

Плотность магматических, ультраметаморфических пород Украинского щита в модельных глубинных условиях земной коры (экспериментальные данные)

В.А. Корчин, П.А. Буртный, Е.Е. Карнаухова, 2020

Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 1 июня 2020 г.

Анализ материалов геофизических исследований с привлечением данных о физических свойствах горных пород на различных глубинах способствует более обоснованному пониманию строения горизонтов земной коры, не доступных бурению. В этом аспекте успешным является предложенный нами метод петрофизического термобарического моделирования (ПТБМ). В основе построений лежит сопоставление (с учетом поверхностной геологии, материалов ГСЗ и гравиметрии) с экспериментальными данными об изменении физических параметров горных пород (в частности, скорости распространения упругих продольных волн, $V_p=f(H)$, и плотности, $\rho=f(H)$) в PT -условиях, соответствующих термобарическим глубинным режимам земной коры исследуемых регионов. Как продолжение изучения упругоплотностных характеристик горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах представлены результаты экспериментальных исследований изменения плотности магматических и ультраметаморфических пород. Последние развиты практически повсеместно на территории Украинского щита, чаще всего встречаются в виде обширных блоков и массивов мощностью до нескольких десятков километров. Нашими многолетними исследованиями убедительно показано, что в условиях больших глубин на зависимости V_p и ρ существенно влияет температура. Согласно экспериментам, эти параметры изменяются по нелинейным законам с проявлением на зависимостях с глубиной максимумов и минимумов. При программных, одновременно действующих на минеральное вещество давлениях и температурах, соответствующих интервалу глубин земной коры 5—20 км, выявлены зоны инверсии скорости распространения упругих волн в породах и их плотности, подобно обнаруженным методами ГСЗ в земной коре зон низких скоростей (ЗНС), которые сопровождаются разуплотнением пород. Как и зоны низких сейсмических скоростей, горизонты пониженной плотности (по экспериментальным данным) чувствительны к температурным режимам земной коры. С повышением глубинного теплового потока уменьшается плотность пород, активизируется способность пород к разуплотнению, увеличивается их проницаемость и гигроскопичность, что приводит к более интенсивному процессу перемещения флюидов. Подобные коровые аномалии необходимо учитывать при уточнении зависимости $V_p=f(\rho)$ на различных глубинах (наиболее важное отношение при сейсмогравитационном моделировании и ПТБМ). В большинстве случаев эта связь для всех разновидностей пород на определенных глубинах далека от линейной, как часто ее представляют. Прежде всего, это объяснимо сложными зависимостями упругих и плотностных характеристик горных пород с глубиной. Материалы экспериментального изучения упругоплотностных характеристик магматических и ультраметаморфических пород Украинского щита в модельных глубинных условиях земной коры используются для петрофизического термобарического моделирования участков глубинных горизонтов земной коры различных регионов планеты.

Ключевые слова: плотность пород, термодинамическое разуплотнение, давление, температура, «скорость—плотность», петрофизическое термобарическое моделирование.

Введение. Многочисленными исследованиями изменения упругих параметров пород в условиях программных высоких давлений (P) и температур (T) показано, что для различных групп магматических и метаморфических пород Украинского щита (УЩ) скорости имеют сложные зависимости их изменения с глубиной ($V_{P,S}=f(PT)$). В интервале P и T , соответствующих глубинам 5—20 км, выявлены зоны низких скоростей (ЗНС) [Корчин, 2011, 2014, 2015; Корчин и др., 2013, 2018]. В этих работах основное внимание уделялось — изучению изменения скоростных характеристик горных пород и недостаточное — изучению плотности пород в различных термодинамических условиях опытов. Настоящая статья является продолжением представленных ранее результатов экспериментальных исследований изменения плотности метаморфических пород при высоких давлениях и температурах, соответствующих PT -условиям земной коры УЩ до 30—40 км [Корчин, 2011, 2014, 2015; Корчин и др., 2018]. Для экспериментальных исследований в течение многих лет на территории УЩ отбиралась представительная коллекция соответствующих пород в количестве несколько тысяч образцов. Обычно для всей коллекции первоначально необходимые физические параметры измерялись при атмосферных условиях. Образцы сортировались по структурно-петрографическим признакам. Затем каждый 10—20-й образец изучался в условиях высокого гидростатического давления, далее каждый 5—10-й из них при PT -параметрах [Лебедев, 1986, 1989; Корчин, 2013а, б]. В данной работе представлены в основном результаты изучения $\rho=f(PT)=f(H)$ большинства типов различных комплексов магматических пород и ультраметаморфических образований, которые повсеместно распространены в пределах УЩ и значительно превышают по площади и глубине развития ранее изученные метаморфические породы [Щербаков, 2005; Буртный и др., 2013; Кировоградский..., 2013; Корчин и др., 2018]. Материалы по петрофизическому

термобарическому моделированию, полученные на основе сейсмических исследований, показали, что массивы гранитов помимо широкого площадного развития могут иметь значительную мощность и распространяться на большие глубины. Это обстоятельство обусловило необходимость проведения экспериментальных исследований по изучению изменения упругоплотностных параметров таких пород с глубиной.

Аппаратурно-методические вопросы проведения исследований и определение изменения плотности пород с глубиной представлены в ранее опубликованных материалах [Лебедев, 1986, 1989; Корчин и др., 2018]. В условиях высокого давления и температуры плотность пород определяется как

$$\rho_{PT} = f(PT) = f(H) = \rho_0 / (1 - V_{PT}),$$

где V_{PT} — изменение объема образца породы при P и T , полученных в ходе эксперимента. Здесь лишь отметим, как рассчитывается объемное изменение образца породы в камере при высоком давлении и температуре. Для этого используется соотношение, по которому $V_{PT} = V_0 - \Delta V$ рассчитывается:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \frac{1}{V_0} \left\{ \frac{\Delta L_{\Sigma} - \Delta L_{II}}{L_{0\Sigma}} V_{\Sigma} - C_2 V_Y - K S_0 [L_{0\Sigma} - (\Delta L_{\Sigma} - \Delta L_N)] \right\},$$

где $L_{0\Sigma}$ — суммарная длина образца и уплотнителя в камере вдоль ее оси; ΔL_{Σ} — суммарная деформация, регистрируемая часовыми индикаторами; V_{Σ} — общий объем всей системы (образец, уплотнитель, кольца) при атмосферном давлении; V_Y — объем уплотнителя при атмосферном давлении; ΔL_{II} — деформация поршней; C_2 — удельная объемная деформация уплотнителя, K — коэффициент радиальной деформации камеры. Значения удельной объемной деформации уплотнителя C_2 (свинца, пирофиллита) были рассчитаны

на основании экспериментальных данных. Относительная погрешность вычисления удельной объемной деформации пород, а следовательно, и их плотности в свинцовой оболочке при высоких PT -параметрах не более 2 %.

Настоящие исследования $\rho=f(H)$ дополняют и уточняют ранее известные данные о зависимости скорость—плотность ($V_p=f(\rho)$) на различных глубинах, которые широко используются при петрофизическом и сейсмогравитационном моделировании в геофизике.

Объекты исследований. Минеральный состав магматических и ультраметаморфических пород довольно разнообразный — от кислых и средних разностей (граниты, гранодиориты, диориты) до основных и ультраосновных (габбро, лабрадориты, пироксениты), а наиболее распространенными среди них являются гранитоиды.

В состав коллекции образцов, отобранных для исследований, вошли прежде всего породы, образующие крупные массивы в пределах центральной части УЩ. Это граниты кировоградского, новоукраинского комплексов, граниты рапакиви и анортозиты Корсунь-Новомиргородского плутона.

Рассматривая особенности образования комплексов пород УЩ, И.Б. Щербаков [Щербаков, 2005] указывал на наличие гранулитового фундамента в коре Ингулецкого и Среднеприднепровского мегаблоков, на котором залегают более молодые комплексы. В связи с этим в коллекции представлены породы гранулитовой фации метаморфизма, в частности эндербиты и основные гранулиты. Эти образования наиболее развиты в пределах Подольского блока УЩ, где они совместно с метаморфическими породами образуют изометричные купольные структуры и которые, согласно данным ГСЗ и петрофизического моделирования, могут входить в состав коры центральной части УЩ. Кроме этого, для исследований отобраны плагиограниты днепропетровского комплекса, слагающие фундамент Среднего Приднепровья и западно-ингулецкую часть Ингульского

блока, где они образуют крупные куполовидные и овальные положительные структуры.

Граниты кировоградского комплекса. В состав комплекса входят порфирированные граниты и ассоциирующие с ними равномернозернистые разности, различающиеся между собой только содержанием порфирированных микроклина (табл. 1).

В пределах центральной части УЩ помимо небольших тел, развитых среди гнейсов ингуло-ингулецкой серии, большей частью сложенных среднезернистыми гранитами, граниты кировоградского комплекса образуют крупные массивы (Кировоградский, Долинский), в составе которых преобладают порфирированные и в меньшей степени равномернозернистые разности.

Представители комплекса, исследованные в условиях высоких давлений и температур, отобраны из керна неглубоких скважин, пробуренных на отдельных участках в небольших телах равномернозернистых гранитов и в пределах Долинского массива (порфирированные граниты). Кроме того, отобраны образцы пород из керна глубокой скважины СГ-3000, которая вскрывает мощную (до 3 км) толщу порфирированных мигматитов с прослоями гнейсов, гнейсовидных и пегматоидных гранитов.

В состав коллекции также вошли порфирированные граниты, отобранные из карьера в пределах Кировоградского массива (см. табл. 1). Это серые крупнозернистые порфирированные породы с гипидиоморфной структурой основной массы. Ассоциирующие с ними равномернозернистые разности имеют гипидиоморфнозернистую (гранитовую) структуру, аналогичный порфирированным гранитам минеральный состав и отличаются от последних образований отсутствием порфирированных микроклина. Главными породообразующими минералами этих пород являются плагиоклаз (16,5—47,4 %), микроклин (4,4—57,5 %), кварц (5,9—49,3 %), биотит (1,6—18,3 %), акцессорные — апатит, циркон, рудный минерал (0,2—3,3 %). В некоторых равномернозернистых разностях встречается пироксен (до 2,8 %). Породы в разной сте-

Т а б л и ц а 1. Скорости упругих продольных волн, плотность, их расчетные значения и минеральный состав гранитов кировоградского комплекса

Номер образца	Место отбора	ρ , г/см ³	V_{P_1} , км/с	Минеральный состав					$\rho_{расч}$, г/см ³	$V_{P_{расч}}$, км/с
				Пл	КПШ	Кв	Би	Акц		
<i>Граниты равномернозернистые</i>										
2374/428	Демешково	2,592	5,57	16,5	50,7	30,6	1,6	0,6	2,614	6,05
2564/222	Демешково	2,596	5,32	33,6	40,8	23,5	1,8	0,3	2,619	6,08
2009/385	Покровка	2,62	5,59	39,5	2,3	49,3	8,7	0,2	2,671	6,04
1396/348	Лозоватка	2,63	5,93	30,0	35,8	30,2	3,5	0,5	2,635	6,06
1314/274	Черняховка	2,631	5,86	21,3	46,9	23,9	5,7	2,2	2,661	6,07
1325/192	Покровка	2,648	5,88	30,0	27,4	36,7	4,7	1,2	2,659	6,07
2012/484	Покровка	2,65	5,59	39,5	2,3	49,3	8,7	0,2	2,686	6,01
<i>Граниты порфировидные</i>										
28/80	Кировоград	2,640	5,65	29,3	51,5	10,2	7,7	1,3	2,646	6,04
28/77	Кировоград	2,643	5,80	18,1	57,6	13,5	9,7	1,1	2,641	5,99
28/79	Кировоград	2,700	6,24	23,3	45,9	19,8	9,5	1,5	2,656	6,02
1170	СГ-3000	2,700	6,24	47,4	15,3	25,6	10,5	1,2	2,681	6,06
2781	СГ-3000	2,700	5,65	44,8	4,4	32,7	16,3	1,8	2,713	6,02
2600/148	Долинская	2,703	6,06	34,5	23,6	26,9	13,1	1,9	2,689	6,03
2595/165	Долинская	2,703	5,68	21,2	33,7	32,5	10,9	1,7	2,674	6,01
1962	СГ-3000	2,710	5,15	45,1	17,8	14,9	18,3	1,6	2,641	5,86

Т а б л и ц а 2. Скорости упругих продольных волн, плотность, их расчетные значения и минеральный состав гранитов новоукраинского комплекса

Номер образца	Место отбора	ρ , г/см ³	V_{P_1} , км/с	Минеральный состав						$\rho_{расч}$, г/см ³	$V_{P_{расч}}$, км/с
				Пл	КПШ	Кв	Би	Гр	Акц		
1556/49	Боковянск.	2,646	5,68	29	35,8	31,2	3,5	—	0,5	2,635	6,06
1547/53	Боковянск.	2,652	6,01	30,8	36,3	30,1	2	—	0,8	2,635	6,08
27/76	НУ, центр	2,664	5,59	32,7	28,3	34,9	3,8	—	0,3	2,639	6,06
2029/421	НУ, восток	2,666	5,94	39,5	2,3	49,3	8,7	—	0,2	2,671	6,04
52-83/293	НУ, запад	2,675	6,40	24,9	49,5	15,8	8,5	0,2	1,1	2,639	6,00
60-83/351	НУ, запад	2,680	6,24	35,7	16,8	37,2	9,2	—	1,1	2,672	6,04
1385/181	НУ, центр	2,690	5,81	56,5	15,5	16,3	7,4	2,1	2,2	2,631	6,01

Примечание: Боковянск. — Боковянский массив, НУ – Новоукраинский массив.

