

# ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА НА ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ГОРНЫХ ПОРОД МАНТИИ И ЛИТОСФЕРЫ МАТЕРИКОВ И ОКЕАНОВ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕРМОБАРИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

Сафаров И.Б., Алиева С.С., Ибрагимова У.С.

Институт Геологии и Геофизики Национальной Академии Наук Азербайджана

**Ключевые слова:** горные породы, химический состав, физические параметры, высокие термобарические условия

**Аннотация.** Упругие и плотностные характеристики горных пород континентальной и океанической литосферы при давлениях до 3,0 ГПа определены на модифицированной твердофазной установке импульсным ультразвуковым методом. На основе экспериментального изучения упругих и плотностных свойств горных пород континентальной и океанической литосферы выявлена качественная связь этих параметров с химическим составом образцов при высоких термобарических условиях. Установлено, что влияние оксидов на величину скорости продольных и поперечных волн, а также плотности в исследованных горных породах неодинаково в разных регионах.

## Введение

Определение физических параметров геоматериалов при высоких термобарических условиях необходимо как в связи с фундаментальными проблемами геологии и геофизики, так и для решения прикладных задач. Особенно важным для прикладных вопросов геологии и геофизики является установление связей между физическими параметрами и химическими компонентами горных пород в термобарических условиях, близких к реально существующим в недрах Земли [2, 7, 14]. Использование этих связей позволяет более обоснованно говорить о закономерностях распределения химических элементов в литосфере и их поведении, а также оценить достоверность тех или иных геофизических моделей и провести при необходимости их корректировку. Поэтому при интерпретации результатов полевых и лабораторных наблюдений важно учитывать влияние химических компонентов горных пород на их физические характеристики.

Предлагаемая работа посвящена особенностям влияния химических компонентов на упру-

гие и плотностные свойства магматических и метаморфических пород континентальной и океанической литосферы при высоких термобарических условиях.

## Методика проведения экспериментов

Эксперименты проводились на твердофазной установке типа «цилиндр – поршень» [2] по методике, разработанной ранее [3, 8, 11]. Эта методика предусматривает одновременное определение скоростей продольных и поперечных волн, а также плотности в процессе одного опыта на одном образце горных пород при высоких термобарических условиях. Скорости продольных и поперечных волн в образцах горных пород и минералов измерялись методом ультразвукового прозвучивания.

Для преобразования ультразвуковых колебаний на малую плоско-полированную поверхность конических пуансонов наклеивались датчики из пьезокерамики ЦТС с собственной частотой колебаний 1 - 2 МГц. Для экспериментов образцы горных пород и минералов изготавливались в виде цилиндров длиной 20 мм и диаметром 17,5 мм. Скорости упругих волн и плотность образцов определялись вначале при атмосферном давлении. Затем образцы помещались в свинцовую оболочку, которая вставлялась в цилиндрический канал камеры между поршнями. Толщина свинцовой оболочки равна 1,3 - 1,5 мм.

## Результаты и их обсуждение

Как известно [2, 7, 14], кроме серпентинизации, возраста и структуры существует целый ряд других факторов, влияющих на физические характеристики горных пород при высоких термобарических условиях. Одним из них является химический состав горных пород [8].

При изучении физических свойств горных пород и минералов и раньше отмечалось влияние химического состава на величины скоростей упругих волн и плотности как при атмосферном давлении, так и при высоких термобарических условиях [2, 9]. При этом были установлены два типа зависимостей между скоростью упругих волн и плотностью, обусловленные различием в атомном строении вещества. Для первого типа эта зависимость имеет вид  $V_p = f(\rho)$ , для второго -  $V_p = f(1/\rho)$ . К первому типу относятся все главные породообразующие минералы, состоящие преимущественно из элементов со структурой типа SP (K; Na; Si и др.). Скорость упругих волн и плотность этих минералов существенно зависят от величины атомных радиусов, в основном определяющих плотность упаковки атомов в кристаллах, и их структуры (при подчиненном влиянии атомной массы). Ко второму типу относятся минералы и металлы со структурой типа d, для которых существенно влияние на физические параметры относительной атомной массы (Fe; Co; U; магнетит, пирит и др.). Для второго типа характерно понижение скорости упругих волн при возрастании плотности [1, 7].

