

## ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ЗОНЫ НИЗКИХ СЕЙСМИЧЕСКИХ СКОРОСТЕЙ ОТ МИНЕРАЛЬНОГО СОСТАВА ПОРОД УКРАИНСКОГО ЩИТА В РАЗЛИЧНЫХ *PT*-УСЛОВИЯХ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Е.Е. Карнаухова**

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, просп. Акад. Палладина, 32, Киев 03680, Украина,  
e-mail: karnauhovae@gmail.com*

На основе детального петрографического анализа основных петротипов изверженных и метаморфических пород Украинского щита, обобщения имеющейся геолого-геофизической информации о структурно-тектоническом положении и особенностях формирования районов развития исследуемых пород, а также по данным экспериментальных исследований упругих параметров при высоких давлениях и температуре определена степень влияния минерального состава пород щита на проявление зон низких сейсмических скоростей. В ходе исследований получены статистически обоснованные корреляционные зависимости скорость—минеральный состав для различных глубин. Установлено, что в зонах низких скоростей влияние минерального состава на упругие параметры пород невысокое и значительно слабее влияния структурного преобразования пород.

**Ключевые слова:** минеральный состав, давление, температура, скорость распространения упругих волн, корреляционные зависимости, зоны низких скоростей.

На современном этапе развития геофизической науки неуклонно возрастает интерес к петрофизическим исследованиям горных пород в условиях высоких давлений (*P*) и температур (*T*). Изучение влияния минерального состава горных пород на их упругие свойства в различных термобарических (*PT*) режимах опытов остается одной из важных задач геофизики. Такие экспериментальные исследования на современных автоматизированных термобарических установках позволяют имитировать *PT*-условия земной коры до глубины 25–30 км, прогнозировать состав и состояние минерального вещества земной коры с глубиной, более однозначно интерпретировать материалы глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ).

Для изучения упругоплотностных параметров пород Украинского щита (УЩ) была отобрана представительная коллекция минеральных образований (более 2000 образцов). Для 300 образцов были изготовлены шлифы и проведен их петрографический анализ. Исследуемые породы — различные по составу и возрасту образования магматических, ультраметаморфических и метаморфических комплексов, слагающих территорию УЩ. Образцы пород отобраны по керну неглубоких скважин (в основном центральной части УЩ), Кировоградской глубокой скважины СГ-3000, Криворожской сверхглубокой скважины СГ-8, а также из обнажений в пределах исследуемой территории.

Наиболее полно характеризуют регион следующие группы пород (табл. 1) [4, 5]: 1 — грани-

ты равномернозернистые; 2 — граниты порфирировидные; 3 — граниты трахитоидные; 4 — граниты рапакиви; 5 — плагиограниты; 6 — диориты, кварцевые диориты; 7 — габбро, габбро-нориты; 8 — лабрадориты; 9 — пироксениты; 10 — чарнокитоиды; 11 — гнейсы биотитовые; 12 — гнейсы пироксеновые, амфиболовые, пироксен-амфиболовые, амфибол-биотитовые.

Группа магматических и ультраметаморфических пород наиболее разнообразна по составу, структурно-текстурным особенностям и возрасту. Выделяются несколько групп гранитоидов, диориты, чарнокитоиды, а также породы основного—ультраосновного состава: лабрадориты, габбро-нориты, пироксениты.

Большую часть изученной коллекции составляют гранитоиды. Это породы с типичным плагиоклаз-микроклин-кварцевым составом и незначительным содержанием темноцветных минералов. Среди них выделены группы пород, которые различаются структурно-текстурными особенностями, соотношением содержаний главных породообразующих минералов, степенью вторичных изменений. По этим признакам гранитоиды были разбиты на: мелко-, среднезернистые (равномернозернистые житомирские) и порфирировидные (кировоградские) граниты. В отдельную группу выделены порфирировидные трахитоидные граниты, слагающие Новоукраинский массив в пределах Ингульского мегаблока, а также боковьянские граниты, образующие Боковьянский массив, расположенный в восточной части этого же района. Сюда же были отнесены группы гранитов

Таблица 1. Характеристика исследуемых групп пород Украинского щита

Группа	Упругие параметры, км/с			$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	Объемная доля минералов в породах, %											
	$V_p$	$V_s$	$V_{p \text{ расч}}$		Пл	КПШ	Кв	Би	Пи	Амф	Акт	Ол	Гранат	Вт	Акц	Др. м
1	5,49	3,31	5,93	2,65	35,36	26,1	28	8,04	0,3	0,28	0	0	0	0,27	1,53	0
2	5,83	3,44	5,90	2,68	40,07	19,69	26,09	10,97	0,06	0,92	0	0	0	0	2,24	0
3	6,01	3,45	5,84	2,68	30,46	25,13	35,64	5,02	0	0	0	0	0,36	1,16	0,96	0,86
4	5,90	3,34	5,95	2,66	16,44	49,16	25,67	3,05	0,37	2,43	0	0	0,05	0,7	1,57	0
5	5,52	3,33	5,87	2,68	48,4	2,87	25,46	9,08	0,83	0,12	0	0	0	4,09	1,97	6,76
6	5,90	3,36	6,16	2,78	50,63	8,07	14,69	10,12	0	11,61	0	0	0	1,04	3,83	0
7	6,79	3,73	6,70	3,02	58,71	0	1,14	2,78	23,78	6,82	0	0	0	1	5,86	0
8	6,53	3,56	6,56	2,79	78,94	1,41	3,75	3,25	8,4	0,36	0	0	0	0,74	3,42	0
9	6,37	3,73	5,87	3,33	0	0	0	3,5	23,86	22,3	17,36	3,92	0	15,06	14	0
10	6,19	3,52	6,10	2,74	39,78	14,63	28,24	2,26	10,65	0,04	0	0	1,27	0,17	2,8	0
11	5,66	3,38	5,80	2,73	38,47	4,24	30,82	21,97	0,05	0,01	0	0	0,82	0,77	2,92	0
12	6,05	3,60	6,20	2,80	32,13	3,26	22,02	10,97	13,06	15,23	0	0	0,02	0,26	3,04	0

Примечание. Пл – плагиоклаз, КПШ – калиевый полевой шпат, Кв – кварц, Би – биотит, Пи – пироксен, Амф – амфибол, Акт – актинолит, Ол – оливин, Вт – вторичные минералы, Акц – акцессорные, Др. м – дробленая масса.  $V_p$  – скорость распространения упругих волн продольной,  $V_s$  – поперечной поляризации;  $\rho$  – плотность исследуемых пород при атмосферном давлении и комнатной температуре.

рапакиви Корсунь-Новомиргородского массива (характеризуются крупноовоидной порфирированной структурой) и плагиогранитов (отобраны в пределах Среднеприднепровского, частично Ингульского мегаблоков, имеют гипидиоморфнозернистую структуру).