пени подвержены процессам динамометаморфизма, выраженным в частичном или интенсивном дроблении главных минералов. В зонах интенсивного дробления пород часто развивается хлорит и минералы группы эпидота.

Граниты новоукраинского комплекса образуют несколько крупных массивов (Новоукраинский, Чигиринский) и слагают более мелкие тела, такие как Боковянский и Верблюжский (табл. 2).

Рассматривая гранитоиды, следует отметить, что представители кировоградского и новоукраинского комплексов, несмотря на то, что они близки как по составу, так и по времени формирования, различаются между собой по условиям образования. По определению И.Б. Щербакова [Щербаков, 2005] присутствие гнейсов в кировоградских гранитах в виде скиалитов с постепенными переходами к гранитам характеризует их как автохтонные (обра-

зованные на месте их залегания). В то же время присутствие гнейсов в виде четко ограниченных ксенолитов в новоукраинских гранитах, а также наличие в пределах массива тел ассоциирующих с ними чарнокитов свидетельствует о более глубоких условиях их образования и аллохтонном залегании.

Образцы новоукраинских гранитов были отобраны из керна скважин, пробуренных в пределах западной и восточной частей Новоукраинского массива, а также из карьера в его центральной части. В группу также включены образцы пород, отобранные из керна скважин, пробуренных в пределах Боковьянского массива.

Породы характеризуются порфировой структурой, обусловленной наличием неравномерно расположенных порфириобластов калиевого полевого шпата (микроклина). Структура основной массы гипидиоморфнозернистая. Сложены плагиоклазом (24,9—56,5 %), микроклином (2,3—49,5 %), зернами кварца (15,8—36,2 %), чешуйками биотита (0,3—9,2 %), акцессорными минералами — апатитом, цирконом, рудным (0,2—2,2 %). В некоторых шлифах встречается гранат (0,2—2,1 %). Породы Новоукраинского массива в различной степени катаклазированы. Более катаклазированы породы, отобранные в восточной части

массива. В зонах дробления главных минералов иногда встречается эпидот.

Породы корсунь-новомиргородского комплекса слагают одноименный pluton в центральной части УЩ, который на 75—80 % сложен гранитоидами, в меньшей степени основными породами (табл. 3).

Гранитоиды в основной своей массе — это рапакиви и рапакививидные граниты, отобранные из карьеров и керна скважин, пробуренных в восточной и западной частях плутона. Это крупнозернистые порфириовидные породы, состоящие из крупных овоидов микроклина и гипидиоморфнозернистой основной массы, сложенной плагиоклазом (11,3—29,9 %), микроклином (33,7—65,0 %), кварцем (11,5—32,8 %) и биотитом (0,7—10,9 %). Иногда в шлифах встречается роговая обманка (0,1—7,0 %), пироксен (0,1—1,2 %), акцессорные — циркон, апатит, рудный минерал (0,1—2,3 %). Вторичные изменения проявляются в виде хлоритизации темноцветных минералов, серицитизации и карбонатизации плагиоклаза, пелитизации микроклина (табл. 3). В образцах восточной части, в отличие от западной, отчетливо проявляется катаклаз гранитов.

Породы основного состава на поверхности фундамента Корсунь-Новомиргородского плутона образуют несколько масси-

Т а б л и ц а 3. Скорости упругих продольных волн, плотность, их расчетные значения и минеральный состав пород корсунь-новомиргородского массива

Номер	Номер образца	Место отбора	ρ , г/см ³	V_p , км/с	Минеральный состав							$\rho_{расч}$, г/см ³	$V_{расч}$, км/с
					Пл	КПШ	Кв	Би	Пир	Амф	Акц		
1	1/4	Корсунь-Шевченковский	2,640	5,44	16,1	63,8	11,5	4,6	—	2,8	1,2	2,639	6,07
2	2607/442	Капитановка	2,640	5,82	21,2	33,7	32,5	10,9	—	—	1,7	2,674	6,01
3	5/13	Искровка	2,644	6,30	23,1	45,6	23,5	2,0	—	3,5	2,3	2,668	6,15
4	1/1	Корсунь-Шевченковский	2,651	6,25	11,3	65,0	18,2	2,0	—	2,5	1,4	2,635	6,09
5	5/15	Искровка	2,664	6,37	15,0	48,9	32,8	2,1	—	0,8	0,4	2,623	6,05
6	38-82/315	Марьевка	2,667	6,10	28,0	47,5	23,6	0,7	—	0,1	0,1	2,614	6,07
7	2/5	Городище	2,670	5,64	21,6	40,5	27,6	6,4	—	3,6	0,3	2,653	6,05
8	39-82/135	Марьевка	2,720	6,13	29,9	35,9	23,1	2,0	1,2	7,0	0,9	2,672	6,18
9	29/84	Каменка	2,761	6,73	80,4	—	2,0	2,3	13,7	—	1,6	2,753	6,66
10	38/13	Каменка	2,804	6,40	84,0	—	2,9	2,3	4,6	—	6,2	2,791	6,40
11	30-82/157	Новомиргород	2,821	6,46	91,6	—	—	0,3	7,2	—	0,9	2,797	6,51

Примечание: 1—8 — граниты рапакиви; 9—11 — анортозиты

вов, которые на 70—80 % сложены анортозитами. Это крупнозернистые породы гипидиоморфнозернистой структуры, в которой основным породообразующим минералом (74—91,6 %) является плагиоклаз (лабрадор). В незначительном количестве присутствует пироксен (3,2—11,1 %), биотит (0,3—6,5 %), кварц (1,0—6,5 %), иногда встречается амфибол (0,9—4,8 %), акцессорные — рудный минерал, апатит (0,9—4,1 %). Вторичные изменения наблюдаются в виде серицитизации плагиоклаза, амфиболизации и биотитизации пироксена, хлоритизации биотита.

Гранитоиды днепропетровского комплекса развиты в основном в Среднеднепровском мегаблоке. Это коровые образования, сформированные в результате длительной многоэтапной переработки более древнего фундамента в период заложения и развития зеленокаменных структур. Породы комплекса развиты также в восточной части Ингулецкого мегаблока, отделенной от его основной части Западно-Ингулецкой зоной разлома. В состав коллекции вошли диориты и плагиограниты (табл. 4).

Диориты, отобранные в районе г. Днепр, локализованы в виде отдельных комформных тел в пределах гранитогнейсово-мигматитовой толщи днепропетровского комплекса. Структура пород гипидиоморфнозернистая. Основную массу породы составляют таблитчатые, призматические зерна плагиоклаза (59—66 %), полисинте-

тически сдвойникованные, иногда зонального строения. В меньшем количестве (11—12 %) в виде удлиненных призматических зерен присутствуют роговая обманка и чешуйки биотита (7—9 %). Ксеноморфный кварц (10—12 %) часто корродирует зерна плагиоклаза и темноцветных минералов. Акцессорные минералы (2—5 %) представлены рудным, апатитом, цирконом.

Среди плагиогранитов выделяется несколько групп, отличающихся по возрасту и районам развития. Более детальная характеристика этих пород приведена в ранее опубликованной работе [Корчин, Буртный, 2011]. Отобранные образцы плагиогранитов являются представителями собственно днепропетровского комплекса (днепропетровские плагиограниты). Образцы, отобранные в западной части района — это представители саксаганского комплекса (саксаганские плагиограниты), а в восточной части Ингулецкого мегаблока выделены в группу ингулецких плагиогранитов.

Исследованные плагиограниты довольно близки по минеральному составу. Это среднезернистые породы гипидиоморфнозернистой структуры, обусловленной наличием таблитчатых, призматических форм плагиоклаза (53—58 %), ксеноморфного кварца (21—29 %) и чешуек биотита (9—13 %). Иногда встречаются отдельные зерна роговой обманки (до 6 %), микроклина (до 7 %). В некоторых образцах плагиогранитов Западно-Ингулецкой зоны

Т а б л и ц а 4. Скорости упругих продольных волн, плотность, их расчетные значения и минеральный состав пород днепропетровского комплекса

Номер	Номер образца	Место отбора	ρ , г/см ³	V_p , км/с	Минеральный состав							$\rho_{расч}$, г/см ³	$V_{расч}$, км/с
					Пл	КПШ	Кв	Би	Пи	Амф	Акц		
1	2588/212	Гуровка	2,674	5,74	33,6	40,8	23,5	1,6	—	—	0,3	2,619	6,07
2	40/192	Кривой Рог	2,700	5,98	53,0	—	30,2	12,4	2,5	—	1,9	2,747	6,02
3	241/191	Кривой Рог	2,713	5,96	46,7	—	31,8	18,7	1,0	—	1,8	2,727	6,00
4	291Б	Старые Кайдаки	2,722	5,76	60,8	0,6	24,0	9,5	2,5	—	2,6	2,725	6,17
5	2574/270	Гуровка	2,737	5,74	53,6	14,1	32,0	10,0	—	—	0,8	2,755	6,07
6	32/122	Ямбург	2,763	6,06	71,2	0,5	10,4	5,7	—	10,5	1,7	2,742	6,29
7	32/121	Ямбург	2,784	6,12	68,9	—	11,3	7,5	0	9,4	2,9	2,76	6,29

Примечание: 1—5 — плагиограниты; 6, 7 — диориты.

можно наблюдать интенсивный процесс микроклинизации, выразившийся в присутствии крупных зерен калиевого полевого шпата (до 31 %), содержащего реликты плагиоклаза. В этих же разностях имеет место частичное дробление главных породообразующих минералов. Из вторичных минералов присутствует эпидот, который развивается вдоль трещин или полос дробления или совместно с хлоритом по биотиту. Акцессорные представлены апатитом, рудным минералом, иногда цирконом, сфеном. Таким образом, в коллекцию вошли образования, слагающие верхние горизонты коры рассматриваемого региона, а именно: диориты, плагиограниты днепропетровские, саксаганские, ингулецкие.

Наиболее многочисленной и разнообразной по составу и структурным особенностям является группа *чарнокитоидов*, представители которой, в частности эндербиты и основные гранулиты, составляют более древний гранулитовый фундамент УЩ (табл. 5).

Большая часть пород отобрана из карьеров на территории Подольского блока и Среднего Побужья (где они имеют наибольшее развитие) и частично из керна скважин, пробуренных в пределах Новоукраинского массива (где они встречаются в виде ксенолитов в гранитах). Иногда породы имеют гетеробластовую структуру, в которых главные породообразующие минералы имеют различные размеры от мелко- до среднезернистых, а по степени идиоморфизма полевых шпатов и пироксе-

на в некоторых разностях структура пород близка к гипидиоморфнозернистой или габбровой. По составу они изменяются от существенно калиевых кислых разностей до натриевых с одновременным уменьшением кислотности и увеличением содержания темноцветных минералов и основности плагиоклаза, в связи с чем содержание главных породообразующих минералов колеблется в широких пределах. Основными из них являются плагиоклаз (34—62 %), калиевый полевой шпат (0—22 %), кварц (3—38 %), пироксен (3—26 %). В небольшом количестве присутствует биотит (0—11 %) и акцессорные — рудный минерал, апатит, циркон (1—8 %). В той или иной степени проявляются элементы катакластической структуры, выраженные в частичном или полном дроблении главных минералов, мозаичном, волнистом угасании кварца. В таких разностях элементы дробления совместно с пластинчатыми зернами кварца ориентированы в одном направлении, что создает направленную пластинчатую текстуру.