Указанные типы связей сохраняются и для таких многокомпонентных систем как горные породы, но, естественно, они более сложные, зависящие от многих других факторов, не всегда однозначны, мало исследованы, особенно при высоких давлениях [8, 9].

Как показывают исследования химического состава континентальной коры и верхней мантии [4, 5, 13], в процессе формирования мантийное вещество претерпело сильную дифференциацию. При рассмотрении данных силикатного анализа горных пород прослеживается связь их химического состава с глубиной. В коре увеличивается содержание кремнезема, глинозема, кальция и уменьшается содержание магния, хрома, никеля, кобальта, ванадия. Сравнение усреднённых результатов анализа основных представителей мантийных пород от малоглубинных альпинотипных до наиболее глубоких гранатовых гипербазитов показывает, что они имеют близкий силикатный состав. В то же время распределение химических элементов в верхней мантии также дифференци-

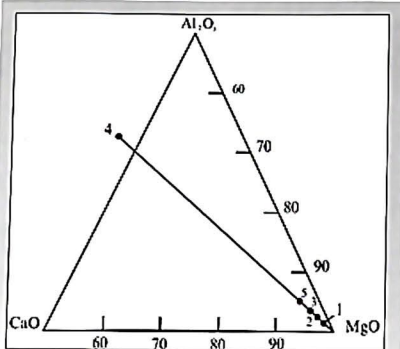


Рис. 1. Соотношение  $Al_2O_3 - CaO - MgO$  (мольные %) в мантийных породах и хондритах  
1 – альпинотипный гипербазит, 2 – шпинелевый перидотит, 3 – гранатовый перидотит, 4 – мантийный эглотит, 5 – хондрит [4, 5]

ровано по глубине (рис.1).

Малоглубинные альпинотипные, среднеглубинные шпинелевые и наиболее глубокие гранатовые гипербазиты различаются по своему химическому составу. Альпинотипные гипербазиты по сравнению с гранатовыми содержат меньше кремнезема, количество алюминия уменьшается в них в 1,5 раза, а кальция – в 2 раза [4, 5]. Очень большая разница устанавливается в распределении щелочноземельных, редкоземельных и радиоактивных элементов. Так, по сравнению с гранатовыми перидотитами в шпинелевых гипербазитах содержание указанных элементов уменьшается в 4 раза, а в альпинотипных гипербазитах – в 10 - 30 раз.

В мантии наблюдается последовательное увеличение содержания CaO и  $Al_2O_3$  от малоглубинных альпинотипных гипербазитов до среднеглубинных шпинелевых перидотитов и далее до наиболее глубоких гранатовых перидотитов, содержащих максимальное количество глинозема и извести. Эта закономерность для мантийных пород хорошо прослеживается на диаграмме  $Al_2O_3 - CaO - MgO$ .

Представляет интерес рассмотреть связь физических параметров изученных нами горных

пород из разных регионов – Сибирской платформы, Тянь-Шаня, Урала, Тихого океана, Средиземноморья, Тальшской складчатой зоны и др. с изменением их химического состава, в частности, закономерности в распределении оксидов при высоких термобарических условиях.

Известно [1, 4, 5, 6, 13], что главными химическими компонентами горных пород являются оксиды кремния, калия, натрия, алюминия, кальция, магния и железа. Соотношение содержания этих оксидов в значительной степени определяет упругие характеристики геологических образований. Наименьшей скоростью упругих волн характеризуются породы, обогащенные оксидами кремния, калия, натрия, а с увеличением содержания в них оксидов кальция, магния и железа эта скорость увеличивается. Однако, степень влияния этих оксидов на скорость упругих волн и плотность в горных породах различна, при этом выделяются три группы.