Чарнокитоиды отобраны в пределах Бугского и Подольского блоков УЩ. Породы данного типа разнообразны по составу и структурным особенностям – это средне-, грубозернистые разновидности гипидиоморфнозернистой структуры. По соотношению главных породообразующих минералов – плагиоклаза, калиевого полевого шпата и кварца, а также по содержанию темноцветных минералов (в частности пироксена) и основности плагиоклаза из общей массы чарнокитоидов выделено несколько подгрупп: чарнокиты, плагио-чарнокиты и эндербиты.

Диориты, кварцевые диориты состоят из плагиоклаза, кварца, амфибола, биотита и частично калиевого полевого шпата. Структура гипидиоморфнозернистая. Отмечаются акцессорные минералы. Породы практически не подвержены вторичным изменениям.

Среди основных пород выделены лабрадориты, габбро, габбро-нориты. Лабрадориты – крупнозернистые породы панидиоморфнозернистой структуры. Главный породообразующий минерал – плагиоклаз, в небольшом количестве содержатся пироксен, реже кварц, биотит, амфибол и акцессорные (апатит и рудный минерал). Вторичные изменения наблюдаются в виде серицитизации плагиоклаза, хлоритизации биотита, реже – амфиболизации и биотитизации пироксена. Габбро и габбро-нориты – плотные, мелкозернистые породы габбровой структуры. Главные породообразующие минералы – плагиоклаз, пироксен, редко встречаются биотит, амфибол, кварц. Акцессорные минералы – апатит, циркон, рудный минерал. Породы слабо подвержены вторичным изменениям.

Ультраосновные породы, образцы которых отобраны в западной части УЩ, представлены пироксенитами. Структура их панидиоморфнозернистая. Крупные зерна вторичного амфибола с реликтами первичных минералов создают пойкилитовую структуру. Пироксен, иногда оливин чаще всего замещены роговой обманкой, актинолитом, реже хлоритом и биотитом. В большом количестве содержится рудный минерал.

Коллекция метаморфических пород (гнейсов) была разделена на группы по содержанию темноцветных минералов. Среди этих пород выделена группа биотитовых гнейсов, в которую вошли биотитовые и биотитовые с гранатом гнейсы, а также группа пироксеновых, амфиболовых гнейсов, иногда с незначительным содержанием биотита. Структура пород лепидогранобластовая или гранобластовая. Минеральный состав – плагиоклаз, кварц, реже микроклин, а также биотит, пироксен и амфибол в зависимости от выделенной группы. Отмечаются акцессорные и рудные минералы. Породы неизменные или со слабыми вторичными изменениями (хлоритизация, эпидотизация, амфиболизация темноцветных минералов и серицитизация плагиоклаза).

На следующем этапе породы изучались в лабораторных условиях при атмосферном давлении и комнатной температуре (табл. 1). Определенные в результате экспериментальных измерений значения  $V_p$  были сопоставлены с расчетными данными  $V_p$ . Расчеты проводились по формуле

$$\ln V_p = \sum M_i \ln V_{pi},$$

где  $M_i$  – процентное содержание породообразующих минералов;  $V_p$  – скорость распространения продольных волн [1, 10].

Такие исследования необходимы для предварительной оценки отобранной коллекции пород с последующим изучением при высоких термобарических режимах опытов. Цель сопоставлений – выявление образцов пород со скрытыми дефекта-

ми, высокой пористостью, трещиноватостью, а также склонных к выветриванию, что существенно осложняет основную задачу по выяснению степени влияния минерального состава пород на изменение их упругих параметров при различных термобарических условиях. Близкое совпадение расчетных и экспериментальных скоростей было критерием качества образцов и оптимальности коллекции для последующих исследований. Установлено, что средние квадратичные отклонения между расчетными и экспериментальными значениями не превышают величины экспериментального разброса (до 9%), который получают обычно при измерениях.

В условиях опытов при атмосферном давлении и комнатной температуре установлена высокая дифференциация пород по упругоплотностным параметрам в зависимости от их разновидности и минерального состава. Подтверждены общепринятые классические закономерности: с повышением основности магматических пород скорость распространения упругих волн в них и плотность увеличиваются, что хорошо согласуется с расчетами скорости по минеральному составу.

Наиболее представительные образцы (около 250) были исследованы при воздействии высокого гидростатического давления до 0,5–0,6 ГПа, а затем в условиях одновременного воздействия высокого гидростатического давления и температуры (более 100 образцов пород). В опытах значения  $P$  и  $T$  изменяли по  $PT$ -программам возможного регионального изменения этих параметров с глубиной. В соответствии с условиями эксперимента образец породы как бы постепенно “погружали” на заданную глубину, при этом одновременно измеряли значения  $V_p$ ,  $V_s$  и декремент объема. Применение разработанного и реализованного в Институте геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины (Киев) метода петрофизического термобарического моделирования (МПТМ) одновременного воздействия высоких давления и температуры, имитирующих конкретные глубинные термобарические режимы, позволило в относительно короткие сроки исследовать в различных  $PT$ -режимах физические характеристики большого количества образцов пород УЩ [2, 8, 9].

Все материалы исследований упругоплотностных характеристик пород ( $V_p$ ,  $V_s$ ,  $\rho$ ) в различных  $PT$ -условиях эксперимента и с разным минеральным составом каждого образца были статистически обработаны. Результаты имеют вид описательных статистик, гистограмм, линейных парных и множественных корреляционных взаимозависимостей [3, 5, 6]. Исследованиями установлено, что при высоком гидростатическом давлении дифференцирование пород по упругоплотностным параметрам на группы существенно не отличается от распре-

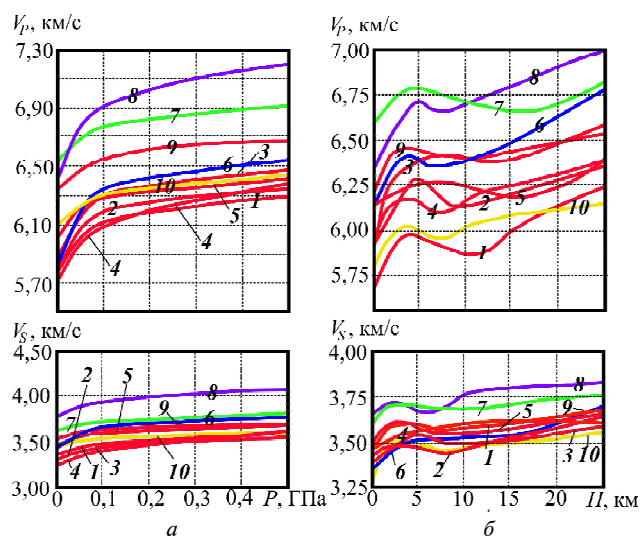


Рис. 1. Изменение средних значений скоростей  $V_p$  и  $V_s$ : а – при воздействии на породы высокого гидростатического давления ( $V_{p,s} = f(P_T)$ ); б – при одновременном воздействии на породы высоких давлений и температуры ( $V_{p,s} = f(PT) = f(H)$ ); 1 – граниты равномернoзернистые; 2 – граниты порфировидные; 3 – граниты рапакиви; 4 – плагиограниты; 5 – граниты трахитоидные; 6 – диориты; 7 – основные породы; 8 – пироксениты; 9 – чарнокитоиды; 10 – гнейсы

