

Разуплотнение метаморфических пород в термодинамических условиях земной коры (экспериментальные данные)

В. А. Корчин, П. А. Буртный, Е. Е. Карнаухова, 2018

Институт геофизики им. С. И. Субботина НАН Украины, Киев, Украина
Поступила 7 мая 2018 г.

При побудові узгодженої моделі літосфери Землі методами комплексної інтерпретації геофізичних даних з метою збіжності розрахункових хвильових і гравітаційних полів із спостереженнями широко використовують зв'язок швидкість—густина, властивий породам глибинних горизонтів кори. Матеріали експериментальних досліджень пружногустинних параметрів порід у різних термобаричних умовах дослідів, зокрема густини, суттєво доповнюють і виправляють раніше відомі визначення зв'язків швидкості і густини порід на різних глибинах. Уперше показано складні залежності $\rho=f(PT)$ із ділянками інверсії густини — термодинамічного розуцільнення порід, які необхідно враховувати під час петрогустинного термобаричного моделювання глибинних горизонтів земної кори. Існування зон розуцільнення мінеральної речовини літосфери із зниженням густини порід до $0,02 \text{ г/см}^3$ можливе у сучасних термобаричних умовах у земній корі на глибинах 5—15 км. Потужність таких зон може становити від 5 до 10 км. Розуцільнення порід, як правило, пов'язане зі структурними перетвореннями речовини, зумовленими протилежними явищами зміни об'ємного температурного розширення мінералів і їх стисливості у термобаричних умовах відповідних глибин. Як і зони низьких сейсмічних швидкостей, горизонти зниженої густини (за експериментальними даними) чутливі до зміни температурних режимів земної кори. З підвищенням температури глибинного теплового потоку знижується густина порід, активізується їх здатність до розуцільнення, підвищуються проникність і гігроскопічність, тобто активізується процес переміщення флюїдів, і, як наслідок, відбувається метаморфічне перетворення порід. Зони пониженої V_p і ρ є найактивнішими горизонтами сучасних геолого-геофізичних перетворень мінеральної речовини земної кори. Їх наявність може бути критерієм пошуку корисних копалин, оскільки вони найбільш проникні для мігруючої мінеральної речовини у земній корі.

Ключові слова: густина порід, термодинамічне розуцільнення, тиск, температура, зв'язок швидкість—густина, моделювання.

Введение. В решении задач, связанных с изучением строения и состава глубоких горизонтов земной коры, поиском полезных ископаемых, важное место занимают геофизические методы, тесно связанные с физическими свойствами и состоянием пород на изучаемых глубинах. Основное место среди них занимают сейсмические и гравитационные методы, для интерпретации результатов которых необходимы данные о скорости распространения волн ($V_{p,s}$) и плотности пород

(ρ) при различных температурах (T) и давлениях (P), характеризующих определенные горизонты возможного их залегания. Одной из задач комплексной интерпретации геофизических данных является построение согласованной модели литосферы Земли, в которой расчетные волновые и гравитационные поля совпадают с наблюдаемыми. Для этих целей широко используется связь «скорость—плотность» для пород различных геологических объектов.

Выполненные в последние годы экспериментальные исследования упругоплотностных характеристик горных пород с глубиной были направлены в основном на выявление закономерности изменения скорости распространения упругих продольных волн (V_P) и использование полученных данных совместно с материалами сейсмических исследований (ГСЗ) при петроскоростном моделировании с целью построения соответствующих моделей распределения пород с глубиной. Для уточнения и более качественного построения таких моделей необходимо привлечение материалов гравиметрических наблюдений (сейсмогравитационное моделирование), где основным элементом интерпретации является плотность горных пород [Берч, 1965; Korchin, Karnaukhova, 2007; Korchin, 2010; Буртный и др., 2013; Корчин и др., 2013; Кировоградский..., 2013; Корчин, 2014].

Продолжая изучение упругоплотностных характеристик горных пород и минералов при высоких давлениях и температурах, в настоящей статье представлены результаты экспериментальных исследований изменения плотности метаморфических пород с глубиной, развитых практически повсеместно на территории Украинского щита (УЩ) — гнейсов и кристаллосланцев. Из-за широкого проявления ультраметаморфических процессов они чаще всего встречаются в виде пачек мощностью в десятки или сотни метров или останцов и ксенолитов в мигматитах и гранитоидах. Вместе с тем в некоторых случаях эти породы выполняют крупные синклинальные структуры, такие как Приингульская синклиналь (мощность метаморфической толщи составляет около 14 км). Последняя является одной из структур Кировоградского рудного района, в пределах которого в последние годы осуществляется обширная программа комплексных геолого-геофизических исследований и который в настоящее время рассматривается как один из главных перспективных на полезные ископаемые районов Украины. В связи с

этим при интерпретации геофизической информации по изучению этой площади и, в частности, Приингульской синклинали методом петрофизического термобарического моделирования (ПТМ) крайне необходимы данные о упругоплотностных характеристиках горных пород с глубиной [Кировоградский..., 2013; Корчин и др., 2013].

