

УДК 551.14

А. П. ТАРКОВ, С. С. ЧАМО, Л. И. НАДЕЖКА

СТРОЕНИЕ КРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ КОРЫ И ПОДКОРОВОГО СЛОЯ
ВОРОНЕЖСКОГО МАССИВА ПО МАТЕРИАЛАМ ГЛУБИННОГО
СЕЙСМИЧЕСКОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

(Представлено академиком А. В. Сидоренко 13 VII 1970)

В результате ГСЗ, проведенного на Воронежском кристаллическом массиве в 1967—1968 гг., получена новая информация о физико-механических свойствах и строении кристаллической коры и подкорового слоя.

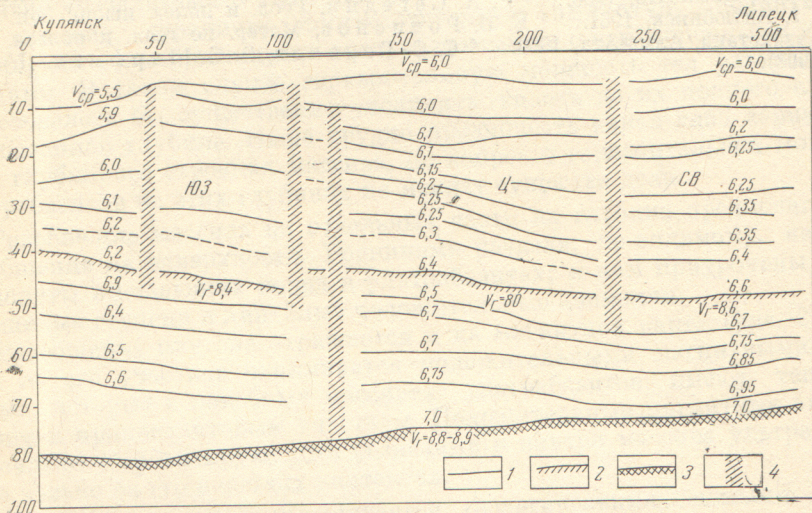


Рис. 1. Разрез ГСЗ по профилю Купьянск—Липецк. 1 — сейсмические границы, 2 — граница M_1 , 3 — граница M_2 , 4 — зоны дизъюнктивных нарушений

Анализ кинематических и динамических характеристик зарегистрированных регулярных волн позволил большинство глубинных волн отнести к классу отраженных (^{5, 6}). Преломленные слаборефрагированные волны характерны лишь для самой верхней части кристаллической коры. От границы Мохоровичича (M_1) и нижележащих горизонтов получены как отраженные докритические, так и преломленные волны. Особый интерес представляет наиболее глубокая подкоровая граница раздела M_2 , которая несогласна со всеми вышележащими границами, в том числе и с разделом M_1 . На отдельных участках профиля ГСЗ выделяется до 14—15 сейсмических границ (рис. 1), построенных в большей части случаев как отражающие границы.

Скоростные характеристики земной коры и подкорового слоя получены в результате обработки годографов докритических отраженных и головных волн. Отличительной особенностью земной коры Воронежской антеклизы является небольшая мощность осадочных отложений, измеряемая первыми сотнями метров. Средняя (расчетная) скорость в кристаллической коре до границы M_1 изменяется от 6,2 км/сек на юго-западе профиля до 6,6—6,7 км/сек близ Липецка. Средняя скорость на глубине 75—80 км (у границы M_2) равна 7,0 км/сек. Пластовые скорости (V_p) в консолидированной коре с глубиной плавно нарастают от 6,0—6,2 до 7,3—7,5 км/сек у границы M_1 (рис. 2а). В подкоровом слое пластовые

скорости продолжают увеличиваться, достигая на глубине 70—75 км в юго-западной части профиля значений 8,5 км/сек, на северо-востоке 8,9 км/сек. Для профиля ГСЗ в целом характерно увеличение средней, пластовой и граничной скоростей с юго-запада на северо-восток, что отражает, по-видимому, общую тенденцию увеличения жесткости корового и мантийного материала в указанном направлении.