В первую группу можно отнести горные породы Тальшской складчатой зоны и Тянь-Шаня. На рис. 2 и 3 приведены зависимости скорости упругих волн, а также плотности от процентного содержания химических компонентов ( $SiO_2$ ;  $Al_2O_3$ ; MgO; FeO;  $Fe_2O_3$ ) горных пород Тальшской зоны и Тянь-Шаня при давлениях до 1,5 – 2,0 ГПа.

Существенным фактором в эволюции субщелочного основного и ультраосновного комплексов Тальшской зоны является наличие переходных разновидностей между ними. В интрузивных массивах Талыша, в которых наблюдается последовательность «субщелочной перидотит - субщелочное габбро, габбро - сиенит», отмечено существенно возрастание  $SiO_2$ ;  $Al_2O_3$ ;  $N_2O$ ;  $K_2O$ ; CaO при убывании MgO;  $Fe_2O_3$ ; FeO. Причем субщелочное габбро выделяется не как самостоятельная фаза, а как переходная между субщелочными перидотитами и габбро-сиенитами [1].

Как видно из рис. 2, зависимость величины скорости продольных волн и плотности от процентного содержания отдельных химических компонентов горных пород Тальшской зоны при давлении 1.5 ГПа носит разный характер. Скорость продольных волн в горных породах этой зоны уменьшается с увеличением содержания  $SiO_2$  и  $Al_2O_3$ , и увеличивается с увеличением содержания MgO. Причем наибольшее влияние на величины скорости упругих волн и плотности оказывает изменение содержания оксида алюминия, которое проявляется в значительном гради-

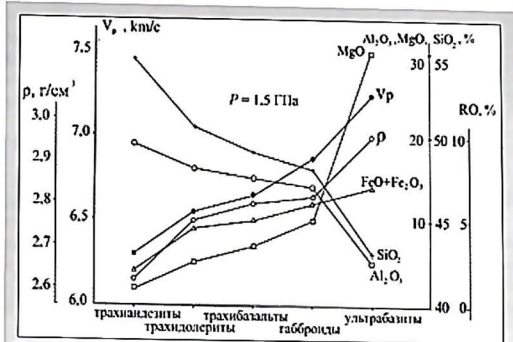
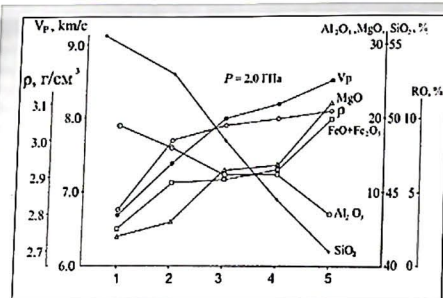


Рис. 2. Зависимость скорости продольных волн и плотности в образцах горных пород Тальшской зоны от содержания в них кремнезема ( $SiO_2$ ), оксида алюминия ( $Al_2O_3$ ), оксида магния (MgO) и оксида железа (FeO) при давлении 1,5 ГПа

нте изменения величины скорости. Вместе с тем, как видно из этих рисунков, преимущественное влияние на плотность горных пород оказывает суммарное содержание оксидов железа  $FeO+Fe_2O_3$  [8].

В пределах Южного Тянь-Шаня вдоль зон глубоких разломов располагаются массивы мафитов и ультрамафитов, которые рассматриваются как производные верхней мантии; они представлены в основном оливинными клинопироксенитами, бедными  $Al_2O_3$ , и оливиншпинелевыми клинопироксенитами, богатыми  $Al_2O_3$ , реже встречаются гранатовые клинопироксениты [6].



