

ставляющих единый беломорский структурно-формационный комплекс. Индустриальные минералы (мусковит, гранат-альмандин, микроклин, плагиоклаз, кварц, кианит) включают в свой состав летрогенные элементы. Мусковитовые пегматиты жильного типа пространственно связаны с высокоглиноземистыми породами чупинской свиты лопия и контролируются узкими линейными зонами сжатых и изоклинальных складок, а также зонами расщеливания и кливажа.[9]

Рифейский тектоно-магматический цикл (1,65-1,1 млрд. лет). Соответствующая этому циклу металлогеническая эпоха проходила в условиях тектоно-магматической активизации стабилизированной платформы и формирования рифтогенных структур северо-восточного простирания. Выделены два этапа рудообразования: раннерифейский и позднерифейский. Раннерифейский этап обусловлен интрузиями многофазного анортзит-габбро-рапакиви-гранитного комплекса. С анортзитами и габброноритами этого комплекса связано железо-титановое оруденение, с гранитами - скарновые, цинково-железорудные, железо-цинк-оловорудные месторождения и рудопроявления, скарново-грейзеновые оловянно-редкометалльно-флюоритовые месторождения и оловянно-редкометалльные рудопроявления в альбититах. [4]

Позднерифейский этап характеризуется своеобразными интрузивно-диатремовыми калиевыми щелочными породами (ладогалитами) с фосфорно-редкометалльно-титановым оруденением и стронций-барийсодержащим полевошпатовым сырьем, а также внедрением даек лампроитов. В этих комплексах установлены признаки алмазности.[5]

Рифейский комплекс щелочно-полевошпатовых пород, названных ладогалитами, представляет собой новый вид комплексных магматических месторождений апатитового, стронций-барийсодержащего щелочно-полевошпатового, сиенитового щелочно-полевошпатового сырья и сфенового минерального сырья Элисенваарской группы. Внедрение щелочнокалиевой магмы с характерной недосыщенностью SiO_2 и высоким содержанием щелочей до 13,2% при преобладании калия над натрием ($\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O} = 0,34-0,84$) произошло в интрузивную и диатремо-дайковую фазы.[5]

Литература

1. Рыбаков С.И., Голубев А.И., Слюсарев В.Д. и др. Металлогения Карелии. Петрозаводск. 1999. 340 с.
2. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Книга №1. Горючие полезные ископаемые. Металлические полезные ископаемые. Петрозаводск. «Карелия». 2005. Под. ред. Михайлова В.П., Аминова В.Н. 2005. 280 с.
3. Минерально-сырьевая база Республики Карелия. Книга №2. Неметаллические полезные ископаемые. Подземные воды и лечебные грязи. Петрозаводск. «Карелия». Под. ред. Михайлова В.П., Аминова В.Н. 2006. 356 с.
4. Хазов Р.А. Металлогения Ладожско-Ботнического геоблока Балтийского щита. Л.:Наука, 1982. 192 с.
5. Хазов Р.А., Попов М.Г., Бискэ Н.С. Рифейский калиевый щелочной магматизм южной части Балтийского щита. С-Пб.: Наука, 1993. 218 с.
6. Рыбаков С.И., Голубев А.И., Слюсарев В.Д., Лавров М.М. Докембрийский рифтогенез и современная структура Фенноскандинавского щита // Отечественная геология №5, 1999, С.29-38.
7. Свириденко Л.П., Светов А.П., Голубев А.И. и др. Эволюция докембрийского магматизма. Л.: Наука, 1985. 253 с.
8. Голубев А.И., Щипцов В.В. Полезные ископаемые Карелии. //Глубинное строение и эволюция земной коры восточной части Фенноскандинавского щита: Профиль Кемь-Калеваля. Петрозаводск. 2001. С.29-38.
9. Гродницкий Л.Л. Рудогенерирующие пегматитовые системы Кольской части Беломорского пояса. Петрозаводск. 1991. 174 с.