На профиле ГСЗ через Воронежский массив видно блоковое строение. Выделяется три блока (см. рис. 1): юго-западный (ЮЗ), центральный (Ц) и северо-восточный (СВ), различающиеся глубинным строением, числом сейсмических границ и характером изменения скоростей. Блоки разделены зонами глубинных разломов, которые отражаются в волновых картинах сейсмических записей (различное затухание глубинных волн, сдвиги осей синфазности по времени и образование дифрагированных волн).

Предполагая непрерывное изменение скорости с глубиной и используя эмпирическую зависимость между скоростью (V_p) и плотностью (ρ) (⁴), мы построили графики зависимости пластовой скорости и плотности от глубины: $V_p(z)$ и $\rho(z)$.

После аппроксимирования графиков $V_p(z)$ и $\rho(z)$ прямолинейными отрезками в глубинном разрезе региона выделено 4 слоя (рис. 2б). Границы слоев, установленные по изломам графиков $V_p(z)$ и $\rho(z)$, соответствуют качественным изменениям составов. Минеральные парагенезисы устойчивы в пределах всего лишь одного какого-нибудь слоя.

Два верхних слоя — I и II образуют кристаллическую кору, подстилаемую высокоградиентным слоем III, к которому приурочена граница M_1 . Высокоградиентный слой на глубинах 45—55 км переходит в подкоровый слой верхней мантии. Мощность и физико-механические характеристики глубинных слоев претерпевают заметные изменения вдоль профиля ГСЗ, отражая различия глубинного строения, существующие в западных и восточных районах Воронежского кристаллического массива. Общее увеличение пластовых скоростей с юго-запада на северо-восток коррелирует с усилением воздействия регионального метаморфизма. В этом же направлении уменьшается силикация коры и сокращается мощность верхнего слоя. Мощность консолидированной коры увеличивается с юго-запада на северо-восток с 38 до 50 км (рис. 1). Вдоль профиля ГСЗ происходит перестройка структуры коры. Мощность верхнего слоя консолидированной коры (слой I) закономерно уменьшается с юго-запада на северо-восток от 25 до 45 км, а мощность нижнего слоя коры (слой II), наоборот, в указанном направлении увеличивается с 10 до 23 км. Слой III более резко выражен в структуре юго-западного и центрального блоков, где его мощность оценивается в 10—11 км. Для северо-восточного блока характерен менее резкий переход от коры к верхней мантии. При этом мощность слоя III увеличивается примерно в 1,5 раза, а в структуре верхней мантии выделяется два подкоровых слоя — IVa и IVб (рис. 2б).

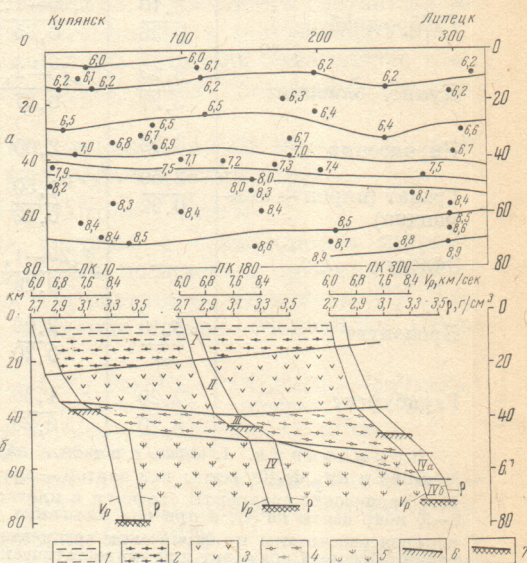


Рис. 2. Разрез пластовых скоростей (а) и минералого-петрологическая модель земной коры и подкорового слоя (б) Воронежского кристаллического массива. 1—5 — фации: 1 — зеленых сланцев, 2 — амфиболитов, 3 — основных (пироксеновых) гранулитов, 4 — чарнокитов (парагенезис пироксенов, алмандин и плагиоклаза), 5 — эклогитов; 6 — граница M_1 ; 7 — граница M_2

