах с памятью формы. Данная работа посвящена сравнительному анализу обоих видов фазовых превращений. Такой анализ и имеющиеся аналогии помогут исследованию фазовых превращений в земной коре и прогнозу тектонических явлений, которые могут быть вызваны этими переходами.

Нижняя часть континентальной земной коры состоит из базальтов в форме габбро. Габбро содержит плагиоклазы и пироксены [1]. При снижении температуры, связанном с постепенным остыванием земной коры плагиоклазы и пироксены реагируют друг с другом, образуя более тяжелые минералы - гранатовые гранулиты и, при продолжении реакции - эклогиты.

Фазовый переход такого типа явно аналогичен прямому термоупругому превращению в сплавах с памятью формы. Реакция сопровождается увеличением плотности до 20% (т.е., налицо объемный эффект реакции, который явно превосходит в количественном отношении аналогичное явление, наблюдающееся в сплавах с памятью формы).

Именно таким уменьшением объема и объясняются, следуя [1], быстрые опускания земной коры, не сопровождающиеся растяжениями и образование глубоких прогибов в ней.

С ростом гидростатического давления температуры фазового перехода увеличиваются. Так, следуя [2,3], при температуре 400°C нулевое гидростатическое давление соответствует точке начала фазового перехода, а давление порядка 1000 МПа - точке окончания превращения в эклогит. Следовательно, также как и при термоупругих превращениях, возможен вызванный напряжениями прямой фазовый переход в изотермических условиях. Так же, как и при термоупругих превращениях, зависимость температур прямого превращения габбро - гранатовый гранулит - эклогит от действующих напряжений можно считать линейной. Соответствующий коэффициент пропорциональности имеет значение от $\approx 1.2^{\circ}\text{C/МПа}$ для перехода габбро - гранатовый гранулит до $\approx 0.6^{\circ}\text{C/МПа}$ для перехода гранатовый гранулит - эклогит. Необходимо отметить, что в случае термоупругих превращений, гидростатическое сжатие снижает температуру начала прямого мартенситного превращения в никелиде титана и, в то же время, повышает температуру начала прямого ромбоэдрического превращения в том же материале [15]. Однако скорости этих изменений (около $0.02\text{-}0.005^{\circ}\text{C/МПа}$) примерно на два порядка ниже, чем соответствующие величины для переходов типа габбро - эклогит.

В случае термоупругих фазовых переходов, скорость реакции определяется скоростью изменения температуры и (или) напряжений и непосредственно не зависит от самого значения температуры (лишь бы это значение находилось в интервале температур соответствующего преобразования). Скорость минералогических фазовых переходов весьма существенно зависит от самого значения температуры, возрастая на порядок при повышении температуры на каждые 100°C [1,12]. В случае низких температур, характерных в среднем для земной коры, реакция перехода может продолжаться до 10^9 лет [1]. Возникает парадоксальная ситуация, при которой снижение температуры для фиксированного гидростатического давления, с одной стороны, способствует прямому превращению, поскольку температура входит в интервал температур прямого превращения, а с другой стороны, ведет к значительному уменьшению скорости соответствующей реакции. В результате оказывается, что в отсутствии катализаторов, реакция прямого превращения габбро - эклогит может идти с заметной скоростью лишь при достаточно высоких гидростатических давлениях, которым соответствуют температуры перехода порядка $700 - 800^{\circ}\text{C}$ [1]. Следуя диаграммам перехода [2,3] такие температуры соответствуют гидростатическим давлениям порядка $500 - 1500\text{ МПа}$. Столь критичные температурно - силовые условия ставят под сомнение тезис о широком распространении данного фазового превращения в земной коре и его решающей роли в образовании глубоких прогибов земной коры и быстрых опусканий ее отдельных участков [11].

Известно, что при фиксированных температурах скорость минералогических фазовых превращений рассматриваемого типа существенно растет при увеличении до определенных пределов концентрации в материнской фазе водосодержащего флюида [1,12]. Этим минералогические фазовые превращения отличаются от термоупругих переходов в сплавах с памятью формы. В результате прямое превращение габбро - эклогит может происходить за обозримые промежутки времени в температурно - силовых условиях, характерных в среднем для нижних участков земной коры.