Современные и палео напряжения в северной части Балтийского щита по данным исследований разреза Кольской сверхглубокой скважины

Горбачев Ф.Ф.¹, Савченко С.Н.², Головатая О.С.¹

¹Геологический институт Кольского научного центра РАН, Апатиты, E-mail: gorich@geoksc.apatity.ru

²Горный институт Кольского научного центра РАН, Апатиты

Современные напряжения являются очень важной частью геодинамики земной коры. Они определяют большое число разнообразных процессов на их окраинах, и в том числе наблюдаемых

внутри континентальных частей земной коры. Изучение и мониторинг их уровня необходим для снижения ущерба от природных катастроф, таких как землетрясения, цунами, оползни и др. Напряжения (палеонапряжения), действовавшие в прошлые геологические времена, определяли направления движения континентальных плит, процессы орогенеза, метаморфогенные преобразования кристаллических пород и др. Исследование керна, разреза и геоблока в окрестности Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) позволили существенно продвинуться в изучении параметров и действия как современных, так и палеонапряжений в северной части Балтийского щита.

Современные напряжения. Известно, что современное напряженное состояние пород Балтийского щита, в основном, формируется раздвижением континентальных плит в районе срединноокеанических рифтовых зон Атлантического и Ледовитого океанов и давлением Африканской плиты на Евразийскую литосферную плиту. Мозаика распределения напряжений европейской части Евразийской плиты определяется ее крупноблоковым строением. С учетом условий передачи напряжений и деформаций, геометрии блоков, методами численного моделирования построена модель распределения современных напряжений на территории Фенноскандии [1]. Наряду с блоками более мелкого рангового уровня, рассматривается блок, включающий Кольский полуостров. Этот блок разбит на блоки следующего структурного уровня с учетом их геологического строения и с граничными условиями, полученными на предыдущем этапе исследований. В результате получено, что абсолютное значение тектонических напряжений T , согласно статистической обработке данных натурных измерений на европейском континенте, действующих на границе Евразийской литосферной плиты, составляют величину порядка 50 МПа [2]. В направлении северо-восток – юго-запад максимальные сжимающие напряжения изменяются незначительно – от $1,1T$ до $1,2T$, а минимальные от $0,6T$ до $0,9T$. Ориентация максимальных сжимающих напряжений в блоке преимущественно субмеридиональная. Однако геологическое и тектоническое строение этого блока весьма сложное и пока позволяет создать лишь общую карту распределения горизонтальных напряжений.

Кольская скважина СГ-3, достигшая опережающим стволом глубины 12261 м, является наиболее интересным объектом для изучения напряжений в пределах верхней и средней частей земной коры. Она пройдена в северном крыле Печенгской геосинклинали, сложенной ритмично переслаиваемыми вулканогенными и туфогенно-осадочными толщами, простирающимися на СЗ $300\text{--}310^\circ$ и падающими на ЮЗ под углами $30\text{--}50^\circ$ [3]. Геологический разрез СГ-3 представлен двумя комплексами: протерозойским и архейским. В окрестности СГ-3 главные горизонтальные напряжения близки по величине и равны $\sigma_1=1,05T$, $\sigma_2=1,11T$, азимут наибольшего сжатия $\approx 320^\circ$.

С учетом конкретных свойств пород для разреза СГ-3 были рассчитаны изменения составляющих поля современных напряжений с глубиной в нетронutom массиве [4]. Расчеты выполнены для изотропной и анизотропной моделей, рис. 1. При расчете бокового отпора в изотропной модели учитывались значения коэффициента Пуассона для породы, залегающей на данной глубине. Для анизотропной модели рассчитаны составляющие поля напряжений в горизонтальной плоскости в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Кроме того, была рассчитана разница между ними $\Delta\sigma_k$.

По полученным данным построены графики изменения напряжений с глубиной. На рисунок 1 нами нанесены величины напряжений, вычисленные для 25 точек (глубин), из которых был отобран и исследован керновый материал СГ-3.