Результаты изучения петрофизических характеристик пород. Принимая во внимание наш многолетний опыт экспериментальных исследований минерального вещества при высоких термобарических параметрах, у образцов обширной коллекции изучаемых пород предварительно были измерены скорость прохождения упругих продольных волн, плотность в атмосферных условиях и при комнатной температуре. Проведено обобщение и ана-

Таблица 5. Скорости упругих продольных волн, плотность, их расчетные значения и минеральный состав чарнокитоидов

Номер	Номер образца	Место отбора	ρ , г/см ³	V_p , км/с	Минеральный состав							$\rho_{расч}$, г/см ³	$V_{расч}$, км/с
					Пл	КПШ	Кв	Би	Пи	Амф	Акц		
1	18/51	Гайворон	2,629	5,92	26,4	12,2	50,3	2,0	7,5	—	1,6	2,709	6,19
2	50-92	НУ	2,650	6,04	34,1	26,7	33,1	2,9	5,1	—	0,8	2,748	6,31
3	193/290	Черневцы	2,660	6,12	34,3	21,8	38,3	—	4,8	—	0,8	2,672	6,17
4	194/292	Скалополь	2,722	6,20	40,2	17,4	19,6	—	12,1	4,8	3,0	2,698	6,21
5	14/39	Завалье	2,840	6,43	41,3	0,8	34,4	—	19,6	—	3,9	2,820	6,45
6	32-92	НУ	2,940	6,40	58,4	0,7	2,9	8,7	21,5	—	7,8	2,860	6,52
7	15/41	Завалье	2,946	6,67	55,0	—	14,0	—	26,7	—	4,3	2,868	6,57

Примечание: 1—3 — чарнокиты, 4, 5 — эндербиты, 6, 7 — основные гранулиты.

лиз полученных данных, выявлен характер распределения и наиболее вероятные значения измеренных параметров в пределах выделенных разновидностей пород, отобраны наиболее типичные представители таких петрографических групп для дальнейших исследований в условиях высоких давлений и температур (см. табл. 1—5).

Анализ данных о плотности пород показывает, что ее значения в пределах отдельных разновидностей изменяются в широких пределах, которые для гранитов кировоградского комплекса составляют 2,590—2,790 г/см³ (равномернозернистые граниты) и 2,593—2,750 г/см³ (порфирировидные граниты). Средние значения плотности для этих пород составляют соответственно 2,654 и 2,688 г/см³, а вершина максимума лежит в пределах 2,64—2,68 и 2,68—2,72 г/см³.

Плотность пород новоукраинского комплекса 2,600—2,712 г/см³, среднее ее значение составляет 2,661, а наиболее вероятные 2,640—2,680 г/см³. Граниты рапакиви характеризуются плотностью 2,610—2,722 г/см³ ($\rho_{cp}=2,655$ г/см³), вероят-

ные значения находятся в более широком диапазоне (2,600—2,680 г/см³).

В целом довольно большой разброс плотности отмечается для плагиогранитов (2,610—2,780 г/см³). Наиболее вероятные величины — 2,640—2,720 при среднем значении 2,678 г/см³. Вместе с тем, с учетом ранее приведенных исследований [Корчин, Буртный, 2011], можно отметить некоторые различия этих параметров в выделенных ранее группах. Так, наиболее высокоплотными и высокоскоростными являются диориты. Средняя плотность 2,784 г/см³ (2,783—2,785), скорость упругих продольных волн 5,97—6,08 км/с ($V_{Pcp}=6,01$ км/с). Среди плагиогранитов наиболее высокоплотные и высокоскоростные плагиограниты саксаганского комплекса ($\rho_{cp}=2,711$ г/см³, $V_{Pcp}=5,96$ км/с). Причем значения плотности и скорости продольных волн имеют наименьший разброс и составляют соответственно 2,713—2,711 г/см³ и 5,98—5,95 км/с. Плотность плагиогранитов днепропетровских 2,700 г/см³ (2,723—2,670), а скорость продольных волн изменяется

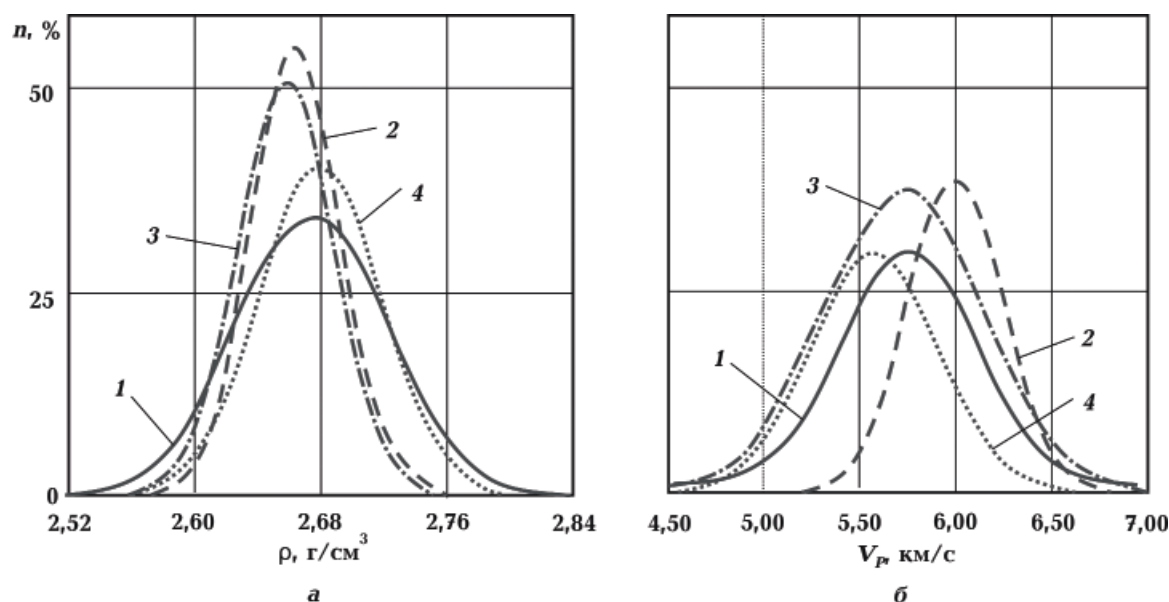


Рис. 1. Вариационные кривые распределения плотности (а) и скорости продольных волн (б) в гранитоидах: 1 — граниты кировоградского комплекса, 2 — граниты новоукраинского комплекса, 3 — граниты рапакиви, 4 — плагиограниты.

Fig. 1. Variation curves of density (a) and elastic longitudinal waves velocity (b) inversion for granitoides: 1 — the Kirovogradskiy complex granites, 2 — the Novoukrainian complex granites, 3 — rapakivi granites, 4 — plagiogranites.

в пределах 5,52—5,76 км/с ($V_{Pcp}=5,62$ км/с).

Наибольший разброс значений ρ и V_P наблюдается для пород Западно-Ингулецкой зоны (2,654—2,738 г/см³ ($\rho_{cp}=2,696$) и 5,47—5,98 км/с ($V_{Pcp}=5,67$)). Вариационные кривые распределения плотности и скорости упругих волн гранитоидов представлены на рис. 1.

Следует отметить, что на вариационных кривых распределения V_P и ρ в чарнокитоидах было обнаружено несколько максимумов [Корчин и др., 2007]. При сопоставлении этих данных с особенностями минерального состава пород были выделены гистограммы, соответствующие четырем определенным группам чарнокитоидов, в которых наиболее вероятные значения скорости упругих волн и плотности составляют: чарнокиты — $V_P=5,95\div 6,05$ км/с; $\rho=2,65\div 2,68$ г/см³; плагиочарнокиты — $V_P=6,15\div 6,25$ км/с, $\rho=2,70\div 2,75$ г/см³; эндербиты — $V_P=6,30\div 6,40$ км/с, $\rho=2,80\div 2,85$ г/см³; основные гранулиты — $V_P=6,45\div 6,55$ км/с, $\rho=2,90\div 2,95$ г/см³.

Неотъемлемой частью дальнейшего комплексного изучения различных пород УЩ, согласно нашим методикам [Корчин,

2007, 2011, 2013а,б; Буртный и др., 2013; Корчин и др., 2013, 2018], является исследование образцов в условиях всестороннего гидростатического давления при комнатной температуре. Этот этап исследований необходим для объяснения процессов, происходящих с породой при различной термобарической нагрузке и, в частности, расчета плотности минерального вещества при нагрузках гидростатического сжатия. В связи со сложностью регистрации изменения объема образца породы непосредственно в камере высокого гидростатического давления, обычно используются ультразвуковые измерения [Корчин, 2007, 2013а,б; Корчин и др., 2018]. Плотности пород в условиях гидростатического сжатия рассчитывались по данным изменения ее упругих модулей (β — сжимаемости и K — модуля всестороннего сжатия):

$$\beta = \frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial P} \right)_T = \frac{1}{K}, \quad K = \rho \left(V_P^2 - \frac{4}{3} V_S^2 \right),$$

где V_P и V_S измерялись в ходе опытов.

Результаты определений V_P , V_S , ρ и статистическая обработка этих данных приведены в табл. 6 и на рис. 2.

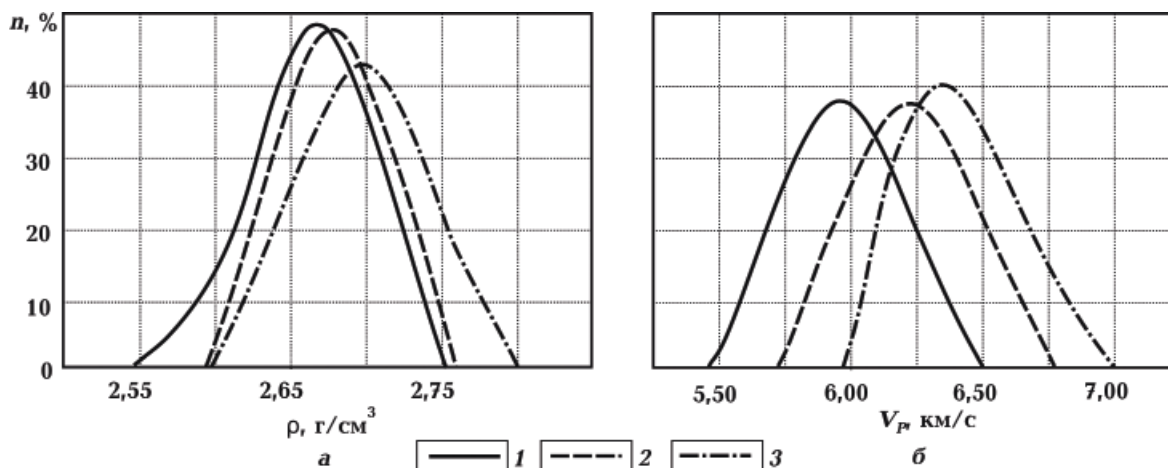


Рис. 2. Вариационные кривые распределения средних значений плотности (а) и скорости продольных волн (б) для гранитоидов: 1 — в атмосферных условиях ($V_{P0cp}=5,85$ км/с; $\rho_{0cp}=2,66$ г/см³); 2 — при воздействии на образцы высокого гидростатического давления 1 кбар ($V_{P1cp}=6,14$ км/с; $\rho_{1cp}=2,68$ г/см³); 3 — при воздействии на образцы высокого гидростатического давления 5 кбар ($V_{P5cp}=6,27$ км/с; $\rho_{5cp}=2,69$ г/см³).

Fig. 2. Variation curves of density (a) and elastic longitudinal waves velocity (b) means inversion for granitoides: 1 — in atmospheric conditions ($V_{P0cp}=5,85$ км/с; $\rho_{0cp}=2,66$ г/см³); 2 — under exposed to 1 kbar high hydrostatic pressure samples ($V_{P1cp}=6,14$ км/с; $\rho_{1cp}=2,68$ г/см³); 3 — under exposed to 5 kbar high hydrostatic pressure samples ($V_{P5cp}=6,27$ км/с; $\rho_{5cp}=2,69$ г/см³).