Таблица 1

Минералы, породы	Барические производные скорости $(\partial V_p / \partial p)_T$ и плотности $(\partial \rho / \partial p)_T$			Вертикальные градиенты скорости $(\partial V_p / \partial z)$ и плотности $(d\rho / dz)$		
	2—6 кбар	6—10 кбар	10—20 кбар	5—20 км	20—35 км	35—70 км
Гранит, гранодиорит	$\frac{4,25}{0,52}$	$\frac{2,00}{0,48}$	—	$\frac{1,28}{0,16}$	$\frac{0,60}{0,14}$	—
Габбро-диабаз	$\frac{2,10}{0,36}$	$\frac{1,25-1,75}{0,35}$	—	$\frac{0,63}{0,108}$	$\frac{0,38-0,53}{0,105}$	—
Дунит, оливинит	$\frac{3,45}{0,27}$	$\frac{1,75-2,25}{0,27}$	$\frac{0,90}{0,20}$	$\frac{1,04}{0,08}$	$\frac{0,53-0,68}{0,08}$	$\frac{0,27}{0,06}$
Пироксенит	$\frac{3,50}{2,50}$	$\frac{2,00}{1,50}$	1,00	$\frac{1,05}{0,75}$	$\frac{0,60}{0,45}$	$\frac{0,30}{—}$
Гранат (пироп + альмандин)	$\frac{0,22}{0,22}$	$\frac{1,50}{0,22}$	—	$\frac{0,066}{0,066}$	$\frac{0,066}{0,066}$	—
Эклогит	—	$\frac{1,25-1,75}{0,29}$	—	—	$\frac{0,38-0,53}{0,087}$	—
Бронзитит	$\frac{3,10}{—}$	$\frac{2,00}{0,20}$	$\frac{1,30}{0,3}$	$\frac{0,93}{—}$	$\frac{0,60}{0,06}$	$\frac{0,39}{0,09}$
Гарцбургит	$\frac{2,20}{0,20}$	$\frac{1,30}{0,20}$	$\frac{1,30}{0,20}$	$\frac{0,66}{0,06}$	$\frac{0,39}{0,06}$	$\frac{0,39}{0,06}$

Примечания. I. Здесь и в табл. 2 над чертой приведены значения $(\partial V_p / \partial p)_T \cdot 10^5$ км/сек·бар и $dV_p / dz \cdot 10^2$ сек⁻¹; под чертой — значения $(\partial \rho / \partial p)_T \cdot 10^6$ г/см³·бар и $d\rho / dz \cdot 10^2$ г/см³·км. II. Барические градиенты скорости и плотности для минералов и пород в интервале давлений 2—10 кбар взяты из (8), а при более высоких давлениях из (2). III. dV_p / dz и $d\rho / dz$ для минералов и пород рассчитаны по барическим градиентам обоих параметров без учета температурной поправки. Средний градиент для гидростатически уравновешенной Земли принят 300 бар/км.

В каждом выделенном слое V_p и ρ не остаются постоянными, а увеличиваются от кровли к подошве с постоянными градиентами $(dV_p / dz$ и $d\rho / dz)$ (рис. 2б). Последние возрастают от слоя к слою, достигая максимальных значений в переходном слое (табл. 1).

Таблица 2

Провинция	Вертикальные градиенты скорости и плотности
Воронежский кристаллический массив	$\frac{1,00-2,00}{0,20-0,65}$
Слой I	$\frac{2,40-4,50}{0,825-1,40}$
Слой II	$\frac{8,25-11,8}{2,20-3,18}$
Слой III	$\frac{1,45-2,20}{0,33-0,50}$
Слой IV	$\frac{0,50}{—}$
Провинция «Верхнее озеро» (Канадский щит). Верхи мантии (9)	$\frac{5,0-6,0}{—}$
Обобщенные данные	$\frac{1,0}{—}$
Нижняя часть земной коры (8)	$\frac{—}{—}$
Верхи мантии (8)	$\frac{—}{—}$
Верхняя мантия (10)	$\frac{0,0264}{—}$

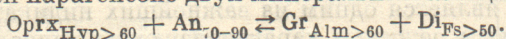
Вертикальные градиенты скорости и плотности в коре и подкоровом слое на порядок, а в переходном слое (III) на 1,5—1,7 порядка превышают значения для различных минералов и пород, вычисленные по барическим градиентам $(\partial V_p / \partial p)_T$ и $(\partial \rho / \partial p)_T$, измеренным в диапазоне давлений 6—20 кбар. Различие будет еще более значительным, если учесть эффект от увеличения температуры. Вертикальные градиенты dV_p / dz и $d\rho / dz$, приводимые в некоторых региональных сводках по ГСЗ (9) и в работах общетеоретического характера (6, 10) для на-

дастеносферной части верхней мантии, в среднем на 0,5—1,0 порядка ниже значений, наблюдаемых в подкоровом слое Воронежского кристаллического массива (табл. 1 и 2).