В целом, сравнение компонент поля напряжения показало, что разница между величинами горизонтальных компонент поля напряжений, полученных с учетом анизотропии упругих свойств слоев до глубин до 6 км, незначительна. Но при этом, например, на глубине 6.32 км учет анизотропии пород (с коэффициентом анизотропии по продольным волнам, равным 9%) приводит к разнице в 17 МПа между компонентами в двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлениях. При дальнейшем увеличении глубины влияние упругой анизотропии пород приводит к еще большему возрастанию разницы между компонентами поля напряжения в двух горизонтальных направлениях (рис. 1). Так, на глубинах 9.4 – 9.5 км, сложенных породами с высокой степенью анизотропии эта разница будет составлять от 25 до 60 МПа.

Более детальный анализ должен показать, что изменения радиального и тангенциально-го напряжений с глубиной является еще более значимыми. Например, архейская часть разреза СГ-3 [5] представлена гнейсами, амфиболитами, гранитами, пегматитами и др. типами пород, перемежающимися, в среднем, с частотой 5–10 метров. Это означает, что с такой же периодичностью может происходить резкое изменение величин радиальных и тангенциальных деформаций. При этом, учет неоднородности массива приводит к отклонению тенденции изменения горизонтальной составляющей поля напряжений от линейного закона, следующего из расчетов по гипотезе Динника (если полагать коэффициент Пуассона постоянным для данного массива).