ления в условиях атмосферного давления. Упругие характеристики пород увеличиваются от кислых к более основным разновидностям. Одновременное воздействие на образцы глубинных  $PT$ -параметров не изменяет дифференциации пород по группам (рис. 1) [2, 4, 5, 9].

Если зависимости  $V_{p,s} = f(P_T)$  при высоком гидростатическом давлении для конкретного типа пород имеют два линейных участка приращения с различными градиентами изменения скоростей при повышении давления (рис. 1, а), то для всех групп пород (рис. 1, б) наблюдаются сложные зависимости  $V_{p,s} = f(PT) = f(H)$ , характеризующиеся экстремумами. На кривых отмечаются зоны инверсии скоростей с проявлением максимумов и минимумов [2, 5, 7–9]. Другими словами, с увеличением глубины при воздействии на образец породы термобарических параметров опыта после некоторого увеличения  $V_{p,s}$  наблюдается область их уменьшения. Затем скорости вновь возрастают. Таким образом, на кривых зависимостей  $V_{p,s} = f(PT) = f(H)$  образуются зоны низких скоростей (ЗНС) [2, 5, 7–9]. Отмеченное поведение кривых связано, вероятно, со структурными превращениями пород в различных условиях давлений и температур и во многом зависит от их минерального состава. Для поперечных волн эти зоны проявляются менее четко.

Экспериментально выявленные ЗНС хорошо коррелируют по конфигурации и местоположению с подобными аномалиями, выявленными в земной коре в естественных условиях методом ГСЗ. Природа таких зон до сих пор недостаточно

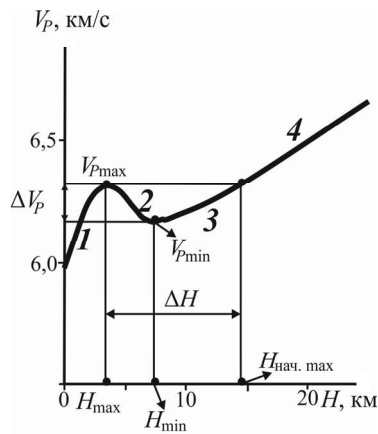


Рис. 2. Основные параметры зоны инверсии:  $\Delta H$  – ширина зоны понижения скоростей по глубине;  $\Delta V_p$  – максимальное уменьшение скорости; участки: 1 –  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_1$ , 2 –  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_{пс}$ , 3 –  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_2$ , 4 –  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_3$

изучена. Коровые ЗНС, как правило, ограничены по площади и вертикали и выявляются повсеместно на определенных глубинах (5–15 км) в различных геологических, тектонических и геотермических условиях. В результате широкого комплекса проведенных ранее [7] экспериментальных исследований пород методами рентгеноструктурного анализа, электронной микроскопии, петрографическими исследованиями, а также ультразвуковыми измерениями было предположено, что наличие таких зон обусловлено одновременным противоборствующим воздействием на породы соответствующих давлений и температур.

Исследования проводились на отдельных монокристаллах, поликристаллических соединениях, образцах различных групп пород, отдельных зернах минералов. Установлено, что в зонах инверсии с увеличением глубин минеральное вещество разуплотняется (явление дилатансии), что влечет снижение упругих скоростей. Породы характеризуются низкими модулями Юнга и сдвига, высокой хрупкостью (низкий коэффициент Пуассона), повышенной разуплотненностью (высокая сжимаемость) [7, 9]. При этом значительно увеличивается двойникование минералов, расширяются межзерновые границы вследствие дробления зерен, увеличивается количество магистральных микротрещин, происходят растрескивание и раз-

рушение газовой-жидких включений, миграция свободной воды и газа по микротрещинам породы, увеличиваются дефекты упаковки минералов [7]. Такие процессы свидетельствуют о хрупком разрушении минерального вещества в ЗНС. Дальнейшее повышение  $PT$ -параметров при экспериментальных исследованиях в сторону больших глубин может действовать по-разному на изменение скоростей распространения упругих волн.

Для некоторых зависимостей  $V_{p,s} = f(PT) = f(H)$  характерны вторые экстремальные ЗНС, которые проявляются вслед за первыми. Однако большинство исследуемых образцов имеет одну зону инверсии. Установлено, что снижение температурного режима в экспериментах ведет к уменьшению или исчезновению ЗНС [7]. На графиках зависимостей  $V_{p,s} = f(PT) = f(H)$  выделены четыре участка (рис. 2). Первый участок приращения  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_1$  соответствует началу интервалу глубин 0–5 км, где скорости  $V_p, V_s$  резко возрастают.

С глубиной здесь происходит интенсивное уплотнение пород при литостатическом давлении, закрывается большинство открытых микроскопических пор и трещин в породе и зернах породобразующих минералов. Этот участок на кривых  $V_p, V_s = f(PT) = f(H)$  сопоставим с начальным высокоградиентным участком  $\partial V_{p,s} / \partial P$  для зависимостей  $V_{p,s} = f(P_T)$  в интервале применения давления от 0 до 0,2 ГПа (см. рис. 1). Достигнув максимального предела,  $V_p, V_s$  начинают уменьшаться в интервале глубин 2–5 км. Образуется область интенсивного понижения скорости ( $(\partial V_{p,s} / \partial H)_{пс}$ ,  $H \approx 3–15$  км), а затем скорости вновь возрастают [5]. Область интенсивного увеличения скоростей на глубинах  $\approx 10–30$  км соответствует второму ( $(\partial V_{p,s} / \partial H)_2$ ,  $H \approx 7–18$  км) и третьему ( $(\partial V_{p,s} / \partial H)_3$ ,  $H \approx 12–30$  км) участкам приращения упругих скоростей (рис. 2).

Анализ гистограмм распределения значений глубины зоны понижения скоростей и ширины зоны инверсии по глубине для всех 12 исследуемых групп пород УЩ (рис. 3) позволил сделать следующие выводы. У 89 % образцов  $\Delta V_p$  составляет 0,02–0,16 км/с и не превышает значения 0,30 км/с. У 91 % образцов  $\Delta H$  соответствует интервалу глубин 6–20 км.