Представленные ранее материалы о зависимостях V_P от PT -условий показали, что для различных групп магматических и метаморфических пород УЩ скорости имеют сложные закономерности их изменения с глубиной [Лебедев и др., 1972, 1977, 1986, 1989; Корчин, 2011, 2014, 2015; Корчин и др., 2013] с проявлением на графиках зон низких скоростей (ЗНС) в интервале P и T , соответствующих глубинам 5—15 км. Следует отметить, что ранее, в силу объективных причин, основное внимание уделялось изучению изменения скоростных характеристик горных пород и недостаточно — изучению плотности пород в различных термодинамических условиях опытов. Выполненные исследования дают возможность дополнить и исправить известные данные о зависимости «скорость—плотность» ($V_P=f(\rho)$) на различных глубинах, которые широко используются при сейсмогравитационном моделировании. Для этой цели в течение многих лет на территории УЩ отбиралась представительная коллекция различных метаморфических пород в количестве более 5000 образцов. Из них около 1000 гнейсов и сланцев. Обычно вся коллекция в начале изучалась при атмосферных условиях, затем каждый 10—15 образец — в условиях высокого давления и затем каждый 5—10 из них — при PT -параметрах [Лебедев и др., 1977, 1986, 1989; Корчин, 2013]. Последующие этапы исследований выполнялись после детальной статистической обработки данных предыдущего изучения. Аппаратура, используемая для исследований физических характеристик пород в различных условиях опытов, подробно описана в публикациях [Лебедев и др., 1972; Справочник..., 1969].

Методические особенности изучения плотности пород. При изучении зависимости $\rho, V_{p,s}=f(PT)=f(H)$ используется несколько конструкций аппаратов высокого квазигидростатического давления системы «цилиндр—поршень», в которых можно создать квазигидростатическое давление (P_k) до $(10—20) \cdot 10^3$ кГ/см² при температуре до 550 °С [Лебедев и др., 1972, 1986, 1989] (рис. 1). Средой, передающей давление, служат пластические материалы — свинец и пиррофиллит. Образцы пород имеют следующие размеры: диаметр 12—25 мм, высота до 25 мм. Аппараты этой конструкции оснащены устройствами для измерения изменения объема ячейки высокого давления с образцом при воздействии P и T . Это дает возможность определить декремент объема образца породы (после внесения соответствующих поправок), по которому рассчитываются значения его плотности в различных PT -условиях. Температура в камере до 350 °С при свинцовом уплотнении создается, как

правило, нагревательным устройством, размещенным на внешней стороне многослойного силового аппарата. Максимальная температура, к сожалению, ограничена температурой плавления свинца при $P \approx 6 \cdot 10^3$ кГ/см². Она измеряется термопарами, расположенными в двух-трех точках нагревателя, а также и в самой камере. Силовой частью установок квазигидростатического давления служат гидравлические прессы с максимальным усилием 125, 250 тс.

Важной отличительной особенностью изучения упругих характеристик горных пород при высоких PT -параметрах является одновременное изменение давления и температуры в аппарате высокого давления по специальным программам. В камере, где размещен образец породы, давление и температура одновременно изменяются соответственно их распределению с глубиной для конкретной геологической провинции (рис. 2) [Лебедев и др., 1986; Корчин и др., 2013].