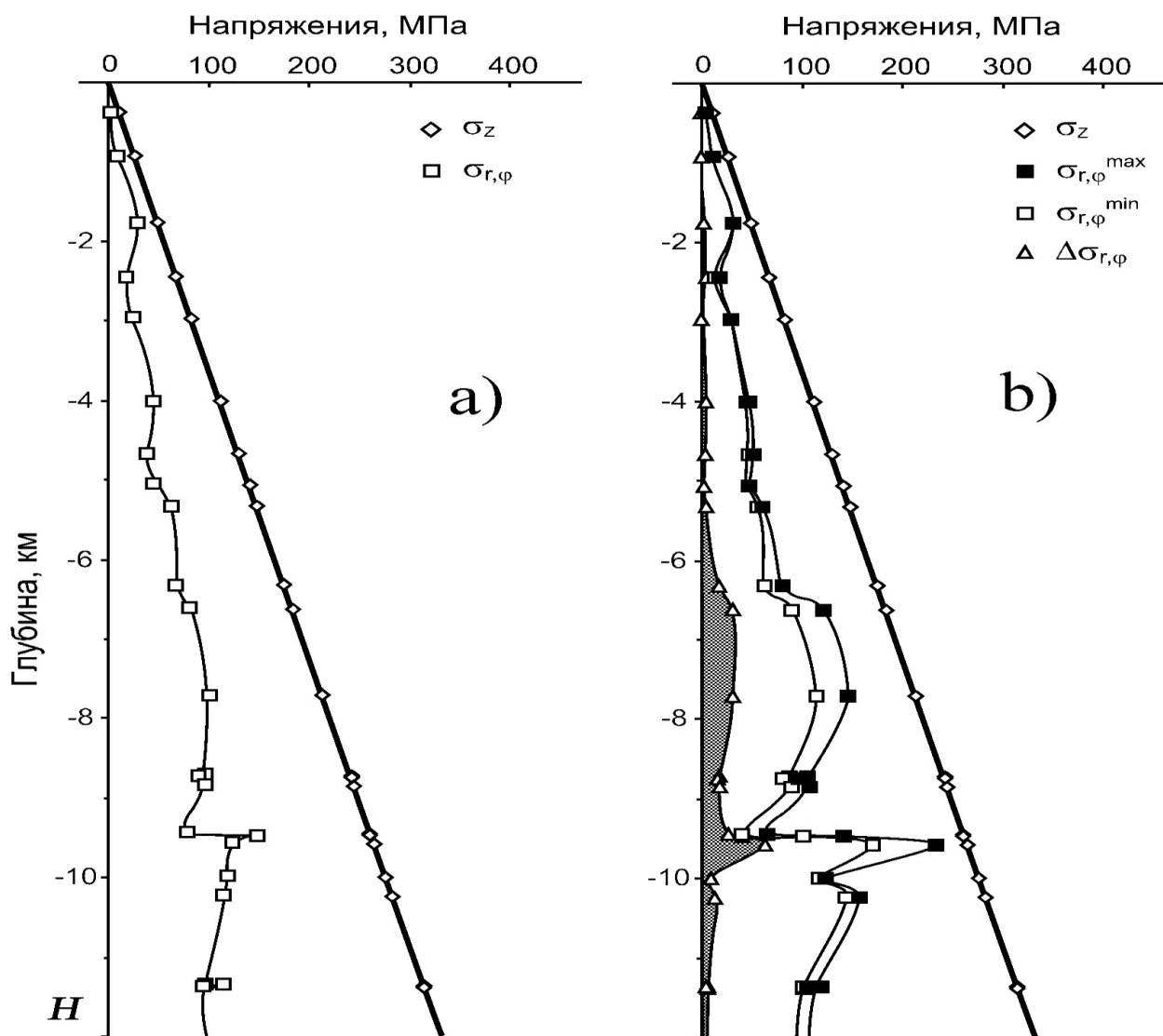


Рис. 1. Изменения компонент поля напряжений в нетронутом массиве с глубиной по разрезу СГ-3:

а – изотропная, б – анизотропная модель; σ_z – вертикальная составляющая поля напряжений; $\sigma_{r,\varphi}$ – радиальная и тангенциальная составляющие поля напряжений; для изотропной модели $\sigma_{r,\varphi}^{\max}$ и $\sigma_{r,\varphi}^{\min}$ – значения радиального и тангенциального напряжений для двух взаимно перпендикулярных горизонтальных направлений, $\Delta\sigma_{r,\varphi}$ – разница между максимальным и минимальным значениями горизонтальных составляющих поля напряжений

Палеонапряжения. Так как массив Кольской сверхглубокой скважины сложен метаморфизованными породами протерозойского и архейского возраста, палеонапряжения в разрезе, пройденном скважиной, должны были играть существенную роль. Ее протерозойский комплекс

(0–6842 м) сложен вулканогенными и осадочными породами в соотношении 3:1. Вскрытая часть архейского комплекса (6842–12261 м) представлена биотит-плагиоклазовыми и биотит-амфибол-плагиоклазовыми гнейсами с высококальциевыми минералами (ВКМ), гнейсами с высокоглиноземистыми минералами (ВГМ), амфиболитами и метаультрабазами, пегматитами и гранитами [3]. В вертикальном разрезе архейского комплекса выделено 10 толщ, характеризующихся различным составом и сочетанием слагающих их пород, характером регионального и дислокационного метаморфизма, гранитизации, элементами пликативной и дизъюнктивной тектоники.

Протерозойские и архейские породы в разные годы были датированы уран-свинцовым, рубидий-стронциевым и самарий-неодимовым методами [5]. Возраст протерозойских пород при движении вниз по разрезу находится в пределах 1855–2324 млн. лет. Цирконы из биотитовых гнейсов архейского комплекса, извлеченных из разных глубин, показали возраст от 1765 до 2948 млн. лет.

Как показано в работах [3, 6], упругая анизотропия метаморфических пород является следствием длительного (в геологическом смысле) действия напряжений. Эти напряжения, в процессе метаморфических преобразований приводят к образованию новых, метаморфогенных минералов. Происходит переориентировка элементов симметрии минералов в соответствии направлением действия компонент поля напряжений. В конечном итоге метаморфизованная порода становится упруго-анизотропной. Практика бурения разведочных и др. скважин показала, что их ствол отклоняется от вертикали в направлении по нормали к плоскости анизотропии массива [7]. Соответственно, по азимуту отклонения скважины от вертикали можно судить о пространственном положении плоскости упругой анизотропии геологического тела и направлении действия главной компоненты поля палеонапряжений.