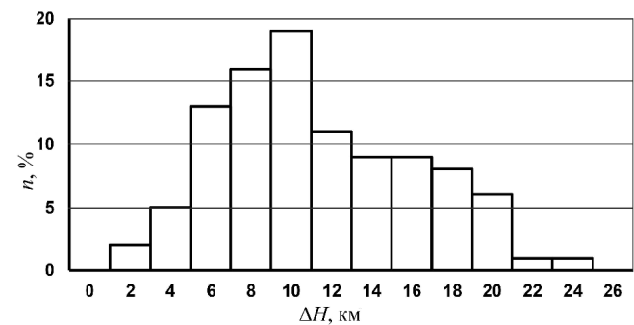
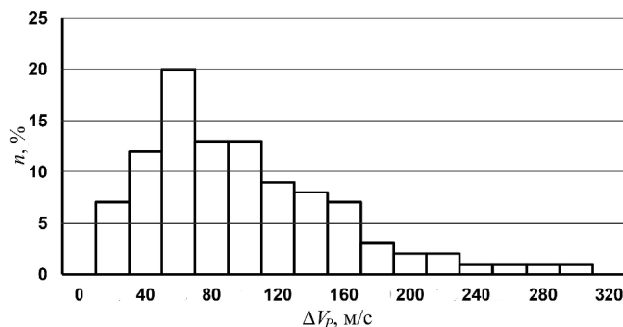


Рис. 3. Гистограммы распределения  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$  для всех групп пород Украинского щита

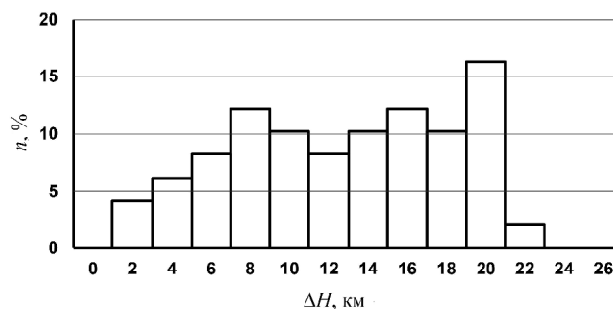
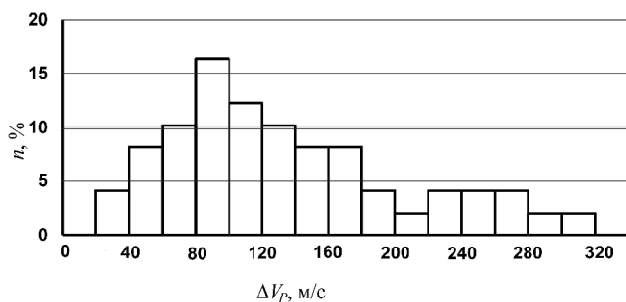


Рис. 4. Гистограммы распределения  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$  для всех групп гранитоидов Украинского щита

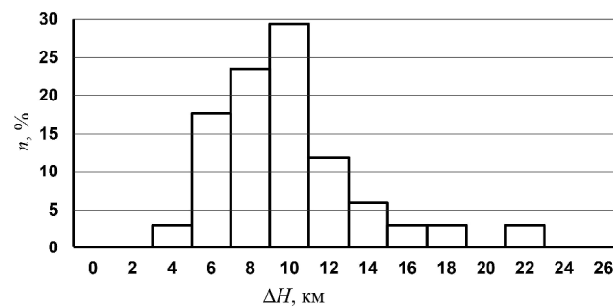
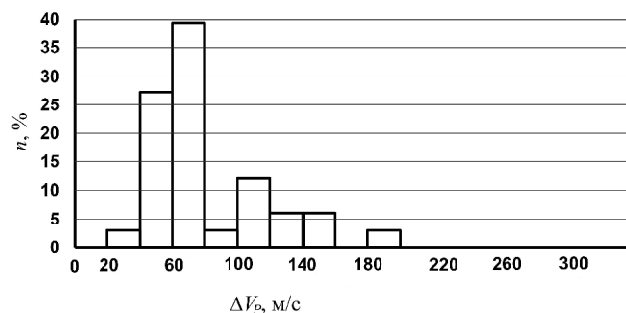


Рис. 5. Гистограммы распределения  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$  для всех групп гнейсов Украинского щита

Для выделяемых групп гранитоидов УЩ 73,5 % значений  $\Delta V_p$  приходится на интервал 0,04–0,16 км/с и также не превышает значения 0,30 км/с. Для  $\Delta H$  почти 80 % значений распределяется на глубинах 8–20 км (рис. 4).

Диапазон изменения значений  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$  для гнейсов несколько уже, а их значения меньше (рис. 5): 67 % значений  $\Delta V_p$  приходится на интервал 0,04–0,08 км/с; 82 % значений  $\Delta H$  распределяется на глубинах 6–12 км.

Таким образом, у большинства образцов УЩ  $\Delta V_p$  составляет 0,02–0,16 км/с, а  $\Delta H$  характеризует интервал глубин 6–20 км.

При дальнейшем увеличении давления и температуры по определенным программам опытов (при *PT*-экспериментах) происходит уплотнение минерального вещества – возрастают упругие параметры среды за зоной инверсии. В пределах 16–20 км и глубже наблюдается участок линейного увеличения скоростей для всех групп пород. Области интенсивного повышения скоростей характеризуются пониженной сжимаемостью и повышением пластичности пород (коэффициент Пуассона возрастает). На третьем участке экспериментальных кривых имеет место “совершенство” породы в результате вещественных и структурных (на уровне элементарных дефектов) преобразований. Включаются механизмы, характерные для пластических деформаций среды, что способствует “улучшению” её упругих параметров (возрастают плотность и скорость распространения упругих волн) [7].

В основном, сложные зависимости  $V_p, V_s = f(PT) = f(H)$  связаны со структурными преобразованиями пород при различных давлениях и тем-

пературах. Очевидно, эти преобразования во многом зависят и от минерального состава пород. Статистический и корреляционный анализ данных экспериментальных измерений упругих характеристик пород совместно с материалами петрографических исследований позволил ответить на некоторые вопросы о связи минерального состава пород и изменения  $V_p, V_s$  при программных *PT*-условиях опытов.