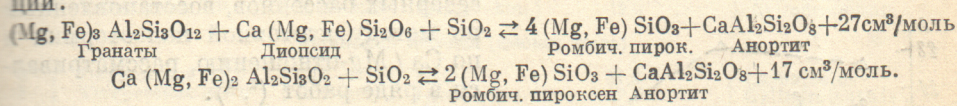
Верхний слой по величине физико-механических параметров наилучшим образом соответствует минеральным парагенезисам низких и средних ступеней метаморфизма — фациям зеленых сланцев, эпидот-амфиболитовой и амфиболитовой (¹). Последние на территории массива представлены разнообразными по составу кристаллическими сланцами, метапесчаниками, гнейсами, гранито-гнейсами, амфиболитами, мигматитами.

В пределах нижнего слоя коры (II) пластовые скорости изменяются от 6,3 км/сек у кровли до 7,05 км/сек на подошве, а плотность соответственно от 2,85 до 3,12 г/см³. Приведенные значения V_p и ρ позволяют предположить, что в нижней половине земной коры устойчив парагенезис глиноземистых пироксенов и плагиоклаза, образующих гранулит-базитовые ассоциации (пироксеновые гранулиты (³)).

Для высокоградиентного слоя (III), расположенного между мантией и корой, характерен парагенезис двух минеральных ассоциаций:



Подобные пироксеновые основные составы с алмандином широко распространены в глубинных докембрийских комплексах древних щитов и известны в геологической литературе под названием чарнокиты (⁷). Для образования граната принципиальное значение имеют следующие реакции:



Изменение мольных объемов в соответствии с приведенными химическими реакциями и перепад плотности в пределах высокоградиентного слоя (см. рис. 26) практически одинаковы и равны 10—13 %.

Подкоровой слой образован эклогитоподобными породами, состоящими из пироксенов и граната. Образование гранатосодержащих фаций в подкоровой части верхней мантии следует связывать с развитием прогрессивного метаморфизма, преобразовавшего гранулитовые составы древней коры (⁷). Граница M_2 в основании подкорового слоя, кардинально влияющая на региональную структуру поля силы тяжести, рассматривается как современный фронт метаморфизма. Распределение физико-механических параметров в подкоровом слое свидетельствует о том, что соотношение между основными минералами — пироксенами и гранатом не остается постоянным, а изменяется в соответствии с термодинамическими условиями.

В заключение отметим, что аномально высокие значения градиентов dV_p / dz и $d\rho / dz$, полученных для кристаллической коры и подкорового слоя Воронежского кристаллического массива, не могут быть объяснены нормальной сжимаемостью минералов (табл. 1) и, по-видимому, отражают фазовые изменения, связанные с перегруппировкой минеральных ассоциаций. Последние испытывают изменения не только при переходе от слоя к слою, но также и в пределах выделенных слоев.

Воронежский государственный университет
им. Ленинского Комсомола

Поступило
9 VII 1970

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

- ¹ В. В. Белоусов, Сов. геология, № 4 (1965). ² Н. Е. Галдин, ДАН, 182, № 3 (1968). ³ Д. Х. Грин, А. Э. Рингвуд и др. Петрология верхней мантии, М., 1968. ⁴ Н. Б. Дортман, М. Ш. Магид, Геология и геофизика, № 4 (1969). ⁵ А. В. Егоркин, Физика Земли, № 11 (1968). ⁶ И. П. Косминская, Метод глубинного сейсмического зондирования земной коры и верхов мантии, 1968. ⁷ А. А. Маркушев, XXII сессия Международн. геол. конгр., 1966. ⁸ Справочник физических констант горных пород, М., 1969. ⁹ P. N. S. O'Brien, J. Geophys. Res., 73, № 8 (1968). ¹⁰ K. E. Bullen, R. A. W. Haddon, Nature, 213, № 5076, (1967).