ГПа с повышением содержания в горных породах  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  скорость упругих волн и плотность понижаются, а с повышением содержания  $\text{MgO}$  — увеличиваются. Из графиков 2 и 3 видно, что, как отмечалось выше, содержание оксидов железа в породах обеспечивает первый тип зависимости скорости от плотности, а именно  $V_p = f(\rho)$ , следовательно, при увеличении суммарного содержания оксидов железа  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  скорости упругих волн и плотность увеличиваются.

Ко второй группе можно отнести горные породы офиолитовых комплексов о. Кипр и Урала. На рис. 4 (а) и (б) приведены зависимости скорости продольных и поперечных волн от химического состава горных пород о. Кипр и Урала при давлениях до 1,5 ГПа.

Следует отметить, что существенная связь скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн с химическим составом при высоких термобарических условиях установлена в исследованных породах массива Троодос о. Кипр. Понижение скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн с химическим составом при высоких термобарических условиях установлена в исследованных породах массива Троодос о. Кипр.

Рис. 3. Зависимости скорости продольных волн и плотности в образцах горных пород Тянь-Шаня от содержания в них кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), оксида магния ( $\text{MgO}$ ), оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), оксида железа ( $\text{FeO}$ ) при давлении 2,0 ГПа 1 — графитовые пироксениты, 2 — двупироксеновые гнейсы, 3 — оливин-шпинелевые пироксениты, 4 — оливиновые пироксениты, 5 — шпинелевые пироксениты

Из рис. 3 видно, что для горных пород Тянь-Шаня зависимость между величинами скорости упругих волн и плотности от процентного содержания оксидов при давлениях 2,0 ГПа носит разный характер [8]. В интервале давлений до 2,0

ГПа с повышением содержания в горных породах  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  скорость упругих волн и плотность понижаются, а с повышением содержания  $\text{MgO}$  — увеличиваются. Из графиков 2 и 3 видно, что, как отмечалось выше, содержание оксидов железа в породах обеспечивает первый тип зависимости скорости от плотности, а именно  $V_p = f(\rho)$ , следовательно, при увеличении суммарного содержания оксидов железа  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  скорости упругих волн и плотность увеличиваются.

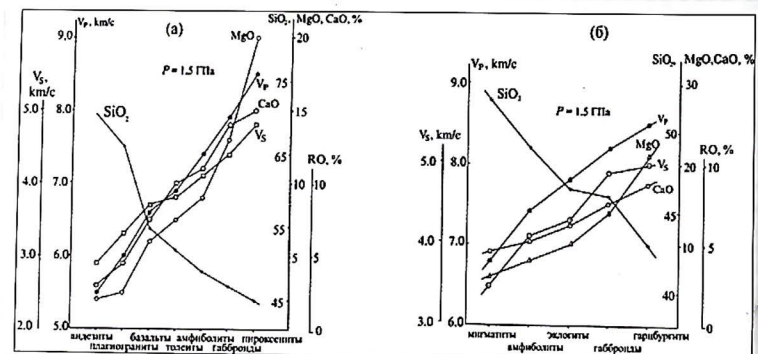


Рис. 4. Зависимости скорости продольных и поперечных волн в образцах горных пород о. Кипр (а) и Урала (б) от содержания в них кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), оксида магния ( $\text{MgO}$ ) и оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) при давлении 1,5 ГПа

ных  $V_s$  волн в породах хорошо коррелируется с изменением химического компонента  $\text{SiO}_2$ . В горных породах, имеющих повышенное содержание  $\text{SiO}_2$  в образце, наблюдается уменьшение скорости продольных и поперечных волн (рис. 4 а). Достаточно высокие значения скорости продольных и поперечных волн характерны для пород, содержащих повышенные компоненты  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$ , а высокие плотности — для пород с повышенным содержанием в образце  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  [8].

С увеличением содержания  $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$  в породе плотность также растет. Исследованные породы из этих регионов показывают, что по содержанию оксида железа они относятся ко второму типу зависимости, т.е. при понижении скорости упругих волн плотность возрастает [8].