Для целей установления связи ЗНС и минерального состава были исследованы зависимости градиентов понижения  $(\partial V_p / \partial H)_{\text{ПС}}$  и увеличения  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_2$  упругих скоростей от минерального состава в зоне инверсии графиков изменения  $V_p = f(PT) = f(H)$  (см. рис. 2). Согласно данным табл. 2, высокие значения градиентов увеличения скорости присущи гранитоидам, чарнокитоидам и гнейсам биотитовым, низкие – гранитам трахитоидным. В состав исследуемых гранитоидов и гнейсов входит большое количество кварца. Таким образом, породы с повышенным его содержанием дают наибольшие среди всех других групп пород зоны пониженных скоростей и, соответственно, наибольшие значения градиентов увеличения упругих скоростей в зоне инверсии. Самые высокие значения градиентов  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_2$  и  $(\partial V_p / \partial H)_{\text{ПС}}$  в ЗНС наблюдаются для гранитов порфировидных, гранитов рапакиви и гнейсов биотитовых, которые характеризуются низкими начальными значениями упругих скоростей. Самые низкие значения  $(\partial V_{p,s} / \partial H)_2$  установлены для плагиогранитов, а  $(\partial V_p / \partial H)_2$  и  $(\partial V_p / \partial H)_{\text{ПС}}$  – для гранитов трахитоидных (табл. 2).

На рис. 6 показаны зависимости значений глубины зоны инверсии от значений ширины



Таблица 2. Средние значения параметров, характеризующих зону низких сейсмических скоростей

Породы	$V_0$ , км/с	$V_{s_0}$ , км/с	$\Delta V_p$ , км/с	$\Delta H$ , км/с	$V_{pmax}$ , км/с	$V_{pmin}$ , км/с	$H_{max}$ , км	$H_{min}$ , км	$H_{нач max}$ , км	$(\partial V_p/\partial H)_2$	$(\partial V_s/\partial H)_2$	$(\partial V_p/\partial H)_{НС}$
Граниты равномернозернистые	5,6	3,31	0,11	9	6,08	5,97	4,46	10,5	16,38	0,023	0,012	-0,022
Граниты рапакиви	5,83	3,35	0,11	10,6	6,36	6,25	7,05	13,7	17,55	0,055	0,014	-0,029
Граниты порфировидные	5,91	3,39	0,15	12,1	6,26	6,11	6,21	13,21	18,36	0,030	0,010	-0,022
Плагииграниты	5,92	3,37	0,08	10,5	6,16	6,13	4,79	6,36	14,36	0,012	0,010	-0,018
Граниты трахитоидные	6,07	3,46	0,08	13,8	6,52	6,41	5,67	15,77	24	0,010	0,005	-0,010
<b>Среднее по гранитоидам</b>	<b>5,87</b>	<b>3,38</b>	<b>0,11</b>	<b>11,2</b>	<b>6,23</b>	<b>6,17</b>	<b>5,64</b>	<b>11,91</b>	<b>18,13</b>	<b>0,026</b>	<b>0,011</b>	<b>-0,020</b>
Диориты, гранодиориты	6,16	3,35	0,07	8,5	6,41	6,34	5,75	9,75	14,25	0,015	0,006	-0,016
Лабрадориты	6,53	3,59	0,1	11,1	6,69	6,59	4,63	10,75	15,5	0,022	0,028	-0,020
Габбро, габбро-нориты	6,76	3,75	0,13	11,7	6,76	6,63	5,58	11,92	17,08	0,022	0,007	-0,018
Пироксениты	6,33	3,77	0,09	9,5	6,41	6,34	5,75	9,75	14,25	0,020	0,013	-0,018
Чарнокитоиды	6,27	3,49	0,11	10,2	6,56	6,45	3,86	9,33	14,06	0,028	0,009	-0,014
Гнейсы биотитовые	5,51	3,29	0,08	9,4	5,68	5,61	4,39	8,88	14,09	0,023	0,011	-0,027
Гнейсы пироксеновые, амфиболовые	6,09	3,52	0,09	10,3	6,15	6,06	7,84	13,81	18,12	0,019	0,006	-0,018

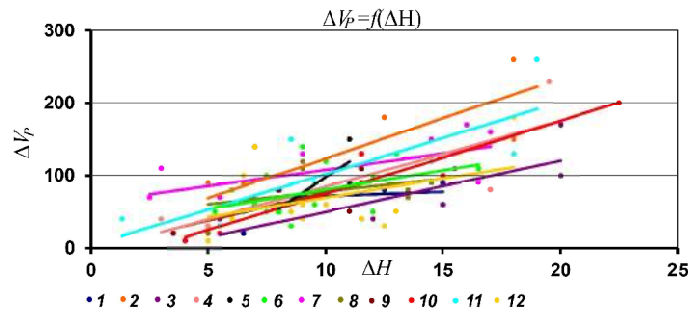


Рис. 6. Зависимости  $\Delta V_p = f(\Delta H)$  для всех исследуемых групп пород: 1 – граниты равномернозернистые; 2 – граниты порфировидные; 3 – граниты трахитоидные; 4 – лабрадориты; 5 – пироксениты; 6 – гнейсы биотитовые; 7 – граниты рапакиви, 8 – плагииграниты; 9 – диориты, гранодиориты; 10 – габбро, габбро-нориты; 11 – чарнокитоиды; 12 – гнейсы пироксеновые, амфиболовые

зоны понижения скоростей по глубине в различных группах пород. Установлено, что с увеличением ширины зоны инверсии по глубине ( $\Delta H$ ) для большинства изученных пород увеличивается и интенсивность понижения скоростей ( $\Delta V_p$ ). Исключение составляют мелкозернистые равномернозернистые граниты, у которых не найдено четкой зависимости между этими параметрами.

Были исследованы зависимости  $\Delta V_p = f(V_{p_0})$ ,  $\Delta H = f(V_{p_0})$ ,  $\Delta V_p = f(V_{pmax})$ ,  $\Delta V_p = f(V_{pmin})$ ,  $\Delta V_p = f(H_{max})$ ,  $\Delta V_p = f(H_{min})$ ,  $\Delta H = f(V_{pmax})$ ,  $\Delta H = f(V_{pmin})$ ,  $\Delta H = f(H_{max})$ ,  $\Delta H = f(H_{min})$  для всех групп пород УЩ (рис. 7). В ходе исследований была обнаружена слабая зависимость параметров ЗНС от исходного ( $P = 1$  атм, или  $\approx 0,1$  МПа) состояния образцов конкретной группы пород ( $V_{p_0}$ ,  $V_{s_0}$ ).

Однако тенденция зависимости этих параметров зон от разновидностей пород сохраняется. Как правило, чем выше начальные скорости, тем больше  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$ . Это подтверждает предположение о том, что, чем совершеннее структура породы, тем более она подвержена нарушениям в условиях программных высоких давлений и температур.