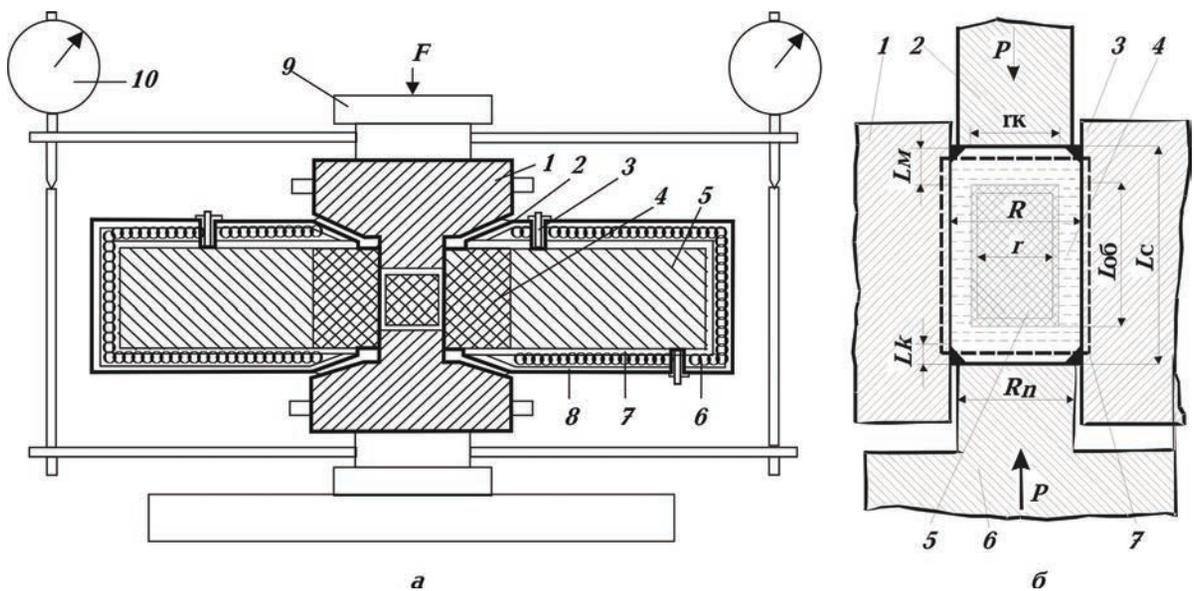


Рис. 1. Схема установки высокого квазिवсестороннего давления с измерительным приспособлением (а): 1 — плунжер с ультразвуковыми датчиками; 2 — образец в свинцовой оболочке, уплотненный стальными кольцами; 3 — термопара; 4 — матрица камеры; 5 — внешнее бандажное кольцо; 6 — нагревательный элемент; 7 — слой слюды; 8 — асбестовая изоляционная защита нагревателя; 9 — опорные плиты прессы; 10 — индикаторы перемещения поршня. Схема камеры высокого давления (б): 1 — матрица; 2 и 6 — поршни; 3 — уплотнительные кольца; 4 — среда, передающая давление; 5 — образец; 7 (штриховая линия) — деформация камеры и образца.

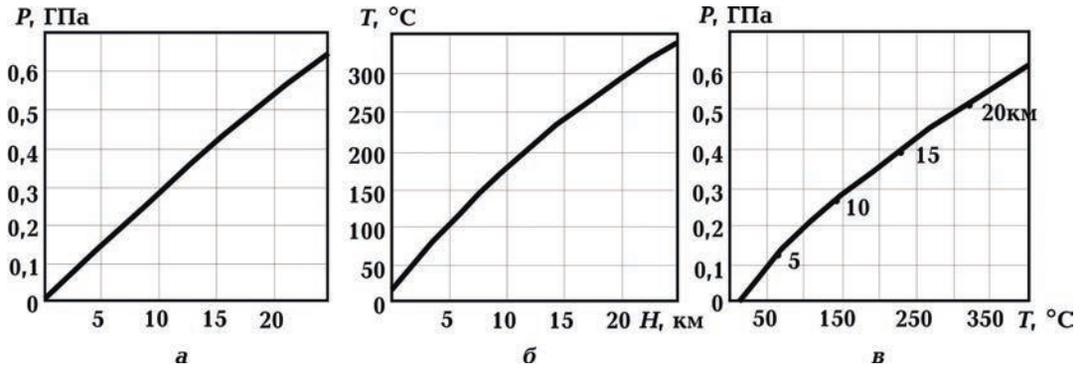


Рис. 2. Расчетные изменения с глубиной в земной коре давления (а), температуры (б) и PT -программа опытов (в).

Предварительно рассчитывается программа изменения с глубиной давления (на основании общих геолого-геофизических представлений и гравиметрии изучаемого района) (рис. 2, а) и температуры (по материалам геотермических исследований региона) (рис. 2, б). В соответствии с этими данными составляется программа выполнения опытов. При увеличении температуры в камере устанавливается необходимое давление (P изменяется одновременно с возрастанием T) (рис. 2, в). 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 образца, в некоторых случаях регистрируется время распространения продольных и поперечных упругих волн [Лебедев и др., 1972, 1986; Корчин и др., 2013].

Плотность горных пород ($\rho = F/V$, где F — вес образца, а V — его объем) при атмосферном давлении определялась путем гидростатического взвешивания образцов на аналитических весах. Среднеквадратичная ошибка ее измерений не превышала $0,002 \text{ г/см}^3$. В условиях высоких PT -условий плотность пород $\rho = f(PT) = F/V_{PT}$, где V_{PT} — объем образца породы при P и T , изменение которых необходимо определять в ходе эксперимента [Кобранова, 1986; Лебедев и др., 1977].

Рассмотрим расчетные соотношения для определения объемной удельной деформации горных пород в условиях ква-

зивсестороннего давления и определим погрешность ее вычисления. Аппаратура позволяет контролировать изменение размеров образца, находящегося в камере высокого давления, лишь косвенными методами. При изучении сжимаемости горных пород в установках высокого давления в камерах поршневого типа с использованием твердофазной среды, передающей давление, определение объема образца породы осложняется наложением деформации уплотнителя, элементов установки высокого давления и самой камеры (см. рис. 1, б). При изучении упругоплотностных параметров пород в условиях высоких температур при давлении было определено, что влияние дополнительных температурных эффектов значительно увеличивает погрешность расчета плотности [Лебедев и др., 1972, 1986; Балашов, 1987; Корчин и др., 2013]. Учет и, естественно, исключение всех этих дополнительных эффектов значительно повышает точность определения абсолютных значений измеряемых параметров на соответствующих программных PT -глубинах. Схематично деформация камеры при давлении показана на рис. 1, б.

При высоком давлении и температуре камера и твердофазный уплотнитель с кольцами изменяют свои объемы вследствие упругопластической деформации элементов установки и камеры. Принимая это во внимание, рассчитывается объемное изменение образца породы в камере по соотношению

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

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_{Π} — деформация поршней; C_2 — удельная объемная деформация уплотнителя, K — коэффициент радиальной деформации камеры.

Значения удельной объемной деформации уплотнителя C_2 (свинца, пиррофиллита) были рассчитаны на основании экспериментальных данных. Относительная погрешность определения удельной деформации уплотнителя при давлении $20 \cdot 10^3$ кг/см² составляет 2—3 %. Зная погрешность определения K и C_2 , можно вычислить погрешность определения удельной объемной деформации горных пород. Относительная погрешность вычисления удельной объемной деформации пород в свинцовой оболочке при высоких PT -параметрах не более 2,5 %.