К третьей группе можно отнести мантийные эклогиты из кимберлитовых трубок Сибири и базальтоиды Филиппинского моря. Зависимости скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн, а также плотности от химических компонентов мантийных эклогитов Сибири и базальтоидов Филиппинского моря при давлении 1,5 — 2,0 ГПа представлены на рис. 5 и 6.

Химический анализ мантийных эклогитов показывает, что среди этих пород выделяются два типа — троктолитовый и базальтовый [5, 12, 13]. Эклогиты троктолитового типа близки

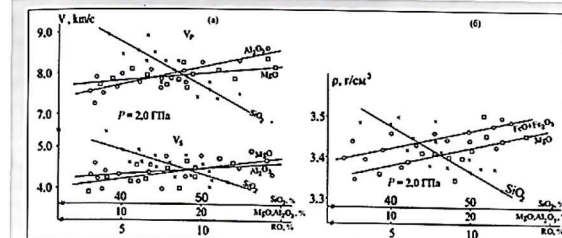


Рис. 5. Зависимости скорости продольных и поперечных волн (а), а также плотности (б) в мантийных эклогитах Якутии от содержания в них кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), оксида магния ( $\text{MgO}$ ), оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и оксида железа ( $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) при давлении 2,0 ГПа

Отметим, что в горных породах Урала, также как о.Кипр, на величину скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн, а также плотности влияют те же химические компоненты образцов. Причем наибольшее влияние на величину скорости упругих волн оказывает изменение содержания оксидов  $\text{SiO}_2$ ;  $\text{MgO}$ ;  $\text{CaO}$ , а на величину плотности —  $\text{FeO}$  и  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . При рассмотрении образцов Урала в части изменения скорости продольных  $V_p$  и поперечных  $V_s$  волн с давлением и сопоставлении их с химическим составом обнаружено, что увеличение содержания  $\text{SiO}_2$  в породе сопровождается уменьшением скорости упругих волн, а для  $\text{MgO}$  и  $\text{CaO}$  — зависимость прямо пропорцио-

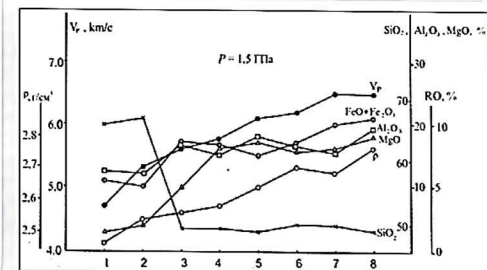


Рис. 6. Зависимости скорости продольных волн и плотности в базальтоидах Филиппинского моря от содержания в них кремнезема ( $\text{SiO}_2$ ), оксида магния ( $\text{MgO}$ ), оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) и оксида железа ( $\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$ ) при давлении 1,5 ГПа 1 — афировые базальты, 2 — андезитово-базальты, 3 — полифировые базальты, 4 — гламерпорфировые базальты, 5 — метабазальты, 6 — витрофировые базальты, 7 — порфир-афанитовые базальты, 8 — плагиоклазовые базальты

к различным габбро и троктолитам и отличаются более низкой щелочностью ( $N_a$  до 2 вес. %), высокой магнетизальностью ( $MgO/\Sigma FeO > 2$ ) и низким содержанием  $TiO_2$  — от 0,1 до 1 вес. %. По составу эколгиты базальтового типа близки к различным базальтам (плато базальтам, океаническим базальтам). В них  $Na_2O > 2$  вес. %, они богаче  $Ti_2O$  — до 7 вес. % и менее магнетизальны, чем эколгиты троктолитового типа.