Есть, однако, еще одно возможное объяснение относительно быстрого прохождения соответствующих реакций. Известно, что на температуры начала и окончания реакции прямого термоупругого превращения оказывает существенное влияние не только гидростатическая компонента тензора напряжений, но и его девиаторные составляющие. Более того, исследования [16] показывают, что для изменения температур пре-

вращений на один градус требуется примерно на порядок меньшее изменение интенсивности напряжений, чем изменение гидростатического давления. К сожалению, экспериментальные данные по зависимости температур минералогических фазовых переходов от девиаторных компонент напряжений отсутствуют. Однако, если предположить, что для переходов габбро - эглогит интенсивность напряжений изменяет температуры переходов также на порядок сильнее, чем рост гидростатического давления, то в случае приемлемых по скорости реакции температур порядка 800°C для прямого превращения будет достаточно интенсивности напряжений порядка 50 - 150 МПа. Девиаторные компоненты напряжений такой величины вполне могут иметь место и не приводить к разрушению в нижних слоях земной коры, находящихся в условиях высокого гидростатического сжатия. Их наличие может быть связано с нерегулярностями геометрии элементов земной коры и литосферных плит, угловыми точками и точками смены граничных условий и т.д.

В качестве подтверждения тезиса о влиянии девиаторных компонент напряжений на температуры прямого превращения габбро - эглогит можно привести данные о строении участков поверхности в области Берген (Скандинавские Каледониды) [1,10]. Здесь основные площади поверхности находятся в гранулитовой фации, в то время как тонкие слои материала, примыкающие к берегам трещин, состоят из эглогита. В [1] этот факт объясняется проникновением через трещины водосодержащего флюида, который значительно интенсифицирует прямое превращение. Можно заметить, однако, что толщина приповерхностного эглогитового слоя у более длинных трещин, имеющих большее раскрытие, существенно превосходит ту же величину для трещин малой длины и раскрытия. Этот факт трудно объяснить только проникновением флюида. Однако он легко объясняется влиянием концентрации напряжений в вершине растущей трещины на фазовый переход. Действительно, характерный размер зоны повышенных растягивающих напряжений вблизи вершины трещины пропорционален квадрату коэффициента интенсивности напряжений. Последняя же величина в случае изолированной трещины пропорциональна ее длине. Таким образом, размер зоны повышенных растягивающих напряжений, способствующих прямому превращению в эглогит, пропорционален длине трещины, в силу чего и толщина эглогитового поверхностного слоя должна быть пропорциональна длине трещины. Следует еще раз подчеркнуть, что в данном случае речь идет о растягивающих напряжениях при отсутствии гидростатического сжатия.

Следовательно, влияние девиаторных компонент тензора напряжений может служить еще одним фактором (помимо наличия водосодержащего флюида), который делает возможным прямой фазовый переход габбро - эглогит в нижних частях земной коры.

Помимо проблемы влияния девиаторных компонент напряжений на температуры перехода мало исследован вопрос о фазовых деформациях, сопровождающих минералогические превращения. В частности не известно, сопровождается ли прямое превращение габбро - эглогит не только деформацией изменения объема, но и формоизменением? Дело в том, что при прямых термоупругих превращениях фазовая деформация ограничивается изменением объема только в случае, когда фазовый переход происходит в условиях отсутствия девиаторных компонент приложенного напряжения. В противоположном случае наблюдается фазовая деформация изменения формы, которая для многих сплавов пропорциональна девиатору приложенного напряжения и на 1 - 2 порядка может превосходить по величине объемный эффект реакции прямого термоупругого превращения. Очевидно, что наличие конечных деформаций изменения формы в нижних слоях земной коры может привести к весьма существенным тектоническим изменениям. В частности, если напряжение сжатия в вертикальном направлении превосходит напряжение горизонтального сжатия, то возникнут фазовые деформации изменения формы, которые могут привести к опусканию участка земной коры и без существенного изменения плотности ее нижних слоев.

Еще одной аналогией между прямым термоупругим и прямым минералогическим превращениями является уменьшение жесткостных и прочностных характеристик в процессе этих переходов. Известно, что при прямом термоупругом превращении значение модуля Юнга сплава с памятью формы может уменьшаться в 3 раза и более. В то же время, по оценкам [1] вязкость пород земной коры в процессе быстрой эклогизации может уменьшиться на 2 порядка и более. Прочность пород также существенно уменьшается при быстром фазовом переходе.