Объекты исследований. По условиям образования гнейсы относятся преимущественно к амфиболитовой и гранулитовой фациям регионального метаморфизма. Следует отметить, что для пород амфиболитовой фации установлено развитие продуктов как прогрессивного, так и регрессивного метаморфизма. В результате последнего происходят процессы диафтореза — замещение высокотемпературных минералов (пироксен, амфибол — гранулитовая фация) более низкотемпературными (амфибол, биотит и др. — амфиболитовая фация).

Для гнейсов характерна сланцеватая или гнейсовая текстура с плоскостной или линейной ориентировкой крупных минеральных зерен. Нередко наблюдается полосчатое, ленточное или очковое строе-

ние, связанное с неоднородностью породы по составу и размерам зерен. Вторичные изменения в гнейсах проявлены слабо. Иногда можно наблюдать хлоритизацию пироксена, серицитизацию полевых шпатов. В некоторых образцах отмечены процессы динамометаморфизма, выраженные в дроблении главных породообразующих минералов.

Среди гнейсов по преобладающему содержанию темноцветных минералов было выделено несколько основных групп: биотитовые, пироксен-биотитовые, амфибол-биотитовые, амфиболовые, пироксен-амфиболовые и амфибол-пироксеновые.

Гнейсы биотитового состава — наиболее многочисленная группа пород изучаемой коллекции. Основная масса образцов была отобрана в центральной части Ингульского мегаблока, в частности в пределах Приингульской синклинали и ее бортовых частей, в связи с расширением здесь геолого-геофизических работ для поисков и выделения участков, перспективных на полезные ископаемые. Породы ингулоингулецкой серии отобраны из керна скважин, которые вскрывают непосредственно гнейсовую толщу, а также пробуренных в гранитах, где они залегают в виде прослоев или пластов небольшой мощности. Частично гнейсы отобраны из карьеров в западной части Ингульского мегаблока (Шполянская синклиналь), отдельные образцы — из карьеров в Северо-Западном районе УЩ и западном Приазовье, где они присутствуют в виде пачек и останцов среды гранитоидов.

Это мелкозернистые образования лепидогранобластовой структуры, размер зерен от 0,1 до 0,9 мм, в некоторых разностях от 0,03 до 0,3 мм в поперечнике. Текстура чаще всего сланцеватая, обусловленная параллельной ориентировкой чешуек биотита. В основном породы сложены изометричными и неправильными зернами плагиоклаза (альбит, альбит-олигоклаз, кислый андезин), кварца, чешуйками биотита (плагиогнейсы). Иногда встречается микроклин. Акцессорные минералы представлены рудным, апатитом, цирконом.

Встречаются разности, в составе которых в виде отдельных неравномерно расположенных скоплений присутствует гранат.

Среди описанных гнейсов присутствуют образцы, содержащие, помимо биотита, в своем составе небольшое количество пироксена или амфибола (пироксен-биотитовые, амфибол-биотитовые гнейсы).

Гнейсы амфиболового и пироксенового состава отобраны на территории Подольского, Бугского и Росинско-Тикичского мегаблоков УЩ, где они входят в состав днестровско-бугской и росинско-тикичской серий архея, наиболее развитых в этих районах. Единичные образцы — диафторированные представители западно-приазовской серии Приазовского мегаблока.

В целом это мелко- и среднезернистые породы массивной, часто гнейсовой текстуры, характеризующейся слоистостью, параллельной ориентировкой темноцветных минералов, чередованием полос различного минерального состава.

Среди исследованных пород выделяются разности, в которых основным породообразующим минералом является амфибол (более 50 %), иногда с небольшим содержанием биотита — собственно *амфиболовые или биотит-амфиболовые гнейсы*. Это мелко- и среднезернистые образования массивной или сланцеватой текстуры. Структура гранобластовая и нематогранобластовая. Размер зерен породообразующих минералов колеблется в пределах 0,1—0,9 мм в поперечнике, иногда достигая 0,55—1,85 мм. Главные породообразующие минералы: роговая обманка, плагиоклаз, кварц. Иногда присутствует биотит. Акцессорные минералы — рудный, апатит, циркон. В некоторых образцах содержание удлинённых призматических зерен роговой обманки (нематобластовая структура) превышает 70 %, в результате чего породу можно назвать амфиболитом.

В составе коллекции присутствует группа пород, в которых основными породообразующими темноцветными минералами являются амфибол и пироксен. В отличие от собственно гнейсов, содержа-

ние кварца в них невелико или он вообще отсутствует. Структура гранобластовая. Размер зерен породообразующих минералов от 0,2—0,75 мм, иногда до 1,5 мм в поперечнике. В небольшом количестве присутствует биотит и акцессорные минералы (рудный и апатит). Соотношение в содержании между пироксеном и роговой обманкой в отдельных образцах разное с преобладанием того или иного минерала, в результате чего конкретную породу можно назвать *пироксен-амфиболовым или амфибол-пироксеновым гнейсом или кристаллосланцем*. Среди исследованных пород встречались образцы, в которых включения пироксена составляют более 80 %. Они содержат две разновидности пироксенов — ортопироксен (ромбический пироксен) и клинопироксен (моноклинный пироксен). Такие породы можно охарактеризовать как *двупироксеновые кристаллосланцы*.