Нами были проанализированы траектории четырех стволов Кольской скважины СГ-3, пройденных в разное время, достигшие различных предельных глубин. На рисунке 2 траектории этих стволов вынесены на горизонтальную плоскость. Выполненный анализ показал, что на различных глубинах, в пределах различных свит и толщ, плоскость структурной (упругой) анизотропии пород занимает разное положение. В пределах всего разреза выделяется 10 интервалов (этажей), различающихся параметрами пространственного положения плоскости структурной анизотропии [6].

Сводные характеристики этажей с различающимися параметрами их пространственного положения и показателя анизотропии были исходными для построений пространственных ориентировок компонент палеонапряжений. В соответствии с этим, на рис. 2 стрелками отображена направленность действия главной компоненты палеонапряжений на разных глубинах разреза СГ-3. Толщина стрелок пропорциональна усредненной величине этой компоненты. В свою очередь, усредненная величина главной компоненты палеонапряжений принималась пропорциональной параметру анизотропии, определенному на образцах керна для этого интервала глубин [6].

Угол падения элементов структурной анизотропии пород в отдельных выделенных этажах (табл.) находится в пределах 40–65°. Сравнительно небольшой диапазон углов падения может быть объяснен (по крайней мере, до глубины 8.6 км) за счет одинакового механизма погружения и наклона свит и толщ при образовании Печенгской синклинали.

Судя по параметрам упругой анизотропии, протерозойская часть разреза СГ-3, за исключением рудного интервала 1.7–1.9 км [6], формировалась при сравнительно спокойном палеотектоническом режиме и слабых горизонтальных силах.

Как показывает вышеприведенные данные, в архее происходили значительные геодинамические события, связанные, скорее всего, с циклом Кольско-беломорского метаморфизма. Отдельных этапы цикла отличались как по интенсивности, так и по направленности действия тектонических сил. Из полученных данных следует, что структура и анизотропия пород, возникшая в период этих этапов, не была изменена палеогеодинамикой более поздних этапов.