Обратное фазовое превращение эклогит - гранатовый гранулит - габбро может иметь место при нагреве в областях с повышенным магматизмом. В [1] разуплотнением пород, связанным с обратным фазовым переходом, объясняется образование горных сооружений в тех случаях, когда это явление не было связано с предварительным сжатием земной коры или с отрывом ее нижних эклогитовых слоев и их погружением в мантию. В частности, отсутствие перечисленных выше признаков характерно для повторного образования горных сооружений на месте ранее возникших и впоследствии разрушенных эрозией гор (так называемое "эпиplatformенное горообразование"). В связи с образованием горных сооружений возникает вопрос о том, почему земная кора легко деформируется в процессе сжатия, предшествующего первичному горообразованию и не деформируется при образовании гор (иначе в процессе поднятия кора "растеклась" бы под действием собственного веса) [1]. Это явление ("консолидация коры после складчатости") можно объяснить не только залечиванием основной части крупных разломов [1], но и обратным фазовым переходом, при котором растет вязкость и прочность материала.

Таким образом, минералогические фазовые превращения элементов земной коры во многом аналогичны термоупругим переходам в сплавах с памятью формы. Следовательно, многие явления, обнаруженные при решении краевых задач для деформируемых твердых тел, испытывающих термоупругие фазовые превращения [17-21], могут иметь место и для минералогических фазовых переходов. Ниже будут перечислены некоторые из этих явлений и их возможная геофизическая интерпретация.

В [18] обнаружено, что в случае вызванного снижением температуры прямого фазового перехода в слое, находящемся на жестком основании фиксированной кривизны, изгибные напряжения в нем будут релаксировать. При определенной температуре T^* эти напряжения обратятся в нуль, после чего в случае отсутствия прочной связи между жестким основанием и слоем, последний может отойти от основания с образованием зазора между ними. Таким образом, возможно образование полостей между литосферными блоками и участками земной коры, претерпевающей фазовый переход габбро - эклогит.

В [17] решена контактная задача о воздействии жесткого параболического штампа, находящегося под действием постоянного усилия, на границу полуплоскости, испытывающей прямое мартенситное превращение. Установлено, что по мере снижения температуры штамп будет погружаться в полуплоскость (со скоростью, определяющей скоростью изменения температуры). Существует, однако, некоторое критическое значение температуры T^* , по достижении которого скорость погружения резко возрастает (до бесконечности при решении задачи в геометрически линейной постановке). Тем самым, появляется дополнительное объяснение наблюдаемых быстрых погружений участков земной коры и образования глубоких прогибов.

В [19-20] решена связанная задача о прямом превращении в слое, находящемся под действием постоянного изгибающего момента. Обнаружено явление существенного роста напряжений (перегрузки) на внешних поверхностях слоя после завершения в них фазового перехода. Результирующие напряжения более чем в два раза превосходят упругие напряжения, существовавшие в слое до фазового превращения. Следует отметить, что при прямом превращении прочность и жесткость материала падают, так что

обнаруженные перегрузки с большой вероятностью могут привести к разрушению. Установлено, что явление перенапряжений характерно и для других случаев прямого превращения в неравномерно напряженных телах (например, при фазовом переходе в цилиндрическом слое, находящемся под действием внутреннего давления).

Возможная геофизическая интерпретация этого явления состоит в том, что в процессе образования глубоких прогибов земной коры, вызванных фазовыми превращениями, перегрузки, возникающие в ее нижних слоях, могут привести к образованию разломов и трещин, по которым в вышележащие слои начнет проникать водосодержащий флюид. Тем самым возникнет самоподдерживающийся процесс движения области фазового перехода в вертикальном направлении и, связанное с этим процессом, увеличение глубины прогиба.

В [21] установлено, что существенные перегрузки при прямом термоупругом превращении могут возникать и в случае первоначально равномерного распределения напряжений если только уменьшающаяся температура распределена в материале неравномерно. Перенапряжения такого типа могут доходить до 25 - кратных (в случае постоянных материала, характерных для никелида титана). В результате появляется еще один механизм образования внутренних зон разрушения и полостей в элементах земной коры и литосферы, связанный с фазовыми переходами.

Таким образом, многие тектонические явления могут быть объяснены и даже прогнозироваться на основании данных о минералогических фазовых переходах в элементах земной коры. Для количественного анализа этих явлений необходима разработка определяющих уравнений, описывающих фазовые переходы типа габбро - гранатовый гранулит - эклогит, формулировка краевых задач механики для деформируемых твердых тел, испытывающих такие превращения и разработка методов их решения.