Результаты экспериментальных исследований. Для изучения плотностных параметров гнейсов УЩ была отобрана представительная коллекция (более 1000 образцов). У половины этих образцов измерялись скорости распространения упругих волн, пористость и плотность в атмосферных условиях и при комнатной температуре. Из более чем 100 образцов были изготовлены шлифы и проведен их петрографический анализ, определен их минеральный состав, выполнена первичная статистическая обработка данных, подобрана коллекция для дальнейших исследований в экспериментальных условиях высоких давлений и температур. Полученные в результате измерений значения упругих скоростей и плотности были сопоставлены с их расчетными данными по минеральному составу. Это необходимо для предварительной оценки отобранной коллекции пород для последующего изучения при высоких термобарических режимах опытов.

Близкое совпадение расчетных и экспериментальных значений скоростей служит критерием качества образцов и оптимальности коллекции для дальнейших исследований. Цель таких сопоставлений

— выявление образцов пород с существенными скрытыми дефектами, аномальной пористостью, трещиноватостью, а также подверженных выветриванию и существенно осложняющих основную задачу по выяснению степени влияния минерального состава, структуры пород на изменение их упругих параметров при различных термобарических условиях опытов [Беликов, 1970; Корчин, 2007, 2013а,б; Корчин и др., 2013]. Расчетные значения, как правило, несколько выше, чем полученные экспериментально. Основным допущением при расчетах является условие, что упругие свойства пород определяются в основном упругими параметрами порообразующих минералов, а пористость и другие структурные нарушения накладываются на эти значения. Из общей массы исключали образцы пород, у которых данные экспериментальных измерений упругих характеристик значительно отличались от расчетных. В результате этих сопоставлений была окончательно подобрана коллекция гнейсов УЩ для последующего изучения их плотностных характеристик при высоких термобарических режимах опытов. Данные предварительных измерений скоростей и плотностей гнейсов всех вместе и по группам приведены в табл. 1 и на рис. 3, 4 в виде гистограмм и вариационных кривых.

зующих минералов, а пористость и другие структурные нарушения накладываются на эти значения. Из общей массы исключали образцы пород, у которых данные экспериментальных измерений упругих характеристик значительно отличались от расчетных. В результате этих сопоставлений была окончательно подобрана коллекция гнейсов УЩ для последующего изучения их плотностных характеристик при высоких термобарических режимах опытов. Данные предварительных измерений скоростей и плотностей гнейсов всех вместе и по группам приведены в табл. 1 и на рис. 3, 4 в виде гистограмм и вариационных кривых.

Таблица 1. Скорости распространения упругих продольных волн, плотность, их расчетные значения и минеральный состав изученных групп гнейсов при атмосферном давлении и комнатной температуре

Номер образца	Район	V_p , км/с	ρ , г/см ³	Пл	КПШ	Кв	Би	Пир	Амф	Гр	Акц	$\rho_{расч}$	$V_{P\ расч}$
Гнейсы биотитовые													
1977/242	ПрИС	5,39	2,754	46,6	0	19,7	29	0	0	0	4,7	2,819	6,29
1977/95	ПрИС	6,02	2,720	31,6	0	37,5	28,3	0	0	0	2,6	2,801	6,31
2564/510	ПрИС	5,73	2,735	24,8	0	46,2	27,6	0	0	0	1,4	2,733	6,32
3162/100	ПрИС	6,08	2,770	44,6	0	28,9	25,3	0	0	0	1,2	2,767	6,28
1946/489	ПрИС	5,60	2,710	35,1	6,4	31,8	23,8	0	0	0	2,9	2,780	6,28
2376/494	ПрИС	6,00	2,729	42,4	0	33,2	21,9	0	0	0	2,5	2,772	6,97
1804	ПрИС	4,95	2,710	37,4	10,2	27,4	19,5	0	0		5,5	2,762	6,28
3160/70	ПрИС	5,50	2,717	37,3	0	43,7	18,4	0	0	0	0,6	2,730	6,32
2250/178	ПрИС	6,40	2,709	40,2	2	37,5	20,3	0	0	0	2	2,809	6,44
2032/166	ПрИС	6,08	2,720	38,4	1,2	40,3	17,1	0	0	0	3	2,759	6,34
6/17	ЗКМБ	6,15	2,690	36,8	0	46,9	16,3	0	0	0	0	2,778	6,33
3156/120	ПрИС	5,20	2,733	41,1	0	42,2	14,2	0	0	0	2,5	2,740	6,35
11/30	ГШЗ	5,57	2,650	37,5	7,6	41,8	12,1	0	0	0	1	2,670	6,29
2303/108	ПрИС	6,18	2,768	47,2	0	16,0	33,1	0	0	0	3,7	2841	6,26
3130	ПрИС	6,18	2,740	28,0	15,0	26,0	29,0	0	0	0	2,0	2,794	6,20
2374/236	ПрИС	6,03	2,716	31,4	12,1	27,7	27,2	0	0	0	2,6	2,785	6,29
2303/129	ПрИС	6,06	2,740	52,9	4,0	11,1	26,2	0	0	0	5,8	2,812	6,27
2303/173	ПрИС	5,79	2,689	32,4	9,4	29,8	25,6	0	0	0	2,8	2,782	6,25
2376/128	ПрИС	6,10	2,713	37,3	7,5	28,2	25,1	0	0	0	1,9	2,780	6,25
50/9	ЗКМБ	5,75	2,745	41,0	0	30,9	25,0	0	0	0	3,1	2,805	6,31
3010	ПрИС	4,47	2,810	42,0	2,0	30,0	24,0	0	0	0	2,0	2,830	6,29