Таблица 6. Значения скоростей упругих продольных и поперечных волн и значения плотности исследуемых гранитоидов в условиях высокого гидростатического давления

Номер образца	Комплекс пород	V_P , км/с			V_S , км/с			ρ , г/см ³		
		0 кбар	1,0 кбар	5,0 кбар	0 кбар	1,0 кбар	5,0 кбар	0 кбар	1,0 кбар	5,0 кбар
2009/385	Кировоградский	5,73	5,93	6,13	3,47	3,55	3,62	2,62	2633	2,645
2564/222	-«-	5,33	6,21	6,42	3,22	3,67	3,80	2,596	2,620	2,650
1396/348	-«-	5,93	6,12	6,22	3,48	3,63	3,67	2,620	2,630	2,640
1314/274	-«-	5,86	6,22	6,34	3,34	3,50	3,53	2,631	2,638	2,652
1325/192	-«-	5,85	5,89	6,02	3,47	3,55	3,59	2,648	2,658	2,674
2012/484	-«-	5,57	6,30	6,46	3,25	3,51	3,61	2,650	2,661	2,671
28/80	-«-	5,64	6,11	6,33	3,36	3,55	3,73	2,640	2,652	2,663
1170	-«-	6,20	6,28	6,31	3,55	3,63	3,74	2,700	2,720	2,750
2781	-«-	6,18	6,27	6,37	3,47	3,55	3,60	2,700	2,720	2,76
1556/43	Новоукраинский	5,68	5,90	6,11	3,40	3,52	3,72	2,646	2,670	2,690
1547/53	-«-	6,01	6,13	6,24	3,32	3,47	3,62	2,652	2,670	2,680
2029/421	-«-	5,94	6,11	6,19	3,39	3,59	3,66	2,666	2,681	2,696
1385/181	-«-	5,81	6,13	6,22	3,43	3,57	3,63	2,690	2,699	2,714
60-83/351	-«-	6,24	6,40	6,48	3,63	3,72	3,76	2,680	2,694	2,700
1/4	Корсунь-шевченковский	5,44	5,76	6,04	3,35	3,65	3,85	2,640	2,654	2,666
2607/442	-«-	5,82	6,08	6,20	3,30	3,43	3,47	2,640	2,654	2,661
38-82/315	-«-	6,10	6,44	6,56	3,40	3,54	3,56	2,667	2,681	2,686
39-82/135	-«-	6,13	6,62	6,71	3,36	3,51	3,52	2,722	2,736	2,740
2588/212	Днепропетровский	5,74	5,92	6,07	3,46	3,59	3,72	2,674	2,688	2,700
2574/270	-«-	5,74	5,94	6,03	3,48	3,59	3,68	2,737	2,760	2,780
240/191	-«-	5,96	6,17	6,40	3,46	3,56	3,66	2,713	2,731	2,750

Примечание: Название пород см. табл. 1—5.

Увеличение значений скоростей и плотностей с ростом давления от атмосферного до 1 и далее до 5 кбар приводит к смещению их средних значений в сторону увеличения. При приложении высокого гидростатического давления в 1 кбар наиболее вероятные средние значения упругоплотностных параметров для всех гранитоидов увеличиваются и составляют: $V_P=6,14$ км/с, $\rho=2,68$ г/см³. При приложении высокого гидростатического давления в 5 кбар значения продолжают расти и составляют $V_P=6,27$ км/с, $\rho=2,69$ г/см³. Максимумы значений плотностей смещаются в среднем на $\approx 0,02$ г/см³ от атмосферного давления до 1 кбар, а затем до $\approx 0,01$ г/см³ на 5 кбар.

Породы в условиях высокого давления характеризуются, как правило, вариаци-

онными кривыми нормального распределения скоростей и плотности, что свидетельствует об оптимальной представительности совокупности образцов без существенных дефектов. Дифференциация пород по скоростям распространения в них упругих волн и плотности, обнаруженная при атмосферных условиях и комнатной температуре, сохраняется и в условиях высокого гидростатического давления для всех исследуемых групп пород.

Характеристики горных пород при высоких PT -параметрах. В результате статистической обработки полученных данных в гидростатических условиях опытов была подобрана коллекция образцов, упругоплотностные параметры которых исследовались далее в условиях воздействия высоких P и T по программам одно-

временного изменения этих параметров в аппарате высокого давления по специальным программам. Программа изменения с глубиной давления рассчитывалась на основании общих геолого-геофизических представлений изучаемой площади и гравиметрии, а температуры — по материалам геотермических исследований региона и соответствовала PT -режимам земной коры центральной части УЩ [Лебедев и др., 1986; Кутас, 1978; Кировоградский..., 2013]. При увеличении температуры в камере устанавливается необходимое давление (P изменяется одновременно с ростом T) (рис. 3). В опытах образец породы как бы постепенно «погружается» с земной поверхности на необходимую глубину (максимальные глубины моделирования — 25—40 км), при этом измеряется изменение объема в образце, а также в большинстве случаев регистрируется время распространения продольных и поперечных упругих волн в них [Корчин, 2013б;

Корчин и др., 2013; Буртный и др., 2013].

Результаты экспериментальных исследований изменения плотности магматических и ультраметаморфических пород УЩ с глубиной представлены на рис. 4—6. Как

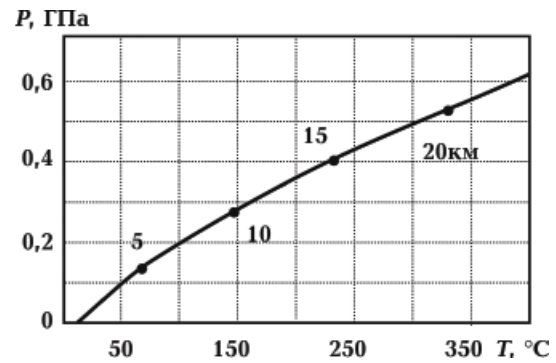


Рис. 3. PT -программа опытов, имитирующая в аппарате высокого давления изменения с глубиной в земной коре УЩ давления и температуры.

Fig. 3. PT -program of experiments simulating changes in pressure and temperature in the high pressure apparatus with the depth in the Ush Earth's crust.

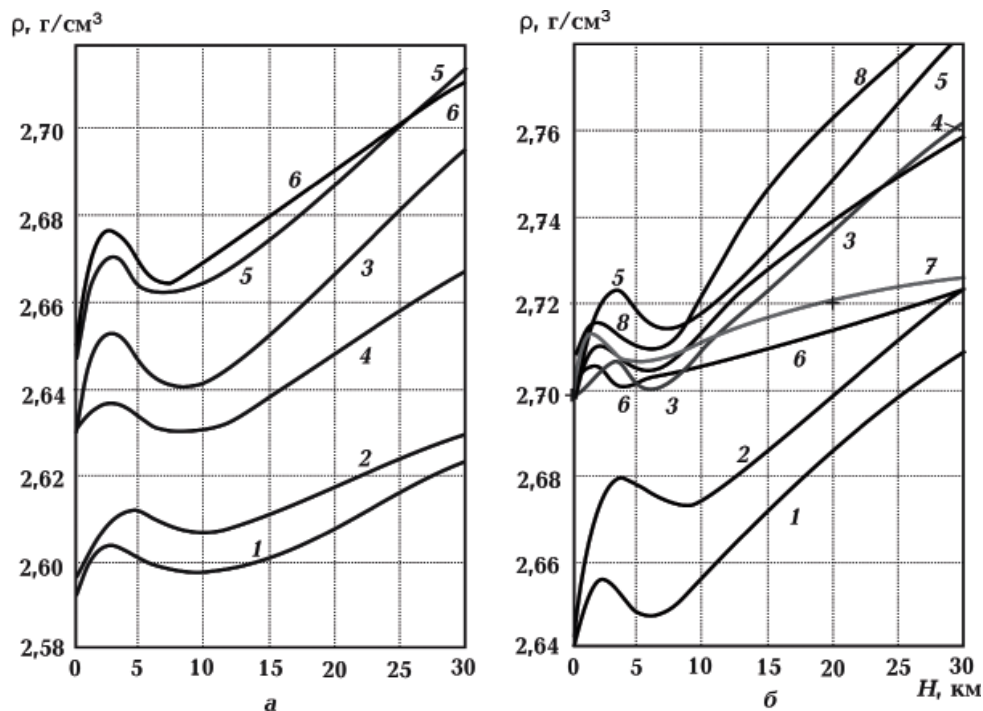


Рис. 4. Графики изменения $\rho=f(PT)=f(H)$ в гранитах кировоградского комплекса: a — граниты равномернозернистые (1 — 2374/428, 2 — 2564/222, 3 — 1396/348, 4 — 1314/274, 5 — 1325/192, 6 — 2012/484); b — граниты порфировидные (1 — 28/80, 2 — 28/77, 3 — 1170, 4 — 2781, 5 — 28/79, 6 — 2600/148, 7 — 2595/165, 8 — 1962).

Fig. 4. Plots of $\rho=f(PT)=f(H)$ for the Kirovogradskiy complex granites: a — evenly granular granites (1 — 2374/428, 2 — 2564/222, 3 — 1396/348, 4 — 1314/274, 5 — 1325/192, 6 — 2012/484); b — porphyroid granites (1 — 28/80, 2 — 28/77, 3 — 1170, 4 — 2781, 5 — 28/79, 6 — 2600/148, 7 — 2595/165, 8 — 1962).

и ранее на графиках $\rho=f(PT)=f(H)$, обнаружены сложные зависимости значений изменения плотности с глубиной. В начальном интервале давления и температуры (увеличения глубины залегания пород) происходит повышение плотности, которая на определенных глубинах достигает своих максимальных значений. На глубинах порядка 2—20 км дальнейшее увеличение P и T приводит к понижению плотности, она достигает своих минимальных значений и вновь увеличивается с ростом воздействующих термобарических параметров опытов. Таким образом, на всех без исключения графиках $\rho=f(PT)=f(H)$ фиксируется зона низких значений плотности (зона разуплотнения пород) между первым максимумом и областью ее возрастания выше этого уровня. Ниже выделенной таким образом зоны разуплотнения плотность пород увеличивается с определенным градиентом до глубин 30—40 км.

Для равномернозернистых гранитов кировоградского комплекса (рис. 4) характер изменения плотности при увеличении давления и температуры примерно одинаков.

Начальный интервал глубин характеризуется повышением плотности в пределах 0,005—0,25 г/см³ ($\rho_{\text{ср.}}=0,016$ г/см³), максимальные значения которой зафиксированы на глубинах 2,5—4,5 км. Дальнейшее повышение давления и температуры вызывает понижение плотности пород на 0,005—0,012 г/см³ ($\rho_{\text{ср.}}=0,008$ г/см³) с минимальным значением на глубинах 7—10 км. Глубже, с увеличением PT -параметров, значения плотности возрастают и составляют в интервале глубин от 8 до 30 км 0,018—0,044 г/см³ ($\rho_{\text{ср.}}=0,031$ г/см³).

Для равномернозернистых гранитов зона разуплотнения фиксируется в интервале глубин 2,5—15,5 км, ее мощность составляет 10,5—14,0 км (в среднем 11,0 км). Несколько иной характер изменения плотности на графиках $\rho=f(PT)=f(H)$ отмечается для порфириовидных гранитов кировоградского комплекса. Как видно (см. рис. 4), в гранитах, отобранных в пределах Кировоградского массива, зоны низких значений плотности фиксируются в более узком

интервале на глубинах 5,5—8,5 км с минимальными значениями 6,0—9,0 км. Глубже зоны разуплотнения увеличение плотности пород, в отличие от равномернозернистых гранитов, происходит с большим градиентом, и изменения $\Delta\rho$ достигают 0,045—0,076 г/см³ на 30—40 км.

В то же время для гранитов, отобранных в пределах Долинского массива, наблюдается несколько иной эффект влияния P и T на плотность. При «мощности» 7,5—8,0 км зафиксированы минимальные значения плотности, градиент увеличения плотности глубже зоны разуплотнения также довольно низкий ($\Delta\rho=0,0007\div 0,001$ г/см³).

В гранитах новоукраинского комплекса характер изменения плотности в условиях высоких давлений и температур (рис. 5, а) примерно одинаков. Зоны разуплотнения располагаются на глубинах 2,0—16,0 км, а их мощность составляет от 8,0 до 12,5 км. Падение плотности в зоне $\Delta\rho=0,006\div 0,008$ г/см³, а ее увеличение (до 30 км) составляет 0,025—0,039 г/см³. Зоны разуплотнения в гранитах новоукраинского комплекса захватывают наиболее глубокие горизонты среди изученных разностей.

В образованиях Корсунь-Новомиргородского массива, представленных гранитами рапакиви и анортозитами, на графиках изменения плотности с глубиной можно выделить два типа кривых, различающихся характером изменения $\rho=f(PT)=f(H)$ (рис. 5, б). Это, прежде всего, относится к гранитам рапакиви, образцы которых отобраны из карьеров (1/1, 1/4, 2/5, 5/13, 5/15) и керн скважин (2607/442, 39-82/135, 38-82/315). Как видно из рис. 5, б, при одинаковом положении и величине зон разуплотнения увеличение плотности гранитов рапакиви до глубин 30 км значительно выше ($\Delta\rho=0,025\div 0,035$ г/см³), чем у остальных гранитоидов и анортозитов ($\Delta\rho=0,018\div 0,022$ г/см³) этой группы пород.