Анализ графиков зависимостей, показанных на рис. 7, выявил некоторые закономерности. Чем выше значения  $V_{p_0}$ , тем больше  $\Delta H$  и  $\Delta V_p$ . Исключение – диориты и плагииграниты. Чем выше значения  $H_{max}$ , тем меньше глубина зоны инверсии. Для зависимости  $\Delta H = f(H_{max})$  каких-либо закономерных связей не выявлено. С увели-

чением значений  $V_{pmin}$  и  $H_{min}$  увеличиваются глубина и ширина зоны инверсии. Исключение составляют габбро, габбро-нориты, пироксениты. Следует отметить, что для гнейсов среди всех перечисленных выше зависимостей значимых закономерных парных связей не выявлено (рис. 7). Исследования парных корреляционных зависимостей ( $r$ ) параметров ЗНС от минерального состава показали, что для кислых пород существует тесная корреляционная связь между значениями  $\Delta V_p$ ,  $\Delta H$  и процентным содержанием кварца в породе ( $r = 0,7 \div 0,8$ ). С его увеличением ширина ЗНС по глубине уменьшается, а глубина зоны имеет тенденцию к увеличению [5]. Для основных пород с увеличением содержания плагиоклаза в породе уменьшаются значения всех параметров ЗНС. В ультраосновных породах с увеличением процентного содержания оливина  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$  растут. Отмечаются высокие парные коэффициенты корреляции минимальных значений ( $V_{pmin}$ ) скоростей распространения упругих волн в зоне инверсии с содержанием главных породообразующих минералов во всех исследуемых группах магматических пород, а также минимальных значений глубины ЗНС ( $H_{min}$ ) с процентным содержанием кварца. Анализ множественных корреляционных зависимостей  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$  от процентного содержания главных породообразующих минералов показал, что основными минералами, влияющими на эту зону, для гранитоидов и гнейсов являются

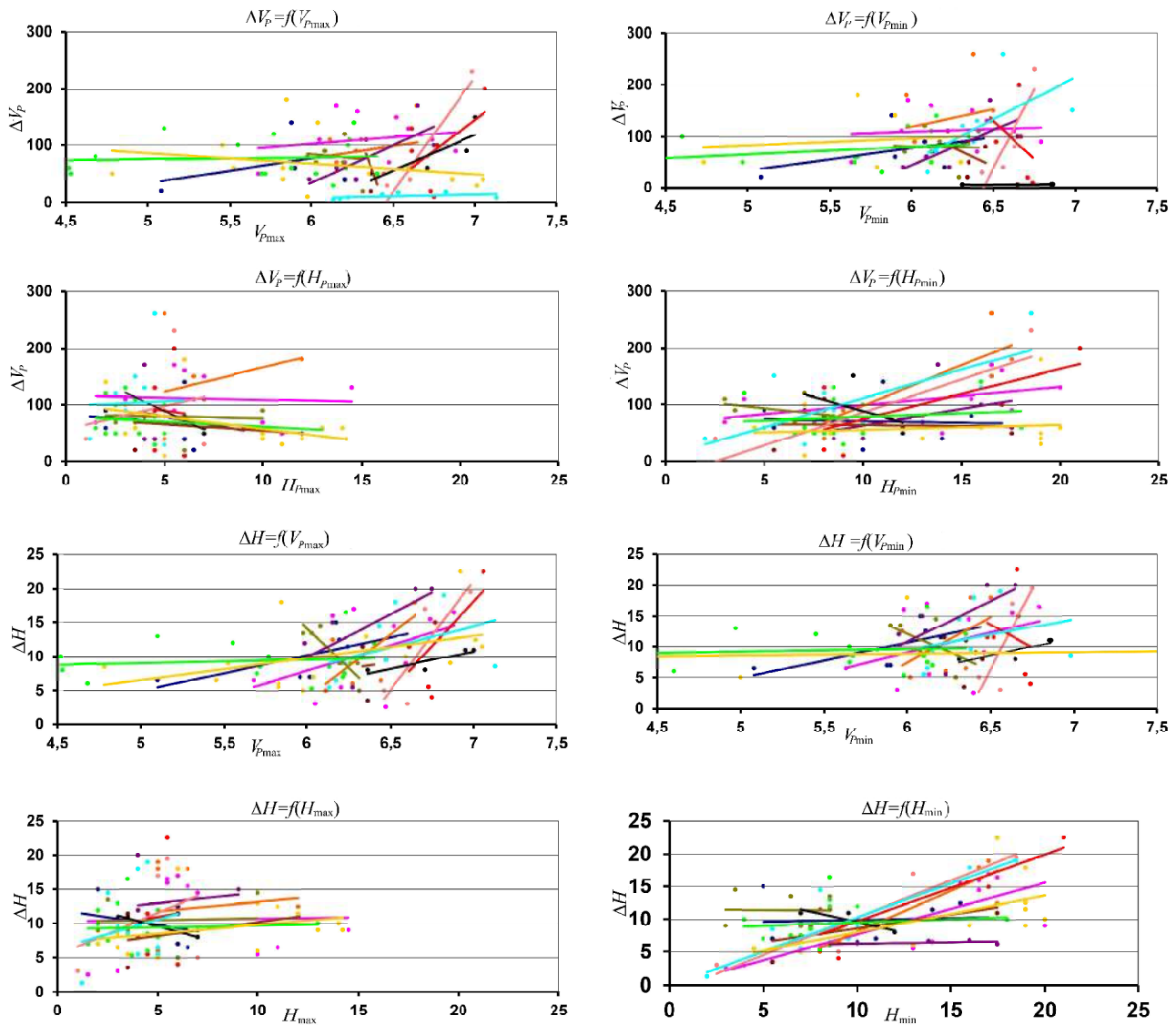


Рис. 7. Зависимости различных параметров зоны инверсии для всех исследуемых групп пород. Обозначения те же, что и на рис. 6

кварц и плагиоклаз. Увеличение содержаний кварца и плагиоклаза в породах кислого состава и в гнейсах ведет к уменьшению значений  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$ . Увеличение процентного содержания калиевого полевого шпата уменьшает или увеличивает значения  $\Delta V_p$  и  $\Delta H$ .

Были определены также коэффициенты множественной корреляции ( $R$ ) всех возможных сочетаний главных породообразующих минералов по группам. Для всех групп характерна тенденция к снижению зависимостей упругих параметров от процентного содержания главных породообразующих минералов с глубиной. Для  $V_s$  значения  $R$  меньше (рис. 8). На первом участке приращения упругих скоростей значения  $R$  растут. В зонах инверсии, соответствующих глубинам 3–16 км, значения  $R$  уменьшаются, а вслед за ЗНС вновь увеличиваются, оставаясь меньше, чем на первом участке малых глубин. Такие зависимости свидетельствуют о том, что с глубиной дифференциация пород по упругим параметрам слабеет (в пре-

делах земной коры). Глубинные  $PT$ -параметры не влияют на повышение этой дифференциации. В ЗНС влияние минерального состава на упругие параметры пород оказывается невысоким и значительно меньше, чем влияние структурных преобразований пород.