Номер образца	Район	V_p , км/с	ρ , г/см ³	Пл	КПШ	Кв	Би	Пир	Амф	Гр	Акц	$\rho_{расч}$	V_p расч
1586,2	ПриС	5,58	2,710	32,0	0	43,0	23,0	0	0	0	2,0	2,730	6,33
2374/142	ПриС	6,06	2,726	45,9	0	29,2	23,7	0	0	0	1,2	2,770	6,28
1977/209	ПриС	6,04	2,728	40,7	1,0	33,0	23,1	0	0	0	2,2	2,773	6,30
1983/316	ПриС	5,77	2,699	39,3	0	37,2	20,4	0	0	0	3,1	2,716	6,33
1983/142	ПриС	5,81	2,722	43,7	0	35,0	18,8	0	0	0	2,5	2,753	6,32
1977/113	ПриС	6,02	2,717	40,7	0	37,6	18,4	0	0	0	3,1	2,748	6,33
2033/447	ПриС	5,98	2,726	40,8	0	36,9	18,4	0	0	0	3,9	2,765	6,35
1977/285	ПриС	5,52	2,737	38,2	0	39,8	17,5	0	0	0	4,5	2,786	6,36
1983/275	ПриС	6,20	2,719	41,3	0	43,1	14,1	0	0	0	1,5	2,717	6,34
2033/361	ПриС	6,06	2,657	40,4	0	41,6	14,9	0	0	0	3,1	2,748	6,36
2303/80	ПриС	5,21	2,622	49,9	0	25,6	17,7	0	0	0	6,8	2,729	6,35
2036/166	ПриС	6,11	2,694	39,3	6,1	36,0	16,7	0	0	0	1,9	2,735	6,29
2303/150	ПриС	5,30	2,661	51,0	2,5	22,9	16,7	0	0	0	6,9	2,785	6,34
Гнейсы биотитовые с гранатом													
2980	ПриС	4,35	2,720	35,0	0	48,9	16,7	0	0	3,6	1,1	2,742	6,75
2374/356	ПриС	6,04	2,711	44	1,7	33	16,5	0	0	2,8	2	2,744	6,36
3100	ПриС	4,25	2,780	19,4	0	39,3	29,2	0	0	6,1	6,0	2,856	6,49
3479	ПриС	5,30	2,780	37	1,3	25,8	28,2	0	0	5,4	2,3	2,786	6,39
2032/243	ПриС	5,32	2,746	36,9	0	37,5	11,9	0	0	11,9	1,8	2,805	6,59
Гнейсы пироксен-биотитовые													
2321/333	ПриС	5,85	2,736	40,6	0	42,6	13,6	1,8	0	0	1,4	2,733	6,37
2027/478	ПриС	5,55	2,660	32,5	18,1	29,8	13	4,3	0	0	2,3	2,717	6,29
19/56	ГШЗ	6,20	2,758	45	0	35,8	12,9	6,3	0	0	0	2,801	6,41
2242/325	ПриС	5,84	2,700	37,7	1,4	36,2	14,4	6,9	0	0	3,4	2,797	6,44
3320	ПриС	5,27	2,760	31	11	29	18	7	0	0	4	2,812	6,37
344Е	ЗПБ	5,53	2,842	41	7,4	22,8	15,7	8,7	0	0	4,4	2,821	6,41
2363/269	ПриС	5,87	2,700	34,6	5,1	34,9	13,8	8,7	0	0	2,9	2,795	6,44
2364/475	ПриС	5,71	2,733	56,7	0	12,1	16,4	13,2	0	0	1,6	2,775	6,46
58/75	ПоДБ	5,84	2,969	36,8	0	20,6	18,2	16,4	0	0	8	2,951	6,61
1977/198	ПриС	5,95	2,746	45,2	0	37,3	4,5	7,2	0	0	5,8	2,766	6,51
2018/252	ПриС	5,99	2,688	44,7	0	37,3	12,4	3,7	0	0	1,9	2,739	6,39
2026/394	ПриС	6,09	2,715	32,5	14,7	29,4	11,6	9,7	0	0	2,1	2,754	6,38
2237/356	ПриС	5,97	2,727	30,4	8,5	38,0	13,5	6,7	0	0	2,9	2,737	6,40
2364/199	ПриС	5,80	2,705	28,6	20,5	28,6	14,3	7,5	0	0	0,5	2,735	6,20
2364/341	ПриС	5,94	2,714	32,2	8,2	33,4	10,4	13,7	0	0	2,0	2,731	6,55
2364/392	ПриС	6,20	2,710	37,4	5,8	38,5	12,6	4,6	0	0	1,1	2,724	6,37
2363/192	ПриС	6,39	2,818	37,7	10,1	9,2	33,6	9,0	0	0	0,4	2,837	6,29
2363/491	ПриС	6,15	2,708	29,1	3,6	34,3	18,6	10,7	0	0	3,7	2,833	6,48
2307/488	ПриС	6,33	2,703	38,4	0	49,3	7,1	4,8	0	0	0,4	2,688	6,43
44Д	ЗПБ	5,72	2,850	24,0	5,5	16,5	35,5	15,0	0	0	3,5	2,820	6,45