Особых различий в изменении плотности при увеличении давления и темпера-

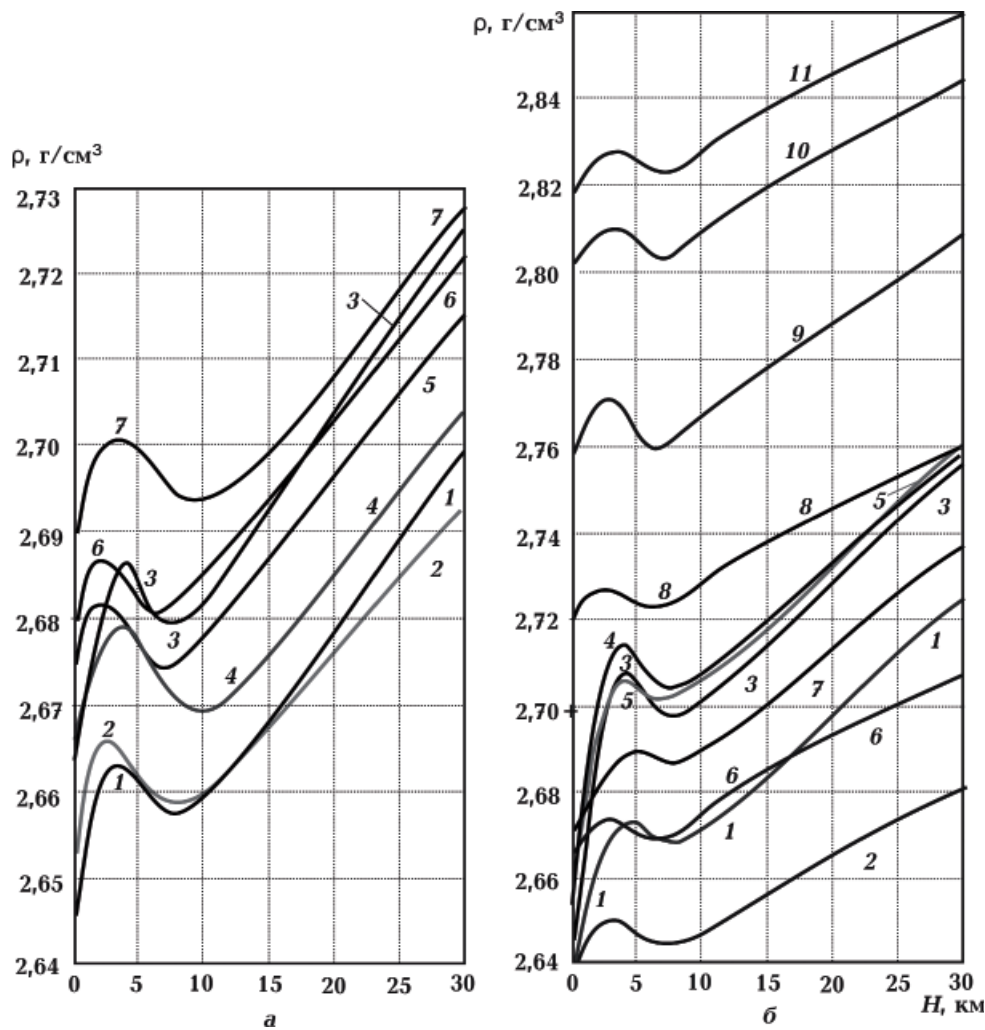


Рис. 5. Графики изменения $\rho=f(PT)=f(H)$ в гранитах новоукраинского комплекса (а): 1 — 1556/49, 2 — 1547/53, 3 — 27/76, 4 — 2029/421, 5 — 52-83/293, 6 — 60-83/351, 7 — 1385/181; в породах Корсунь-Новомиргородского массива (б): 1 — 1/4, 2 — 2607/442, 3 — 5/13, 4 — 1/1, 5 — 5/15, 6 — 38-82/315, 7 — 2/5, 8 — 39-82/135, 9 — 29/84, 10 — 38/13, 11 — 30-82/157.

Fig. 5. Plots of $\rho=f(PT)=f(H)$: within a Novoukrainian complex granites (а): 1 — 1556/49, 2 — 1547/53, 3 — 27/76, 4 — 2029/421, 5 — 52-83/293, 6 — 60-83/351, 7 — 1385/181; in the rocks of Korsun-Novomirgorod massif (б): 1 — 1/4, 2 — 2607/442, 3 — 5/13, 4 — 1/1, 5 — 5/15, 6 — 38-82/315, 7 — 2/5, 8 — 39-82/135, 9 — 29/84, 10 — 38/13, 11 — 30-82/157.

туры в плагиогранитах и диоритах днепропетровского комплекса не наблюдается. В целом для них, как видно из рис. 6, а, зоны разуплотнения проявляются на глубинах от 2,0 до 12,5 км, а мощность по глубине составляет 7,0—12,0 км. Градиент увеличения плотности при выходе из зоны и до 30 км лежит в пределах $\Delta\rho=0,012\div 0,021$ г/см³. Эти породы менее других подвержены совместному воздействию программных *PT*-режимов центральной части УЩ.

Ход кривых и величины изменения

$\rho=f(PT)=f(H)$ в группе чарнокитоидов, несмотря на их разнообразие в составе (от чарнокитов до основных гранулитов), близки (см. рис. 6, б). Зона разуплотнения мощностью от 7,0 до 16,5 км может проявляться на глубинах 2,0—16,5 км, падение плотности в зоне составляет $\Delta\rho=0,007\div 0,013$ г/см³ на глубинах 6,0—9,0 км, а градиент увеличения плотности пород ниже зоны находится в пределах 0,025—0,03 г/см³ на 1,0 км (наиболее высокие значения этих параметров у изученных пород).

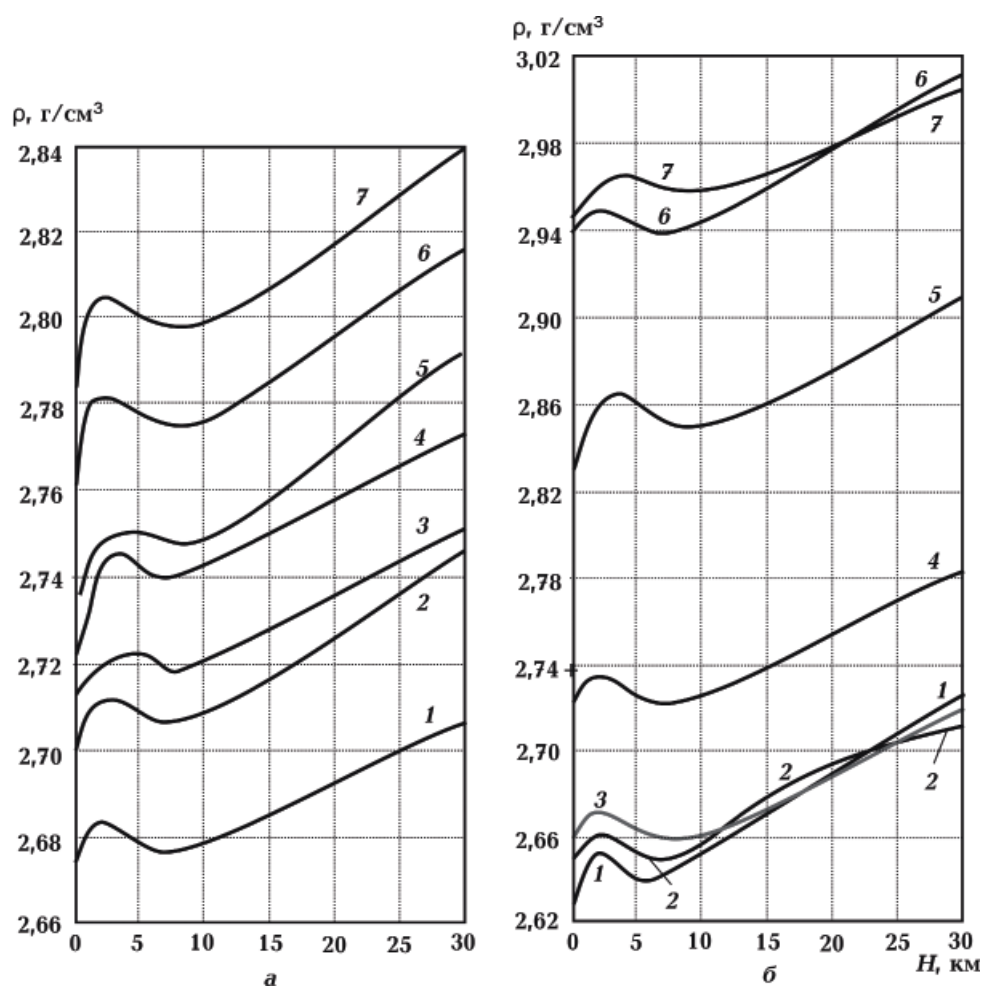


Рис. 6. Графики изменения $\rho=f(PT)=f(H)$: а — днепропетровский комплекс (1—5 — плагиограниты (обр. 2588/212, 240/192, 240/191, 291Б, 2574/270)); 6, 7 — диориты (обр. 32/121, 32/122)); б — чарнокитоиды: (1—3 — чарнокиты (обр. 18/51, 50-92, 193/290)); 4, 5 — эндербиты (обр. 194/292, 14/39); 6, 7 — основные гранулиты (обр. 32-92, 15/41)).

Fig. 6. Plots of $\rho=f(PT)=f(H)$: а — Dnipropetrovskiy complex (1—5 — plagiogranites (обр. 2588/212, 240/192, 240/191, 291Б, 2574/270)); 6, 7 — diorites (обр. 32/121, 32/122)); б — charnockitoides (1—3 — charnockites (обр. 18/51, 50-92, 193/290)); 4, 5 — enderbites (обр. 194/292, 14/39); 6, 7 — basic granulites (обр. 32-92, 15/41)).

Анализируя материалы экспериментальных зависимостей $\rho=f(PT)=f(H)$ для всех пород, можно выделить несколько показателей, которые характеризуют экстремальные участки кривых для конкретных разновидностей пород: H_{\min} — глубина, на которой происходит максимальное падение (уменьшение) плотности, ΔH — интервал глубин, фиксирующий зону разуплотнения или ширину зоны разуплотнения, ρ_{\max} — максимальное значение плотности перед зоной разуплотнения, ρ_{\min} — значение максимального падения плотности в зоне разуплотнения, $\Delta\rho_{\max}$ — область ин-

тенсивного увеличения плотности перед зоной разуплотнения, $\Delta\rho$ — снижение плотности в зоне разуплотнения или интервал максимального уменьшения плотности, $\rho_{H=30 \text{ км}}$ — значение плотности на глубине 30 км, $\Delta\rho(+)$ — область интенсивного увеличения плотности после зоны разуплотнения (табл. 7) [Корчин и др., 2011, 2018; Буртный и др., 2013; Корчин, 2013а].

Как видно из табл. 7, максимальное увеличение плотности в начальном интервале увеличения P и T (до начала зоны понижения плотности) происходит в основном на глубинах 2—4 км, а ее $\Delta\rho$ составляет

Т а б л и ц а 7. Средние значения начальных плотностей и ее основные параметры на различных участках зависимостей $\rho=f(PT)=f(H)$

Но- мер	Названия пород	$\rho_{нач,3}$ г/см ³	$\rho_{max,3}$ г/см ³	$\Delta\rho_{max,3}$ г/см ³	$\rho_{min,3}$ г/см ³	$\Delta\rho,3$ г/см ³	$H_{min,3}$ км	$\Delta H, км$	$\rho_{H=30 км}$	$\Delta\rho(+)$ _{15–30 км}
1	Граниты среднезернистые	2,625	2,642	0,017	2,634	0,008	8	3,0—13,8	2,672	0,027
2	Граниты порфировидные кировоградские	2,679	2,695	0,016	2,689	0,007	6,5	2,7—9,5	2,752	0,038
3	Граниты порфировидные долинские	2,703	2,712	0,008	2,706	0,005	4,0	2,0—9,2	2,729	0,012
4	Граниты новоукраинские	2,667	2,681	0,011	2,673	0,008	8,0	3,0—13	2,713	0,028
5	Граниты боковянские	2,649	2,665	0,016	2,657	0,007	8,0	2,2—13,0	2,697	0,027
6	Граниты рапакиви	2,662	2,693	0,031	2,687	0,005	7,0	3,7—10,2	2,741	0,035
7	Анортозиты	2,795	2,805	0,010	2,797	0,009	6,5	3,2—10,3	2,844	0,024
8	Плагиограниты	2,709	2,723	0,013	2,718	0,005	7,5	3,5—11,5	2,752	0,024
9	Диориты	2,756	2,775	0,017	2,768	0,007	7,5	3,0—12,5	2,801	0,020
10	Чарнокиты	2,646	2,662	0,016	2,65	0,012	6,0	2,0—11,0	2,719	0,043
11	Эндербиты	2,833	2,860	0,027	2,849	0,011	9,0	3,5—16,5	2,898	0,034
12	Основные гранулиты	2,943	2,958	0,015	2,95	0,009	8,0	3,0—12,0	3,006	0,038
13	Гнейсы биотитовые	2,725	2,736	0,011	2,729	0,007	7,0	2,5—10,0	2,774	0,028
14	Гнейсы амфиболовые	3,027	3,054	0,027	3,045	0,008	1,5	6,0—16,7	3,091	0,041
15	Гнейсы пироксеновые	3,066	3,086	0,019	3,076	0,010	8,5	4,3—13,0	3,143	0,051

Примечание: Породы: 1—3 — кировоградского комплекса; 4, 5 — новоукраинского комплекса; 6, 7 — Корсунь-Новомиргородского массива; 8, 9 — днепропетровского комплекса; 10—12 — чарнокитоиды; 13—15 — метаморфические образования.