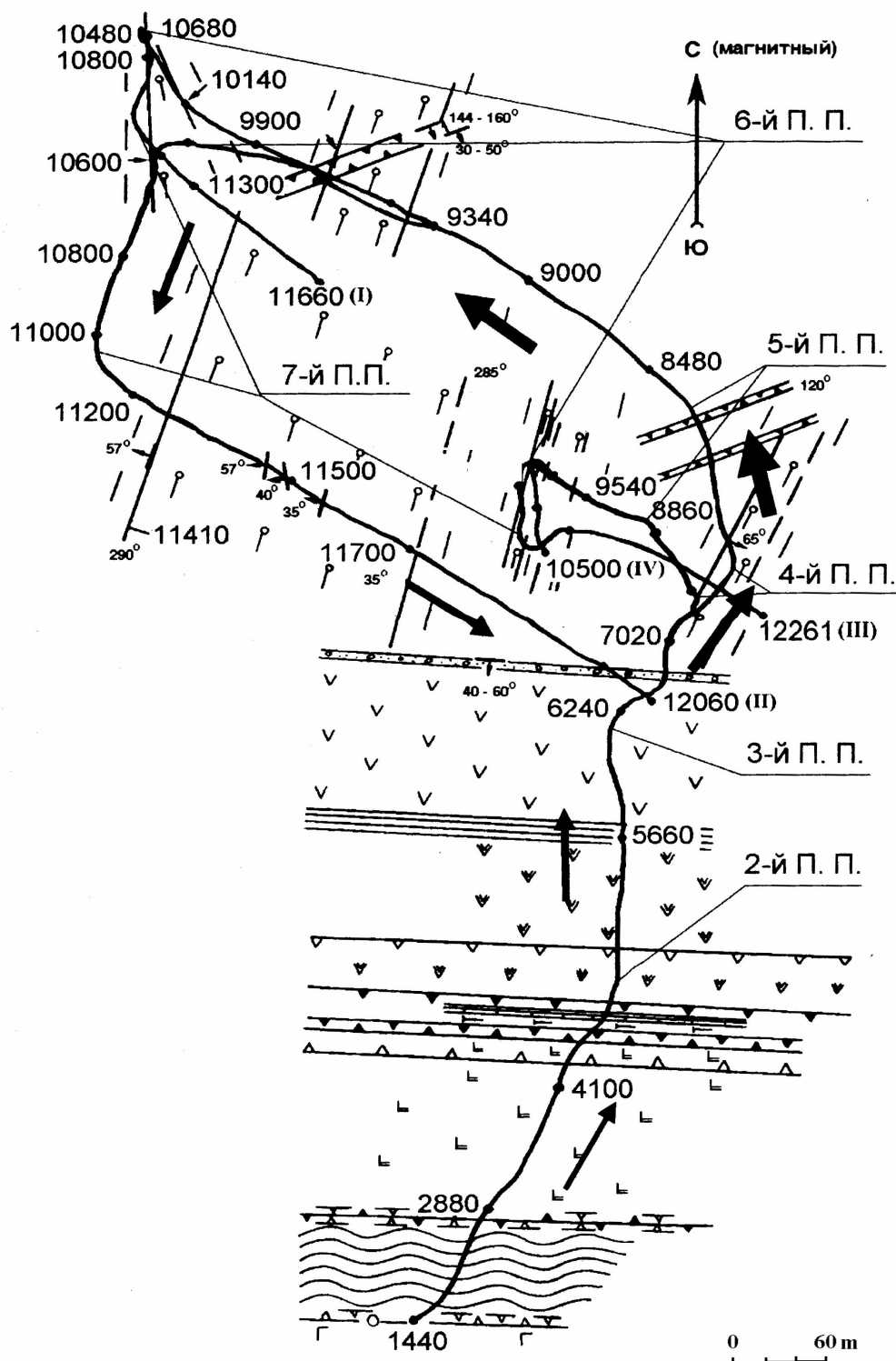


Рис. 2. Траектории стволов Кольской сверхглубокой скважины в проекции на горизонтальную плоскость

За содействие и помощь при проведении исследований, обсуждении результатов авторы выражают благодарность Ф.П. Митрофанову, В.Л. Ильченко, В.Р. Ветрину.

Работа выполнена при поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, грант № 07-05-00100-а.

Литература

1. Савченко С.Н., Козырев А.А. Исследование напряженного состояния массива горных пород вблизи Кольской сверхглубокой скважины (СГ-3) // Геоэкология, инженерная геология, гидрогеология, геокриология. 2002. № 2. С. 163–174.
2. Kozurev, A.A. and Savchenko, S.N. The Eurasia lithospheric plate horizontal tectonic stresses modeling In: Yufin, S.A. (Ed.) Geoeology and computers. Balkema, Potterdam – Brookfield, 2000. P. 431–435.
3. Кольская сверхглубокая. Научные результаты и опыт исследований. Ред. В.П.Орлов, Н.П.Лаверов - М.: МФ "Технефтегаз", 1998. 260 с.
4. Головатая О.С. Автореферат диссертации на соискание ученой степени канд. техн. наук. Изучение анизотропии упругих свойств и ее влияния на напряженное состояние пород верхней части земной коры (на примере сверхглубокой скважины). Апатиты, изд. КНЦ РАН, 2004. 24 с.
5. Баянова Т.Б., Пожиленко В.И., Смолькин В.Ф., Кудряшов Н.М., Каулина Т.В., Ветрин В.Р. Каталог геохронологических данных по северо-восточной части Балтийского щита. Апатиты: Изд. Кольского научно-го центра РАН, 2002. 53 с.
6. Строение литосферы российской части Баренц-региона. Под ред. Н.В. Шарова, Ф.П. Митрофанова, М.Л. Вербы, К. Гиллена. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2005. 318 с.
7. Бахвалов А.И., Пономарев В.Н., Смолин П.П., Кузнецов Ю.И., Смирнов Ю.П. Магнитометрические исследования Кольской сверхглубокой скважины // Сов. Геология. 1989. № 9. С. 83–87.