Номер образца	Район	V_p , км/с	ρ , г/см ³	Пл	КПШ	Кв	Би	Пир	Амф	Гр	Акц	$\rho_{расч}$	$V_p_{расч}$
Гнейсы амфибол-биотитовые													
7/19	ЗКМБ	6,16	2,740	31,6	0	38,6	24,7	0	2,4	0	2,7	2,799	6,41
9/26	ЗКМБ	5,70	2,750	36,5	0	30,9	22,6	0	9,4	0	0,6	2,777	6,45
7/20	ЗКМБ	6,15	2,740	30,1	0	40,7	17,1	0	11,1	0	1	2,760	6,49
27/75	ПодБ	5,63	2,936	9,9	10	12,7	41,3	0	24,1	0	2	2,966	6,42
Гнейсы биотит- амфиболовые													
334 Е	ЗПБ	5,89	2,912	20,2	0	8	15,7	0	53,4	0	2,5	3,016	6,81
48/75	ПодБ	6,28	3,017	20	0	8	8,3	0	60	0	3,7	3,162	6,91
43/206	РТМБ	6,53	3,077	12,4	0	10,2	0	0	74,1	0	3,3	3,100	7,05
8/22	РТМБ	6,85	3,102	23,8	0	16,8	0	0	53,6	0	5,8	3,060	6,74
34Д	ЗПБ	5,28	2,924	16,2	0	17,0	61,9	0	1,5	0	3,4	2,970	6,25
Гнейсы пироксен-амфиболовые, амфибол-пироксеновые													
21/63	ГШЗ	6,12	3,077	36,7	0	3,2	0	12,3	40,4	0	7,4	3,070	6,99
16/75	ПодБ	6,62	3,111	42,7	0	2,3	2,4	17,5	28,9	0	6,2	3,027	6,96
13/75	ПодБ	6,70	3,069	42,5	0	1,8	2,3	26,6	22,2	0	4,6	3,081	7,01
49/228	ГШЗ	6,73	3,060	26,8	0	5,9	6,9	31,5	27,6	0	1,3	3,030	7,07
159/128	ПодБ	6,63	3,075	35,9	0	0	1,4	31	28,1	0	3,6	3,065	7,11
18/49	ГВБ	6,65	3,070	23,7	0	24,3	2,8	31,4	14,2	0	3,6	2,990	7,02
23/69	ГШЗ	7,00	3,080	33,2	0	11,2	4,9	31,3	17,8	0	1,6	2,990	7,01
16/44	ГВБ	6,50	2,950	32,6	0	16,2	0	36,8	4,1	0	10,3	3,130	7,09
53-2	ГШЗ	6,58	3,201	8,4	0	0	0	86,3	0	0	5,3	3,353	7,67
8/206	РТМБ	6,90	3,100	12,6	0	10,2	0	0	73,9	0	3,3	3,071	7,05
124/127	ПодБ	6,91	3,074	32,8	0	2,4	0	23,1	40,1	0	1,6	2,994	7,08
17/46	ГВБ	6,90	3,120	12,5	0	13,5	3,4	23,8	40,9	0	5,9	3,054	7,13

ПриС — Приингульская синклираль, ЗКМБ — западная часть Кировоградского мегаблока, ГШЗ — Голованевская шовная зона, ЗПБ — Западно-Приазовский блок, ПодБ — Подольский блок, РТМБ — Росинско-Тикичский мегаблок, ГВБ — Гайворонский блок, Пл — плагиоклаз, КПШ — калиевый полевой шпат, Кв — кварц, Би — биотит, Пир — пироксен, Амф — амфибол, Гр — гранат, Акц — акцессорные минералы.

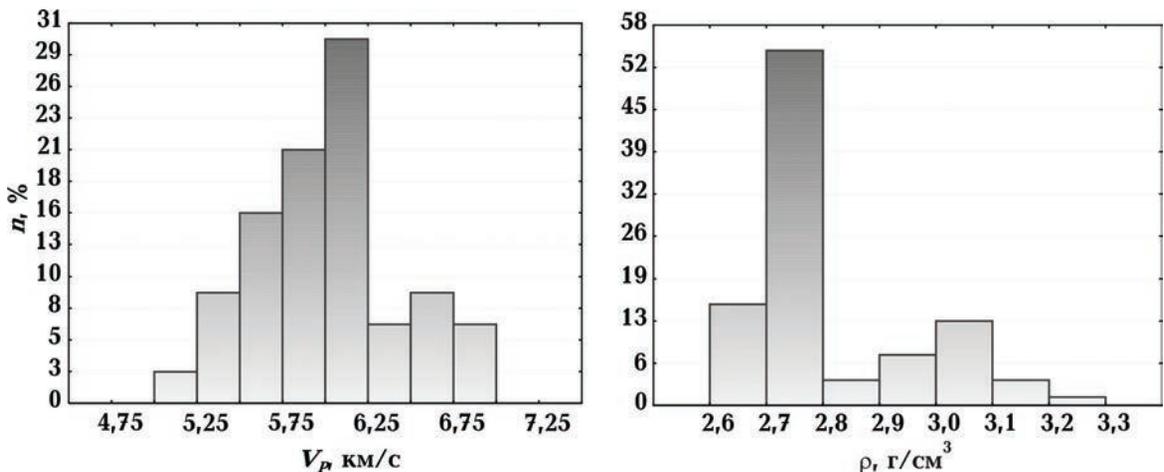


Рис. 3. Гистограммы распределения V_p и ρ для всех групп гнейсов в условиях атмосферного давления и комнатной температуры (77 образцов; $V_{расч}=6,01$ км/с; $\rho_{расч}=2,807$ г/см³).