0,010—0,027 г/см³. Максимальное уменьшение плотности в зоне разуплотнения $\Delta\rho=0,005\div 0,012$ г/см³ при повышении PT -условий для всех пород зафиксировано в основном на глубинах 4,0—9,0 км, а ширина зоны или интервал глубин, в которых она проявляется, составляет 6,0—10,0 км. При выходе из зоны с увеличением давления и температуры плотность исследованных комплексов пород увеличивается с разными градиентами. В PT -условиях, соответствующих интервалу глубин 15,0—30,0 км отмечается повышение плотности пород в пределах 0,024—0,051 г/см³.

На основании полученных материалов нами построены усредненные графики изменения плотности ($\Delta\rho$) исследованных пород с глубиной (рис. 7), отображающие особенности изменения плотности различных комплексов пород в экспериментальных PT -условиях, соответствующих термобарическим глубинным условиям земной коры УЩ.

Природа зон инверсии плотности (разуплотнения) в земной коре. Как показали детальные исследования образцов пород в ходе эксперимента и после, инверсия плотности пород связана в основном с ее структурными изменениями и менее зависит от вещественных преобразований минерального вещества [Korchin, Karnaukhova, 2007; Корчин, 2012, 2013а].

Совместный анализ параметров скорости сейсмических волноводов (зон низких скоростей — ЗНС) и обнаруженных экспериментальными исследованиями инверсий $V_{P,S}=f(PT)=f(H)$ позволил сделать предположение о термодинамической природе ЗНС в земной коре [Корчин, 2013а; Korchin, 2017]. Механизм возникновения ЗНС подтверждается данными изучения плотности минерального вещества под влиянием программного воздействия P и T . Как и ожидалось, при PT -условиях, соответствующих глубинам ЗНС, плотности пород также уменьшаются, а иногда соот-

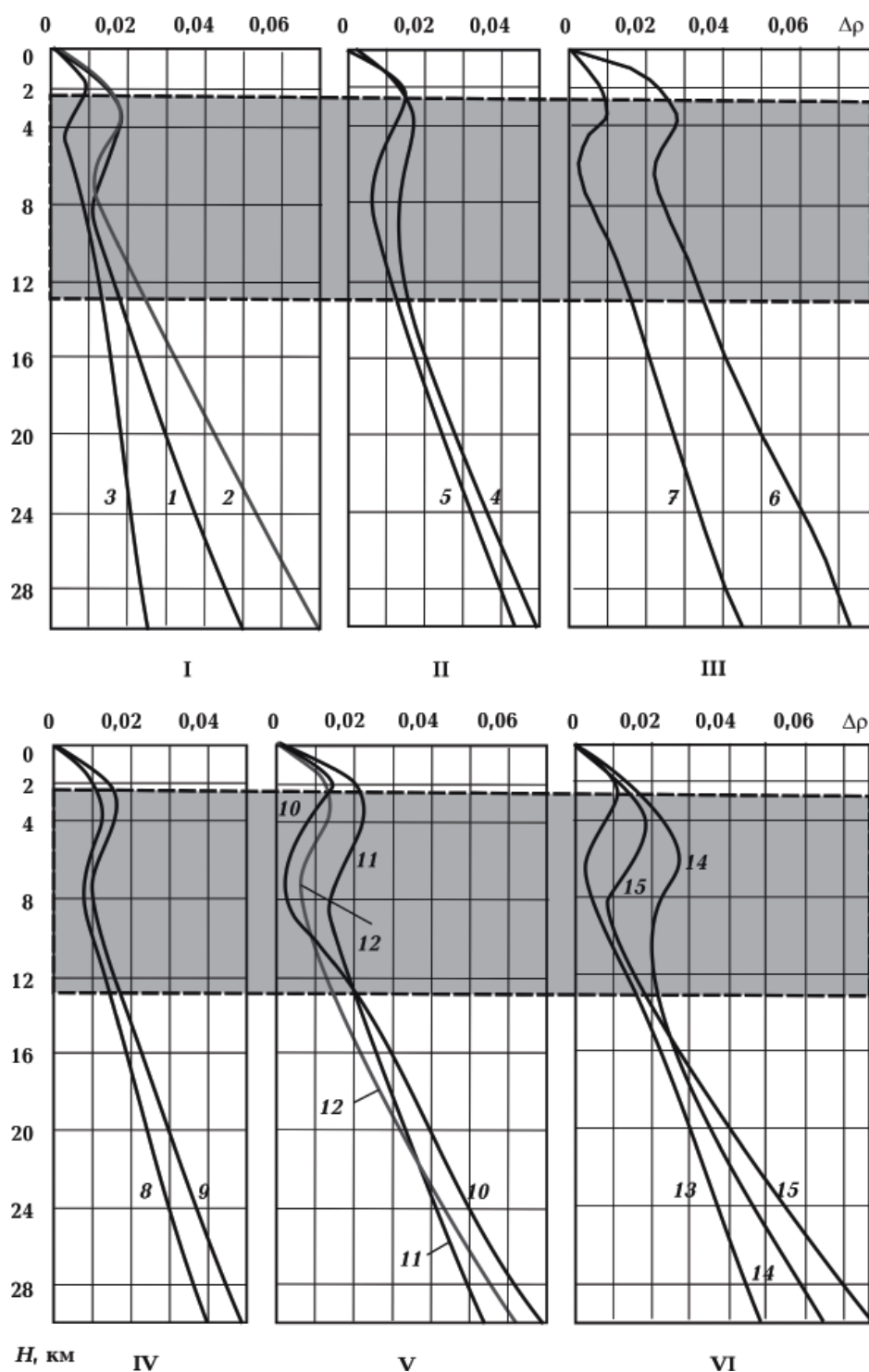


Рис. 7. Усредненные графики изменения $\rho=f(PT)=f(H)$ в исследованных породах: I — граниты кировоградского комплекса; II — граниты новоукраинского комплекса; III — породы Корсунь-Новомиргородского массива; IV — породы днепропетровского комплекса; V — породы гранулитовой фации (чарнокитоиды); VI — метаморфические образования (гнейсы преимущественно биотитового, амфиболового, пироксенового состава). Номера кривых соответствуют номерам табл. 7.

Fig. 7. Average plots of $\rho=f(PT)=f(H)$ in the studied rocks: I — granites of the Kirovogradskiy complex; II — granites of the Novoukrainian complex; III — the rocks of Korsun-Novomirgorod massif; IV — the rocks of the Dnipropetrovskiy complex; V — granulite facie rocks (charnockitoides); VI — metamorphic formations (gneisses of mainly biotite, amphibole, pyroxene composition). The numbers of the curves correspond to the numbers of the tabl. 7.

ношение $\partial\rho/\partial H$ приобретает отрицательные значения, подтверждая тем самым интенсивное разуплотнение пород в PT -условиях этих горизонтов, образуя области пониженной плотности и скорости. Это явление обусловлено естественным противодействием на минеральное вещество температур давлению, существующем на определенных глубинах [Корчин, 2013а; Корчин и др., 2013, 2018]. Нагрев горных пород сопровождается увеличением их объема. Коэффициент теплового расширения горных пород от $2 \cdot 10^{-6}$ до $4 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ (средний — $3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$), и при их разогреве даже до 200—300 °С наблюдается увеличение объема минерального вещества на 1 % и соответственное уменьшение плотности. Действие высокого давления, как правило, приводит к сжатию вещества, величина которого определяется сжимаемостью или коэффициентом всестороннего сжатия. На глубине 5—10 км в коре давление ($P=1,5 \div 3$ кбар) способно увеличить плотность пород не более чем на ~0,5 %. Таким образом, на глубинах от 3 до 16 км в земной коре будут преобладать термодинамические силы объемного разрушения структурной целостности пород, что приводит к образованию на этих глубинах разуплотнения минерального вещества земной коры. В глубинных условиях изменения плотности будут порождать развитие (затем релаксацию) очень высоких микронапряжений, возрастание коэффициента объемного расширения пород в результате изменения межзерновых границ за счет, например, их милонитизации, увеличение количества магистральных микротрещин, что свидетельствует об упругом низкотемпературном упрочнении и хрупком разрушении породы. Увеличивается относительная деформация зерен, их двойникование. Дополнительно здесь становится важным эффект декрепитации и разрушения включений, действия флюидной фазы, которые обуславливают процессы разуплотнения минерального вещества [Рэйдер, 1987; Корчин, 2013а, 2015; Корчин и др., 2013, 2018].

При дальнейшем увеличении глубины «погружения» породы, т. е. программного

увеличения действия на образец PT -параметров (P порядка 4,5—6 кбар, T порядка 250—300 °С, H соответствует 16—30 км), наблюдается интенсивное улучшение упругих и структурных характеристик породы, способствующих интенсивному росту плотности пород с глубиной. Микроструктурные нарушения породы зон инверсии подготавливают условия для ее существенных преобразований с увеличением глубины. После постепенного уплотнения породы включаются механизмы, характерные пластическим деформациям среды, происходит «совершенствование» породы за счет вещественных и структурных (на уровне элементарных дефектов) перестроек. С некоторыми допущениями, пользуясь геологической терминологией, в интервале глубин 20—40 км наблюдается процесс регионального метаморфизма [Корчин, 2013а; Корчин и др., 2018]. Таким образом, плотностные характеристики горных пород подобно их упругим параметрам с глубиной изменяются по нелинейным законам. На зависимостях $\rho=f(PT)=f(H)$ проявляются максимумы и минимумы, т. е. при одновременно действующих на глубинах на минеральное вещество давления и температурах образуются зоны инверсии плотности, которые далее под воздействием флюидов становятся более выраженными.

По данным измерений скорости распространения упругих волн в горных породах на различных глубинах совместно с изменением их плотности можно оценить изменения величины порового пространства пород в зависимости от приложенного давления и температуры (от глубины) [Корчин, 2014]. Расчеты показали, что в ЗНС (3—15 км, области разуплотнения пород, разрыхления межзерновых границ) наблюдается увеличение пористости на 10—20 % от их значений на глубинах 3—5 км (горизонтов максимальных величин упругих характеристик пород над ЗНС) (рис. 8).