Как видно из рис. 5, связь между значениями скоростей упругих волн и плотности от процентного содержания оксидов для мантийных эколгитов неоднозначна. С увеличением содержания кремнезема  $SiO_2$  скорости упругих волн  $V_p$  и  $V_s$  уменьшаются и возрастают с увеличением содержания  $MgO$  и  $Al_2O_3$ . Причем существенное влияние на величину скорости продольных волн оказывает изменение содержания  $Al_2O_3$ , а на величину скорости поперечных волн —  $MgO$  [8, 10]. Наблюдается аналогичная связь  $SiO_2$  и  $MgO$  с плотностью пород. Что касается оксидов железа, то, как отмечалось выше, железо относится ко второму типу зависимости скорости от плотности, а именно  $V_p = (1/\rho)$ , и, следовательно, при увеличении содержания  $FeO$  в горных породах величина скорости уменьшается, а плотность увеличивается. Как видно из графика, преимущественное влияние на увеличение плотности оказывает суммарное содержание  $FeO + Fe_2O_3$  [8].

Исследованные базальты были отобраны путем драгирования в Филиппинском море на глубинах от 4150 до 7400 м. Среди драгированных пород малоглубинными являются афировые базальты и андезит-базальты, а наиболее глубинными — витрофировые и плагиоклазовые базальты. Следует отметить, что среди океанических базальтов от малоглубинного афирового базальта до плагиоклазового наблюдается уменьшение содержания  $SiO_2$  и увеличение содержания  $MgO$ ;  $FeO$ ;  $Al_2O_3$  и  $TiO_2$  [4].

Такая вариация химического состава в исследованных образцах базальтоидов связана с изменением глубины их происхождения. Для них, как и для мантийных эколгитов, отмечается понижение скорости упругих волн и плотности с повышением содержания в породах  $SiO_2$  (рис. 6). С увеличением содержания в породах  $Al_2O_3$ ;  $MgO$  и  $FeO + Fe_2O_3$  скорость и плотность увеличиваются, и эта связь более однозначно проявляется

под давлением [8].

Следует обратить внимание на сложность при выяснении влияния  $FeO$  на горные породы. Если в породообразующих минералах при увеличении содержания  $FeO$  скорости понижаются, то при определении влияния  $FeO$  на скорости в горных породах эта закономерность не всегда очевидна, а для некоторых типов горных пород она носит обратный характер.

В целом, установление зависимостей между физическими параметрами и отдельными химическими компонентами горных пород при высоких термобарических условиях представляется важным не только для объяснения физико-химических процессов, происходящих в недрах Земли, но и для прогнозирования вещественного состава горных пород на больших глубинах.

### Выводы

1. На основе экспериментального изучения упругих и плотностных свойств горных пород континентальной и океанической литосферы выявлена качественная связь этих параметров с химическим составом при высоких термобарических условиях.

2. Выявлено, что в разрезе литосферы скорости упругих волн и плотность с глубиной растут при изменении химического состава горных пород: от кислого состава к средним до основного и, наконец, ультраосновного состава.

3. Установлено, что в исследованных горных породах влияние оксидов на величину скоростей упругих волн, а также плотности зависит от регионов, поэтому с повышением давления в одних районах они увеличиваются, а в других — понижаются. Такое явление объясняется различием в атомном строении вещества.

Авторы выражают благодарность Гараевой З.С. за помощь при подготовке статьи к печати.

### ЛИТЕРАТУРА:

1. Азизбеков Ш.Р., Багиров А.Р., Велиев-М.М., Исмаил-заде А.Д., Емельянова Е.Н., Мамедов М.Н. Геология и вулканизм Тальши. Баку, Элм, 1979, 246 с.
2. Волярович М.П., Байюк Е.И., Левыкин А.И., Томашевская И.С. Физические свойства горных пород и минералов при высоких давлениях и тем-

пературах. М., "Наука", 1974, 223 с.

3. Киреевкова С.М., Сафаров И.Б. Одновременное определение скоростей продольных и поперечных волн в горных породах при высоких давлениях. Изв. АН СССР, Физика Земли, 1979, №12, С. 93 — 98.