Глубже ЗНС разделение пород по минеральному составу и скорости распространения упругих волн хотя и снижается, но остается достаточным, чтобы это свойство минеральной среды возможно было использовать при МПТМ вещественного состава нижних горизонтов земной коры [2, 5, 8, 9].

**Выводы.** Для исследуемых магматических и метаморфических групп пород УЩ в атмосферных условиях, при воздействии высокого гидростатического давления до  $5000 \text{ кГ/см}^2$  ( $\approx 500 \text{ МПа}$ ), а также в условиях одновременного воздействия на образцы пород высоких давления и температуры, которые отвечают глубине 25–30 км земной коры, сохраняется дифференциация пород по уп-

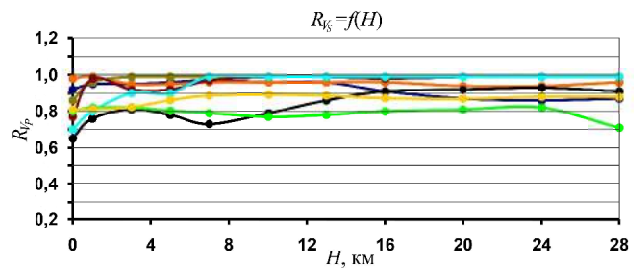
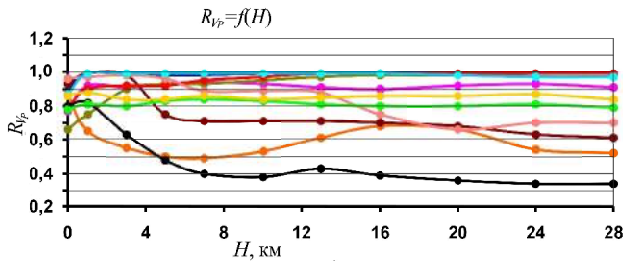


Рис. 8. Изменение коэффициентов множественной корреляции  $V_p$  и  $V_s$  с глубиной для исследуемых пород Украинского щита. Обозначения те же, что и на рис. 6

ругоплотностным параметрам. Скорости распространения упругих волн возрастают от кислых к основным разностям.

При воздействии на породы высоких  $P$  и  $T$  для всех групп пород УЩ наблюдаются сложные зависимости  $V_p, V_s = f(PT) = f(H)$ , которые характеризуются экстремальными изменениями  $V_p, V_s$  на различных глубинах с выделением ЗНС или зон инверсии. Природа появления зон инверсии при определенных температурах и давлениях в большей степени термодинамическая и в меньшей – связана с минеральным составом. Для большинства выделенных групп пород УЩ  $\Delta V_p$  составляет 0,02–0,16 км/с, а  $\Delta H$  соответствует интервалу глубин 6–20 км.

Для всех исследуемых групп пород УЩ характерна тенденция к снижению зависимостей упругих параметров от процентного содержания главных породообразующих минералов с глубиной. В ЗНС влияние минерального состава на упругие параметры пород невысокое и значительно меньше, чем влияние структурных преобразований пород.

1. Беликов Б.П. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород / Б.П. Беликов, К.С. Александров, Т.В. Рыжова. – М.: Наука, 1970. – 275 с.
2. Буртний П.А. Моделирование вещественного состава глубинных горизонтов земной коры (новая концепция интерпретации геофизических данных) / П.А. Буртний, В.А. Корчин, Е.Е. Карнаухова. – Саарбрюккен: LAP Lambert Akad. Publ., 2013. – 188 с.

3. Жуков М.Н. Статистичний аналіз геологічних даних / М.Н. Жуков. – К.: ІСДО, 1995. – 552 с.
4. Карнаухова Е.Е. Влияние минерального состава гранитоидов УЩ на изменение их упругих параметров в различных термобарических условиях литосферы (по экспериментальным данным) / Е.Е. Карнаухова, В.А. Корчин // Сучасні проблеми геологічної науки: зб. наук. праць Ін-ту геол. наук НАН України. – К., 2003. – С. 22–24.
5. Карнаухова О.Є. Пружно-щільнісні параметри гірських порід Українського щита в умовах високого тиску і температур: автореф. дис. ... канд. геол. наук: спец. 04.00.22 “Геофізика” / О.Є. Карнаухова. – К.: ІВЦ Тов-ва “Знання”, 2010. – 20 с.
6. Каплан А.В. Математика, статистика, економіка на комп'ютері / А.В. Каплан, В.Е. Каплан, М.В. Машенко. – М.: ДМК Пресс, 2006. – 600 с.
7. Корчин В.А. Термодинаміка корових зон низьких сейсмічних швидкостей (нова наукова гіпотеза) / В.А. Корчин. – Саарбрюккен: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. – 280 с.
8. Корчин В.А. Термобарическе петрофізическе прогнозне моделювання речовинного складу глибинних горизонтів літосфери при інтерпретації матеріалів глибинного сейсмічного зондування / В.А. Корчин, П.А. Буртний, Е.Е. Карнаухова // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики: Зб. наук. праць. – К., 2010. – С. 157–172.
9. Лебедев Т.С. Петрофізическі дослідження при високих  $PT$ -параметрах і їх геофізическі застосування / Т.С. Лебедев, В.А. Корчин, Б.Я. Савенко і др. – Київ: Наук. думка, 1988. – 248 с.
10. Фізическі свойства горних порід і корисних копалин (петрофізика): Справочник геофізика / Под ред. Н.Б. Дортмана. – М.: Недра, 1984. – 455 с.



# ЗАЛЕЖНІСТЬ ПАРАМЕТРІВ ЗОНИ НИЗЬКИХ СЕЙСМІЧНИХ ШВИДКОСТЕЙ ВІД МІНЕРАЛЬНОГО СКЛАДУ ПОРІД УКРАЇНСЬКОГО ЩИТА В РІЗНИХ *PT*-УМОВАХ ЕКСПЕРИМЕНТУ

О.Є. Карнаухова

Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, просп. Акад. Палладіна, 32, Київ 03680, Україна,  
e-mail: karnauhovae@gmail.com

На основі детального петрографічного аналізу основних петротипів вивержених і метаморфічних порід Українського щита, узагальнення наявної геолого-геофізичної інформації про структурно-тектонічне положення і особливості формування районів розвитку досліджуваних порід, а також за даними експериментальних досліджень пружних параметрів за високого тиску і температури визначено ступінь впливу мінерального складу порід щита на прояв зон низьких сейсмічних швидкостей. У ході досліджень отримано статистично обґрунтовані кореляційні залежності швидкість—мінеральний склад для різних глибин. Установлено, що в зонах низьких швидкостей вплив мінерального складу на пружні параметри порід невисокий і значно менший за вплив структурного перетворення порід.