Зависимости скорость—плотность в гранитоидах на различных глубинах. Одной из задач комплексной интерпретации геофизических данных является по-

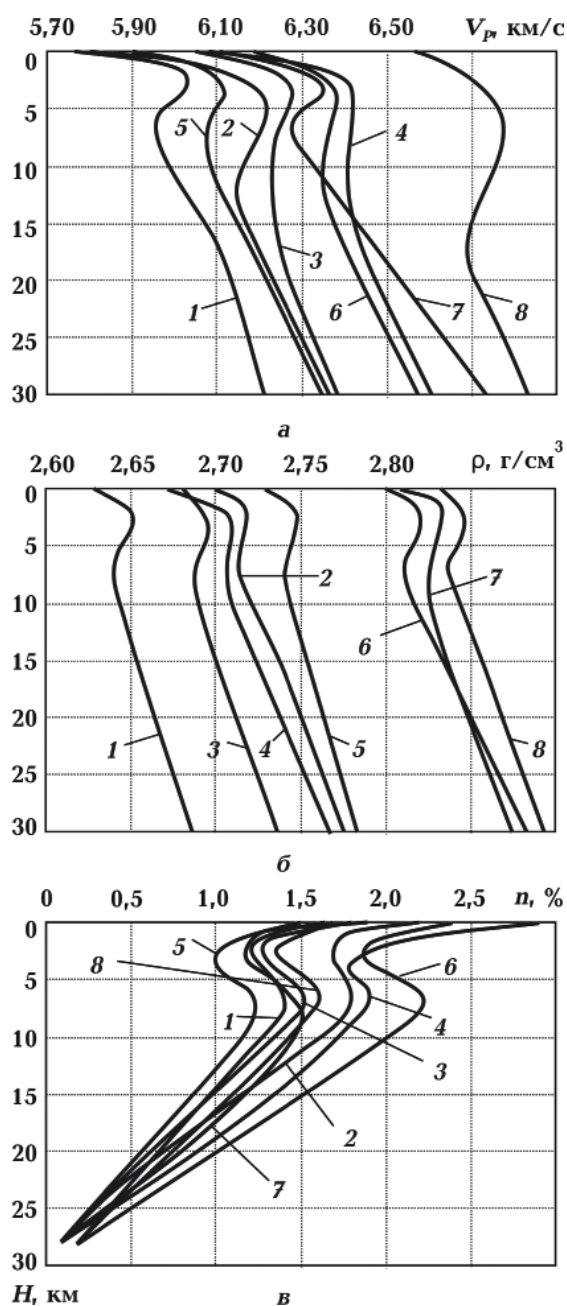


Рис. 8. Изменение скорости продольных волн, плотности и расчетных значений пористости в породах в термодинамических условиях соответствующих глубин: 1 — граниты равномернозернистые, 2 — граниты порфировидные, 3 — граниты новоукраинские, 4 — граниты рапакиви, 5 — плагιοграниты, 6 — чарнокитоиды, 7 — диориты, 8 — анортозиты.

Fig. 8. Changes inversion in velocity of elastic longitudinal and transverse waves, density and porosity estimated values of the rocks under thermodynamic conditions at the different depths: 1 — evenly granular granites, 2 — porphyroid granites, 3 — novoukrainian granites, 4 — rapakivi granites, 5 — plagiogranites, 6 — charnockitoides, 7 — diorites, 8 — anorthosites.

строение согласованной модели глубинных горизонтов Земли, в которой расчетные волновые характеристики и данные построений гравитационного поля совпадают с наблюдаемыми. Для этих целей широко используется связь скорость—плотность для пород различных геологических объектов. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что изменение скорости и плотности пород с глубиной, когда проявляются зоны инверсий V_p и ρ , существенно изменяют зависимости $V_p=f(\rho)$ на глубинах 3—20 км. Они отличаются от принятых среднестатистических линейных, а также от полученных в условиях комнатных температур и высоких гидростатических давлений зависимостей $V_p=f(P)$ и $\rho=f(P)$ (аналогичных полученным для гнейсов [Корчин и др., 2018 (рис. 11, 12)]). Для метаморфических пород также экспериментально показано, что изменение скорости и плотности пород на глубинах 3—15 км с проявлением зон инверсий V_p и ρ существенно изменяют зависимости $V_p=f(\rho)$ от принятых линейных. Для породы конкретного минерального состава зависимости $V_p=f(\rho)$ имеют сложную форму (образование петель) (рис. 9). Именно в зоне инверсии скорости и плотности традиционная зависимость $V_p=f(\rho)$ нарушается — большей плотности пород не соответствует большая скорость [Корчин и др., 2011].

Информация о существовании таких зон важна прежде всего при интерпретации данных гравиметрических наблюдений, особенно на участках развития однотипных комплексов пород, мощность которых может достигать до 10—15 км. В верхней части коры согласно экспериментальным данным мы будем иметь три горизонта однородных по составу слагающих ее пород, но отличающихся своими физическими характеристиками, в частности плотностными параметрами.

Это дает возможность уточнить связь $V_p=f(\rho)$ на различных глубинах. На участке глубин инверсии скорости и разуплотнения корового минерального вещества необходим подбор плотностей непосредственно по отдельным образцам пород,

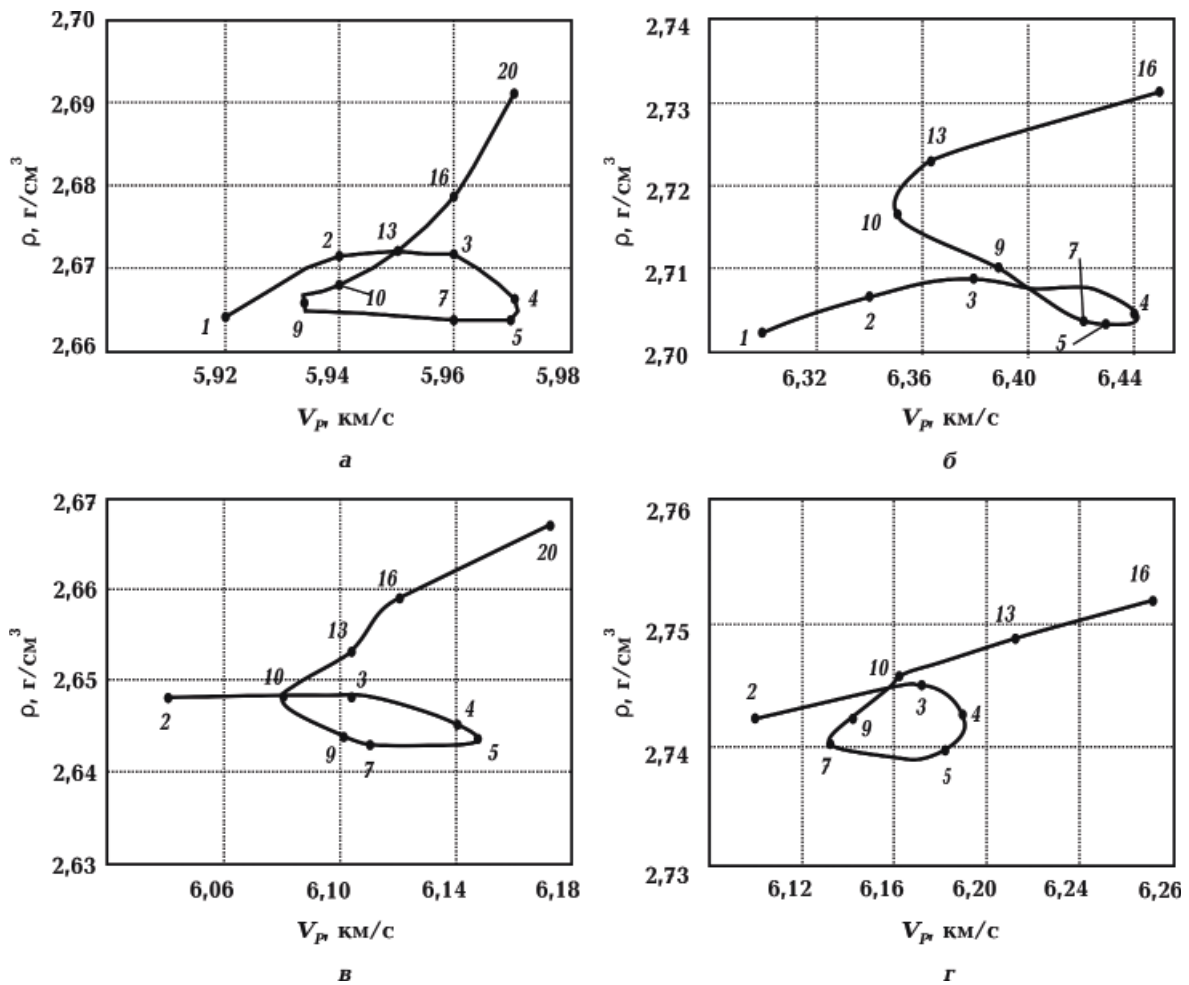


Рис. 9. Графики зависимости $V_p=f(\rho)$ для некоторых разновидностей гранитоидов на различных глубинах (цифры на кривых соответствуют глубинам H в км): а — гранит равномернозернистый (обр. 1325/192), б — гранит порфиroidный (обр. 28/80), в — гранит рапакиви (обр. 2607/442), г — плагиогранит (обр. 291Б).

Fig. 9. Plots of $V_p=f(\rho)$ for some types of granitoides at different depths (the numbers on the curves correspond to H depths in km): а — evenly granular granite (обр. 1325/192), б — porphyroid granite (обр. 28/80), в — rapakivi granite (обр. 2607/442), г — plagiogranite (обр. 291Б).

имеющим конкретные скорости и соответствующие им плотности [Корчин и др., 2007, 2011]. Сейсмогравитационное петрофизическое моделирование отдельных участков УЩ с учетом разуплотнения пород и наличия инверсии скоростей при определенных глубинных термобарических условиях убедительно показало наличие в земной коре на глубинах 5—20 км мощных зон пород с пониженной плотностью и повышенной пористостью.

Выводы. Экспериментально установлено, что для различных разновидностей магматических и ультраметаморфических пород УЩ (как и для метаморфиче-

ских пород [Корчин и др., 2018]) на зависимостях $\rho, V_p = f(PT) = f(H)$ образуются зоны инверсии плотности мощностью (5—15 км) и скорости распространения упругих продольных волн — (3—20 км). Для всех изученных комплексов пород, различных по минеральному составу, возрасту, условиям образования и степени метаморфизма, характерно проявление зон понижения плотности (зон разуплотнения), вызванных влиянием существующих в коре термодинамических условий на дефектно-структурные особенности пород конкретного минерального состава. Зоны чувствительны к температурным

режимам земной коры. С повышением температур в интервале глубин 5—15 км плотность пород снижается, увеличивается способность пород к разуплотнению, повышается их пористость, проницаемость и гигроскопичность. Более интенсивно происходит процесс перемещения флюидов и, как следствие, преобразование пород, зона разуплотнения расширяется и становится более контрастной и емкой. Зоны пониженных V_p и ρ являются наиболее активными горизонтами современных вещественно-структурных преобразований минеральной среды земной коры, локализации различных видов полезных ископаемых. Эти зоны из известных глубинных аномалий физических полей наиболее доступны для изучения различными геолого-геофизическими методами, в том числе сверхглубоким бурением, что способствует их наиболее детальному и пер-

спективному изучению с целью поисков полезного минерального сырья и уточнения глубинного строения Земли. В зонах пониженной плотности, которые, как правило, регистрируются методом ГСЗ в виде ЗНС, возможны более активные процессы массопереноса, газовой-жидких флюидов, в том числе углеводородов возможно глубинного происхождения. Здесь, вероятнее всего, происходит активная миграция и локальное накопление этих сред.

Материалы исследований, представленные в статье (независимо от места отбора проб — региональный эффект для средних значений плотности и скоростей, как показали дополнительные исследования, невелик) могут быть использованы при построении соответствующих моделей распределения пород с глубиной для различных участков земной коры не только Украины, но и других регионов.