О безоливиновом источнике магнезиальных мантийных магм: эксперимент, геологические следствия

Горбачев Н.С., Костюк А.В.

ИЭМ РАН, г. Черноголовка, e-mail: gor@iem.ac.ru, nastia@iem.ac.ru

Исходя из существующей парадигмы о перидотитовом составе верхней мантии в настоящее время прочно устоялись представления о равновесии первичных магнезиальных мантийных магм с

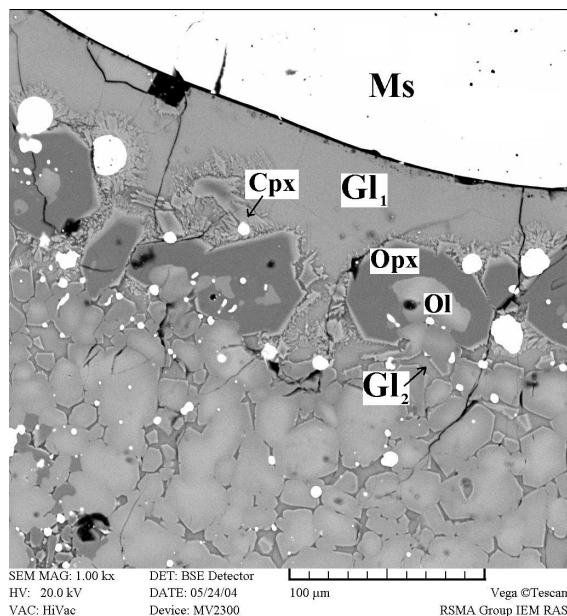


Рис. Вид полированного экспериментального образца в отраженных электронах:

Внизу – перидотитовая ампула, заполненная силикатным стеклом (закалочным расплавом), отчетливо видно замещение оливина перидотитовой ампулы ортопироксеном при взаимодействии базальтового расплава с перидотом. Белое – сульфиды Ol – оливин, Spx – клинопироксен, Opx – ортопироксен, Gl – стекло, Ms- сульфид. 1250°C, 2.5 ГПа

оливином источника. Однако геохимические и экспериментальные данные свидетельствуют о возможности безоливинового (пироксенитового) состава мантийного субстрата, из которого выплавлялись магнезиальные магмы. Об этом свидетельствует также «пироксеновый парадокс», при высоких (> 2.0 ГПа) давлениях для магнезиальных расплавов оливин не является ликвидусным минералом. В наших экспериментах, моделирующих процессы магмообразования, связанных с плавлением флюидсодержащей (H_2O , H_2O+CO_2) перидотитовой мантии в интервале $P=1.5-4.0$ кбар, $T=1250-1450^\circ C$ состав ликвидусной (на границе со стеклом – закалочным расплавом) ассоциации, равновесной с магнезиальными «реакционными» расплавами отвечал пироксениту ($Spx+Opx$). При этом наблюдалось отчетливое замещение оливина ортопироксеном на границе со стеклом (рис.).

Отсутствие оливина на ликвидусе магнезиальных базальтов можно объяснить реакцией с образующимися флюидсодержащими базальтовыми расплавами. При плавлении перидотита в условиях шпинелевой Sp и гранатовой Ga фаций глубинности верхней мантии стабильность оливина определяется активностью SiO_2 и (или) Al_2O_3 в расплаве, буферире-