**Ключові слова:** мінеральний склад, тиск, температура, швидкості поширення пружних хвиль, кореляційні залежності, зони низьких швидкостей.

## DEPENDENCE OF LOW VELOCITY ZONES PARAMETERS ON MINERAL COMPOSITION OF UKRAINIAN SHIELD ROCKS IN DIFFERENT *PT*-CONDITIONS OF EXPERIMENT

E.E. Karnaukhova

Institute of Geophysics of Ukraine National Academy of Science, 32 Palladin Ave., Kyiv 03680, Ukraine,  
e-mail: karnauhovae@gmail.com

**Purpose.** The purpose of the article is to conduct experimental studies of low velocity zone (LVZ) parameter dependences on the mineral content of Ukrainian Shield rocks in the programmed *PT*-conditions.

**Design/methodology/approach.** To solve the problem a method of multidimensional correlation-regression analysis was used, together with the explosion seismology data. The results obtained are presented as descriptive statistics, histograms, schedules, linear pair and plural cross-correlation dependences. Originally, the regional collection of rocks was preliminarily studied in laboratory conditions at atmospheric pressure and room temperature. The petrographic analysis was carried out. The most representative samples were investigated at hydrostatic pressure up to 0,5-0,6 Gpa. After this information, was statistically processed, we selected groups of samples which were studied under the simultaneous *P* and *T* effect. In these studies, *P* and *T* were changed according to the *PT*-program of possible regional change of these parameters with depth. According to the conditions of the experiment, a rock sample was supposed to “plunge” gradually to the preset depth and simultaneous measurements of the  $V_p$ ,  $V_s$  were made and the volume decrement was measured.

**Findings.** The experiments show that the  $V_p, V_s = f(PT) = f(H)$  dependences have complicated regularities: on the curves show velocity inversion zones with maxima and minima manifestation. Inversion zones change their width with depth ( $\Delta H$ ) and decrease the velocity maximally ( $\Delta V_p$ ). Here the rocks are characterized by low Young and shear modules, high brittleness (low Poisson's ratio), high discompaction (high dilatancy), and low thermal conductivity ( $\lambda$ ). The inversion zones established by laboratory experiments in most cases are in good agreement with LVZ in the Earth's crust from DSS profiles. For the most selected groups of rocks  $\Delta V_p$  is 0,02-0,16 km/s;  $\Delta H$  is in the depths interval of 6-20 km. In all the rock groups, elastic parameters dependences on the percentage content of rock-forming minerals tend to decline depth. In LVZ the influence of the mineral composition on elastic parameters is low and considerably less than structural transformations of rocks.

**Practical value/implications.** The obtained experimental and statistically treated data of a broad spectrum of Ukrainian Shield rocks may be used for petrophysical crustal modeling, enabling us to predict the content and state of the Earth's crust mineral matter.

**Keywords:** mineral composition, pressure, temperature, elastic waves propagation velocity, cross-correlation dependences, low velocity zones.

### References:

1. Belikov B.P., Aleksandrov K.S., Ryzhova T.V. *Uprugie svoystva porodoobrazujushhikh mineralov i gornyh porod* [Elastic properties of rock-forming minerals and rocks]. Moscow, Nauka, 1970, 275 p.
2. Burtynj P.A., Korchin V.A., Karnaukhova E.E. *Modelirovanie veshhestvennogo sostava glubinykh gorizontov zemnoy kory (novaja koncepcija interpretacii geofizicheskikh dannykh)* [Material composition modelling of the Earth's crust deep horizons (new conception of geophysical data interpretation)]. Saarbrücken, LAP Lambert Academic Publishing, 2013, 188 p.
3. Zhukov M.N. *Statystichnyy analiz geologichnykh danykh* [Statistical analysis of geological data]. Kyiv, ISDO, 1995, 552 p.
4. Karnaukhova E.E., Korchin V.A. *Vlijanie mineral'nogo sostava granitoidov Ukrainskogo shchita na izmenenie ih uprugih parametrov v razlichnykh termobaricheskikh usloviyah litocfery (po jeksperimental'nykh dannym)* [Effect of mineral content of

Ukrainian Shield granitoids on the change of their elastic parameters in different thermobaric conditions of the lithosphere (by experimental data)]. *Suchasni problemy geologichnoi nauky: Zbirnyk naukovykh prats*. Kyiv, 2003, pp. 22-24.

5. Karnaukhova E.E. *Pruzhno-shhil'nistni parametry girs'kyh porid Ukrains'kogo shhyta v umovah vysokogo tysku I temperatur: avtoref. dys. kand. geol. nauk: 04.00.22 "Geofizika"* [Elastic-density parameters of the Ukrainian shield rocks under conditions of high pressure and temperature. Abstract of the diss. Cand. Geology "Geophysics"]. Kyiv, 2010, 20 p.
6. Kaplan A.V., Kaplan V.E., Mashhenko M.V. *Matematika, statistika, jekonomika na komp'jutere* [Mathematics, statistics, economy on a computer]. Moscow, *DMK Press*, 2006, 600 p.
7. Korchin V.A. *Termodinamika korovyh zon nizkih seismicheskikh skorostej (novaja nauchnaja gipoteza)* [Thermodynamics of low seismic velocity crust zones (new scientific hypothesis)]. Saarbrucken, *LAP Lambert Academic Publishing*, 2013, 280 p.
8. Korchin V.A., Burtnyj P.A., Karnaukhova E.E. *Termobaricheskoe petrofizicheskoe prognoznoe modelirovanie veshhestvennogo sostava glubinnyh gorizontov litofery pri interpretacii materialov glubinnogo seismicheskogo zondirovanija* [Thermobaric petrophysical prognosis modelling of the material composition of lithosphere deep horizons during interpretation of the deep seismic sounding materials]. *Theoretical and applied aspects of geoinformatics*. Kyiv, 2010, pp. 157-172.
9. Lebedev T.S., Korchin V.A., Savenko B.Ya. *Petrofizicheskie issledovanija pri vysokih PT-parametrah i ih geofizicheskie prilozhenija* [Petrophysical high PT-studies and their geophysical applications]. Kyiv, *Naukova dumka*, 1988, 248 p.
10. *Fizicheskie svojstva gornyh porod i poleznyh iskopaemyh (petrofizika). Spravochnik geofizika* [Physical properties of rocks and minerals (petrophysics). Reference book of geophysicist; ed. N.B. Dortman]. Moscow, *Nedra*, 1984, 455 p.

Поступила в редакцию 16.02.2015 г.

Received 16/02/2015