Список литературы

- Буртний П.А., Корчин В.А., Карнаухова Е.Е. Моделирование вещественного состава глубинных горизонтов земной коры (новая концепция интерпретации геофизических данных). Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 188 с.
- Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых. Под ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. Киев: РПП «Галактика», 2013. 500 с.
- Корчин В.А. Зоны низких скоростей термобарической природы в кристаллической коре. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 46—65. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111145>.
- Корчин В.А. Коровые зоны низких скоростей — перспективные горизонты локализации глубинных углеводородов. *Глубинная нефть*. 2013а. Т. 1. № 8. С. 1099—1116.
- Корчин В.А. Петрофизические особенности зон низких сейсмических скоростей в земной коре и их термобарическая неустойчивость: *Материалы XVII Всерос. конф. с международным участием: «Проблемы сейсмотектоники»*, Москва, 20—22 сентября, 2011. С. 273—277.
- Корчин В.А. Структурные особенности минеральной среды в *PT*-условиях различных глубин земной коры. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 3. С. 49—77.
- Корчин В.А. Термобарическое моделирование аномалий повышенной пористости в горных породах земной коры — горизонтов возможной миграции и локализации глубинных углеводородов. *Электронный журнал «Глубинная нефть»*. 2014. Т. 2. № 9. С. 1434—1448.
- Корчин В.А. Термодинамика коровых зон низких сейсмических скоростей (новая научная гипотеза). Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2013б. 280 с.
- Корчин В.А. Упруго-плотностное термобарическое расслоение литосферы, коровые зоны низких сейсмических скоростей: *Материалы III тектонофиз. конф. в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле»*, Москва, 8—12 октября 2012. Т. 2. С. 390—393.
- Корчин В.А., Буртний П.А. Термобарическое петрофизическое моделирование литосферы участков земной коры Украинского щита с зонами низких сейсмических скоростей. *Геофиз. журн.* 2011. Т. 33. № 6. С. 82—

95. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.33i6.2011.116795>.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Карнаухова Е.Е. Породы гранулитового комплекса: их упругие параметры и прогноз распространения в земной коре Украинского щита. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 3. С. 99—109.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Карнаухова Е.Е. Петрофизическое моделирование участков земной коры с зонами низких сейсмических скоростей: *Материалы X Междунар. конф. «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты»*. Киев, 2011, P056, CD ROM.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Карнаухова Е.Е. Разуплотнение метаморфических пород в термодинамических условиях земной коры (экспериментальные данные). *Геофиз. журн.* 2018. Т. 40. № 4. С. 107—132. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140612>.
- Корчин В.А., Буртный П.А., Коболев В.П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013. 312 с.
- Кутас Р.И. Поле тепловых потоков и теоретическая модель земной коры. Киев: Наук. думка, 1978. 140 с.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Буртный П.А. Геофизические приложения результатов *PT*-изучения упругих характеристик горных пород. В кн.: *Свойства и состояние минерального вещества в недрах Земли*. Москва: Наука, 1989. С. 56—72.
- Лебедев Т.С., Корчин В.А., Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Шепель С.И. Физические свойства минерального вещества в термобарических условиях литосферы. Киев: Наук. думка, 1986. 198 с.
- Рейдер Э. Флюидные включения в минералах. В 2-х томах. Москва: Мир, 1987. 632 с.
- Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. Львов: Изд-во ЗУКЦ, 2005. 364 с.
- Korchin, V. (2017). Anomalies of low density in the crystalline crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons. In *Oil and Gas Exploration: Methods and Application* (pp. 237—257). American Geophysical Union, Wiley.
- Korchin, V.A., & Karnaukhova, E.E. (2007). Effect of mineral content of granitoids of the Ukrainian shield on the change of their elastic parameters in different thermobaric conditions of the lithosphere (by experimental data). *XXIV IUGG General Assembly «Earth: our changing planet», July 2nd—13th, 2007*. Perugia, Italy, JSS001.

The density of magmatic, ultrametamorphic rocks of the Ukrainian shield in model deep conditions of the Earth's crust (experimental data)

V.A. Korchyn, P.A. Burtnyi, E.Ye. Karnaukhova, 2020

S.I. Subbotin Institute of Geophysics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev, Ukraine

Analysis of the materials of geophysical studies using the data on the physical properties of rocks at various depths contributes to more substantiated understanding the structure of the Earth's crust horizons which are not accessible for drilling. In this regard, our method of petrophysical thermobaric modeling (PTBM) is a successful tool for this purpose. Its basic principle is a comparison (taking into account surface geology) of experimental data on changes in the physical parameters of rocks (in particular, the velocity of elastic longitudinal waves ($V_p=f(H)$) and density ($\rho=f(H)$) under *PT*-conditions of thermobaric deep regimes of the Earth's crust of the study regions and DSS and gravimetric information. Continuing the study of the elastic-density characteristics of rocks and minerals under high pressures and temperatures, we present the results of experiments to examine changes in

the density of igneous and ultrametamorphic rocks. They are widespread in the Ukrainian shield, mostly often found in the form of large blocks and massifs with the thickness of up to several tens of kilometers. Our long-term studies convincingly show that temperature significantly influences the relationships of V_p and ρ under conditions of great depths. As experiments demonstrate, they vary according to nonlinear laws with a depth indicating maxima and minima. The simultaneous effect of pressure and temperature on the mineral substance corresponding to the interval of depths of the Earth's crust of 5—20 km results in inversion zones of the elastic waves velocity and density. The zones are similar to the low velocity zones (LVZs) found in the Earth's crust by DSS methods and are characterized by rocks decompaction. Like the LVZs of reduced density (according to experimental data), the inversion zones are sensitive to the temperature conditions of the Earth's crust. With increasing deep heat flux, the rock density decreases, the ability of rocks decompaction increases, their permeability and hygroscopicity increase that can activate the process of fluid movement and their localization. Such crustal anomalies must be taken into account in refining the relationship of $V_p=f(\rho)$ at various depths (the most important relation in seismic-gravity modeling and PTBM). In most cases, this relationship for all specimens of rocks at certain depths is far from linear one contrary to popular opinion. First of all, this observation is explained by the complex dependences of the elastic and density characteristics of rocks with depth. The materials of an experimental study of the elastic-density characteristics of igneous and ultrametamorphic rocks of the Ukrainian shield under model deep conditions of the Earth's crust are widely used for petrophysical thermobaric modeling of specific sections of the deep horizons of the Earth's crust of various regions of the planet.

Key words: rock density, thermodynamic decompaction, pressure, temperature, «velocity—density», petrophysical thermobaric modeling.

References

- Burtnyy, P.A., Korchin, V.A., & Karnaukhova, E.E. (2013). *Modeling of the material composition of deep horizons of the earth's crust (new concept of interpretation of geophysical data)*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 188 p. (in Russian).
- Starostenko, V.I., & Gintov, O.B. (Eds.). (2013). *The Kirovograd ore area. Deep structure. Tectonophysical analysis. Ore deposits*. Kiev: Galaktika, 500 p. (in Russian).
- Korchin, V.A. (2015). Low velocity zones of thermobaric origin in the crystalline crust. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(5), 46—65. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111145> (in Russian).
- Korchin, V.A. (2013a). Crustal zones of low velocities are promising horizons for localization of deep hydrocarbons. *Glubinnaya neft*, 1(8), 1099—1116 (in Russian).
- Korchin, V.A. (2011). Petrophysical features of low seismic velocity zones in the earth's crust and their thermobaric instability: *Proc. of the XVII All-Russian conference with international participation: «Problems of seismotectonics»*, Moscow, September 20—22, 2011 (pp. 273—277) (in Russian).
- Korchin, V.A. (2007). Structural features of the mineral environment in the *PT*-conditions of various depths of the earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(3), 49—77 (in Russian).
- Korchin, V.A. (2014). Thermobaric modeling of anomalies of increased porosity in rocks of the earth's crust — horizons of possible migration and localization of deep hydrocarbons. *Electronic magazine «Deep Oil»*, 2(9), 1434—1448 (in Russian).
- Korchin, V.A. (2013b). *Thermodynamics of crustal zones of low seismic velocities (new scientific hypothesis)*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 280 p. (in Russian).
- Korchin, V.A. (2012). Elastic-density thermobaric stratification of the lithosphere, crustal zones of low seismic velocities: *Proc. of the III tectonophysical conference at the IPE RAS «Tectonophysics and topical issues of Earth sciences»*, Moscow, October 8—12, 2012 (Vol. 2, pp. 390—393) (in Russian).
- Korchin, V.A., & Burtnyy, P.A. (2011). Thermobaric

- petrophysical modeling of the lithosphere of the parts of the earth's crust of the Ukrainian Shield with zones of low seismic velocities. *Geofizicheskiy zhurnal*, 33(6), 82—95. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v33i6.2011.116795> (in Russian).
- Korchin, V.A., Burtnyy, P.A., & Karnaukhova, E.E. (2007). Rocks of the Granulite Complex: Their Elastic Parameters and Prediction of Distribution in the Earth's Crust of the Ukrainian Shield. *Geofizicheskiy zhurnal*, 29(3), 99—109 (in Russian).
- Korchin, V.A., Burtnyy, P.A., & Karnaukhova, E.E. (2011). Petrophysical modeling of areas of the earth's crust with zones of low seismic velocities: *Proc. of the X international conference "Geoinformatics: theoretical and applied aspects"*, Kiev (P056, CD ROM) (in Russian).
- Korchin, V.A., Burtnyy, P.A., & Karnaukhova, E.E. (2018). Decompaction of metamorphic rocks under thermodynamic conditions of the earth's crust (experimental data). *Geofizicheskiy zhurnal*, 40(4), 107—132. <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v40i4.2018.140612> (in Russian).
- Korchin, V.A., Burtnyy, P.A., & Kobolev, V.P. (2013). *Thermobaric petrophysical modeling in geophysics*. Kiev: Naukova Dumka, 312 p. (in Russian).
- Kutas, R.I. (1978). *Heat flow field and theoretical model of the earth's crust*. Kiev: Naukova Dumka, 140 p. (in Russian).
- Lebedev, T.S., Korchin, V.A., & Burtnyy, P.A. (1989). Geophysical applications of the results of RT-study of the elastic characteristics of rocks. In *Properties and state of mineral matter in the bowels of the Earth* (pp. 56—72). Moscow: Nauka, (in Russian).
- Lebedev, T.S., Korchin, V.A., Savenko, B.Ya., Shapoval, V.I., & Shepel, S.I. (1986). *Physical properties of mineral matter under thermobaric conditions of the lithosphere*. Kiev: Naukova Dumka, 198 p. (in Russian).
- Raider, E. (1987). *Fluid inclusions in minerals*. Moscow: Mir, 632 p. (in Russian).
- Shcherbakov, I.B. (2005). *Petrology of the Ukrainian Shield*. Lvov: Publishing house ZUKTs, 364 p. (in Russian).
- Korchin, V. (2017). Anomalies of low density in the crystalline crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons. In *Oil and Gas Exploration: Methods and Application* (pp. 237—257). American Geophysical Union, Wiley.
- Korchin, V.A., & Karnaukhova, E.E. (2007). Effect of mineral content of granitoids of the Ukrainian shield on the change of their elastic parameters in different thermobaric conditions of the lithosphere (by experimental data). *XXIV IUGG General Assembly «Earth: our changing planet»*, July 2nd—13th, 2007. Perugia, Italy, JSS001.

Густина магматичних та ультраметаморфічних порід Українського щита в модельних глибинних умовах земної кори (експериментальні дані)

В.О. Корчин, П.О. Буртний, О.Є. Карнаухова, 2020

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ, Україна

Аналіз матеріалів геофізичних досліджень із залученням даних щодо фізичних властивостей гірських порід на різних глибинах сприяє обґрунтованішому розумінню будови горизонтів земної кори, недоступних бурінню. У цьому аспекті успішним є запропонований нами метод петрофізичного термобаричного моделювання (ПТБМ). В основі його побудов лежить зіставлення (з урахуванням поверхневої геології) експериментальних даних щодо зміни фізичних параметрів гірських порід (зокрема швидкості поширення пружних поздовжніх хвиль, $V_P=f(H)$, і густини ($\rho=f(H)$) в *PT*-умовах, які відповідають термобаричним глибинним режимам земної

кори досліджуваних регіонів, з матеріалами ГСЗ і гравіметрії. Як продовження вивчення пружногустинних характеристик гірських порід і мінералів за високих тиску і температури наведено результати експериментальних досліджень зміни густини магматичних і ультраметаморфічних порід. Вони поширені практично повсюдно в межах Українського щита, найчастіше — у вигляді великих блоків і масивів потужністю до декількох десятків кілометрів. Нашими багаторічними дослідженнями переконливо показано, що в умовах великих глибин на залежності V_p і ρ істотно впливає температура. Згідно з експериментами, ці параметри змінюються за нелінійними законами з проявом на їх залежностях з глибиною максимумів і мінімумів. За програмних одночасних впливів на мінеральну речовину тиску і температури, що відповідають інтервалу глибин земної кори 5—20 км, виявлено зони інверсії швидкості поширення пружних хвиль у породах і їх густини, подібно до виявлених методами ГСЗ у земній корі зон низьких швидкостей (ЗНС), які супроводжуються розуцільненням порід. Як і зони низьких сейсмічних швидкостей, горизонти зниженої густини (за експериментальними даними) чутливі до температурних режимів земної кори. З підвищенням глибинного теплового потоку знижується густина порід, активізується здатність порід до розуцільнення, підвищуються їх проникність і гігроскопічність, що може активізувати процес переміщення флюїдів, їх локалізацію. Подібні корові аномалії необхідно враховувати при уточненні залежності $V_p=f(\rho)$ на різних глибинах (найважливіше співвідношення при сейсмогравітаційному моделюванні і ПТБМ). У більшості випадків цей зв'язок для всіх різновидів порід на певних глибинах далекий від лінійного, як часто його уявляють. Насамперед це можна пояснити складними залежностями пружних і густинних характеристик гірських порід з глибиною. Матеріали експериментального вивчення пружногустинних характеристик магматичних і ультраметаморфічних порід Українського щита в модельних глибинних умовах земної кори широко використовують для петрофізичного термобаричного моделювання конкретних ділянок глибинних горизонтів земної кори в різних регіонах планети.

Ключові слова: густина порід, термодинамічне розуцільнення, тиск, температура, «швидкість—густина», петрофізичне термобаричне моделювання.