4. Лутц Б.Г. Геохимия океанического и континентального магматизма. М., "Недра", 1980, 247 с.

5. Лутц Б.Г. Химический состав континентальной коры и верхней мантии Земли. М., "Наука", 1975, 167 с.

6. Мушкин И.В. Петрология верхней мантии Южного Тянь-Шаня. Ташкент, Фаи, 1979, 136 с.

7. Петрофизика. Справочник в 3-х книгах. Книга 1: Горные породы и полезные ископаемые. Под ред. Н.Б. Дорзмана. М., "Недра", 1992, 391 с.

8. Сафаров И.Б. Аннотация упругих свойств горных пород при высоких термодинамических условиях и петрофизические модели литосферы. Дис. докт. геол.- минер. наук. Баку, ИГ НАНА,

2003, 447 с.

9. Сафаров И.Б. Петрофизические модели литосферных плит материков и океанов. Баку, "Элм", 2011, 306 с.

10. Сафаров И.Б. Петрофизические характеристики коровых и мантийных эколгитов при высоких термодинамических условиях и их положение в литосфере Земли. Изв. НАН, Науки о Земле, 2006, № 4, С. 31-43.

11. Сафаров И.Б., Киреевкова С.М. Устройство для определения упругих характеристик материалов. А.С. №1183885 (СССР), БИ 1985, № 37.

12. Соболев В.С., Соболев Н.В. Ксенолиты в кимберлитах Северной Якутии и вопросы строения мантии Земли. Докл. АН СССР, 1964, Т. 158, № 1.

13. Удовкина Н.Г. Эколгиты СССР. М., "Наука", 1985, 285 с.

14. Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле. М., "Наука", 1999, 55 с.

## İ.B. Səfərov, S.S. Əliyeva, U.S. İbrahimova YÜKSƏK TERMOBARİK ŞƏRAİTDƏ KİMYƏVİ TƏRKİBİN MATERİK VƏ OKEANLARIN LİTOSFERİNİN VƏ MANTİYANIN SÜXURLARININ FİZİKİ PARAMETRLƏRİNƏ TƏSİRİ

### XÜLASƏ

Kontinental və okeanik litosferin süxurlarının elastiki və sıxlıq xüsusiyyətləri 3.0 Gpa-dək təzyiqdə modifikasiyalı bərk fazalı qurğuda impuls ultrasəs üsulu ilə təyin olunmuşdur. Kontinental və okeanik litosferin süxurlarının elastiki və sıxlıq xüsusiyyətlərinin eksperimental öyrənilməsi əsasında bu parametrlərin yüksək termobarik şəraitdə nümunələrin kimyevi tərkibi ilə keyfiyyətli əlaqəsi aşkar edilmişdir. Müəyyən edilmişdir ki, oksidlərin uzununa və eninə dalğaların sürətinə, həmçinin tədqiq olunan süxurların sıxlığına təsiri ayrı-ayrı bölgələrdə müxtəlifdir.

## İ.B. Seferov, S.S. Aliyeva, U.S. Ibrahimova

### THE INFLUENCE OF CHEMICAL COMPOSITION ON THE PHYSICAL PARAMETERS OF ROCKS OF THE MANTLE AND LITHOSPHERE OF CONTINENTS AND OCEANS UNDER HIGH THERMOBARIC CONDITIONS

### ABSTRACT

The elastic and density characteristics of the rocks of the continental and oceanic lithosphere at pressures up to 3.0 GPa were determined on a modified solid-state setup using a pulsed ultrasonic method. Based on an experimental study of the elastic and density properties of rocks of the continental and oceanic lithosphere, a qualitative relationship between these parameters and the chemical composition of the samples under high thermobaric conditions is revealed. It is established that the effect of oxides on the velocity of longitudinal and transverse waves, as well as density in the studied rocks is not the same in different regions.