Работа выполнена при поддержке ISTC, проект № 1536.

Список литературы

1. Артюшков Е.В. Физическая тектоника // М.: "Наука", 1993 - 438 с.
2. Ito K., Kenedy G.C. An experimental study of the basalt - garnet granulite - eclogite transformation // The structural and physical properties of the Earth's crust // Wash. (D.C.): AGU, 1971. - P. 303-314 (Geophys. Monogr., No 14).
3. Ringwood A.E., Green P.H. An experimental investigation of the gabbro - eclogite transformation and some geophysical implications // Tectonophysics. - 1966. - Vol. 3. - P. 387 - 427.
4. Ringwood A.E. Phase transformation and differentiation in subducted lithosphere: Implications for mantle dynamics, basalt petrogenesis and crystal evolution // J. Geol. 1982. - Vol 90. - No 6. - P. 611 - 643.
5. Collette B.J. On the subsidence of the North Sea area // Geology of the shelf seas. Edinburgh: Oliver and Boyd. 1968. - P. 15 - 30.
6. Falvey D.A. The development of continental margins in plate tectonic theory // Austral. Petrol. Explor. 1974. Vol. 14. - P. 95 - 106.
7. Green D.H., Ringwood A.E. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications // Geoch. Cosm. Acta. 1967. - Vol 31. - P. 767-833.
8. Green D.H., Ringwood A.E. A comparison of recent experimental data on the gabbro - garnet granulite - eclogite transition // J. Geol. 1972. - Vol. 80. - P. 1556 - 1558.
9. Carswell D.A. (ed.) Eclogite Facies Rocks // 1990. - Blackie&Son; Chapman & Hall, New York. - 396 pp.

10. Austrheim H. Eclogitization of lower crustal granulites by fluid migration through shear zones // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1987.- Vol. 81.- P. 221 - 232.
11. Ismail-Sadeh A.T. The devonian to permian subsidence mechanisms in basins of the East - European platform // *J. Geodynamics.* 1978.- Vol 26.- No 1.- 69 - 83.
12. Achrens T.J., Schubert G. Gabbro - eclogite reaction rate and its geophysical significance // *Rev. Geophys. and Space Phys.* 1975 - Vol 13.- P. 383 - 400.
13. Курдюмов Г.В., Хандрос Л.Г. О "термоупругом" равновесии и мартенситных превращениях. ДАН СССР. 1949. Т. 66. №2. С. 211 - 214.
14. Лихачев В.А. Малинин В.Г. Структурно - аналитическая теория прочности // С. Петербург, "Наука". - 1993. - 471 с.
15. Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах // М.: "Наука". - 1994. - 304 с.
16. Беляев С.П., Егоров С.А., Лихачев В.А., Ольховик О.Е. Мартенситная неупругость и эффект памяти формы в условиях действия давления // Материалы с эффектом памяти формы. Сб. докладов I Рос - Амер. семинара и XXXI семинара "Актуальные проблемы прочности". - С. -Петербург. - 1995.- Ч. 1.- С. 11-19.
17. Мовчан А.А. Аналитическое решение задач о прямом и обратном превращении для сплавов с памятью формы// Известия АН. Механика твердого тела. 1966. № 4. С. 136-144.
18. Мовчан А.А. Некоторые проявления способности к ориентированному превращению для сплавов с памятью формы//Журнал прикладной механики и технической физики. 1996. Т.37, №6. С. 181-189.
19. Мовчан А.А. Учет переменности упругих модулей и влияния напряжений на фазовый состав в сплавах с памятью формы//Известия АН. Механика твердого тела. 1998. №1. С. 79-90.
20. Мовчан А.А. Исследование эффектов связности в задачах изгиба балок из сплава с памятью формы// Журнал прикладной механики и технической физики. 1998. Т. 39, №1. С. 87 - 97.
21. Мовчан А.А., Кузнецов А.В. Эффект перегрузки в связанных краевых задачах о прямом превращении в сплавах с памятью формы// I Международный семинар "Актуальные проблемы прочности им. В.А. Лихачева и XXXIII семинар "Актуальные проблемы прочности". Научные труды. Новгород, 1997. Т. 1. Ч. 1. С. 67-71.