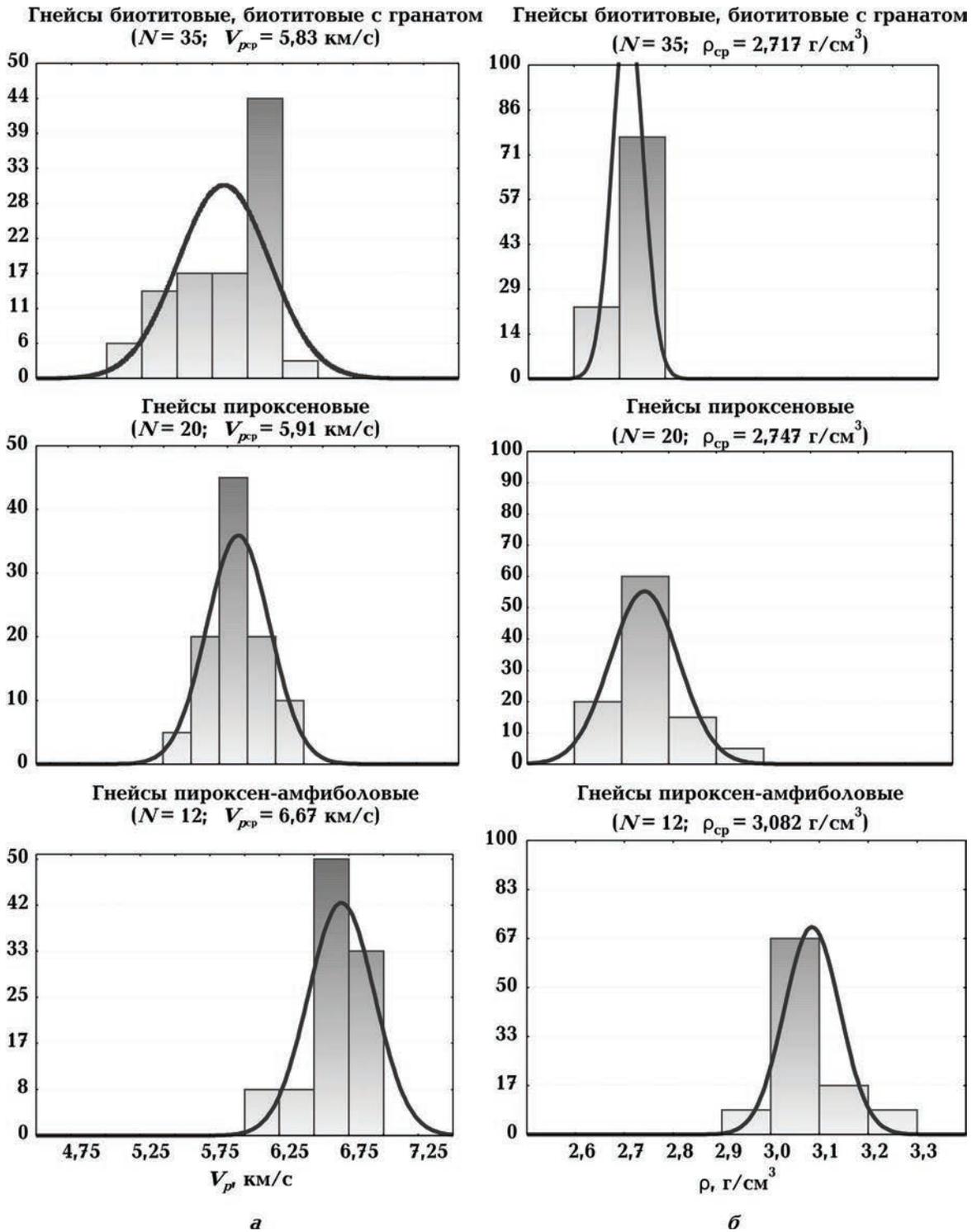


Рис. 4. Гистограммы распределения V_p (а) и ρ (б) для различных групп гнейсов в условиях атмосферного давления и комнатной температуры.

Как видно из рис. 3, на гистограммах распределения скорости распространения продольных волн и плотности изучаемой коллекции наблюдаются два максимума,

что свидетельствует о наличии двух подгрупп в данной выборке. Первая с максимумами $V_p = 5,75 \div 6,25$ км/с и $\rho = 2,7 \div 2,8$ г/см³ соответствует более многочисленной груп-

пе гнейсов преимущественно биотитового состава (гнейсы биотитовые, пироксен-биотитовые и амфибол-биотитовые). Вторая ($V_p=6,5\div 6,75$ км/с и $\rho=3,00\div 3,10$ г/см³) менее выраженная — гнейсы амфиболовые, пироксен-амфиболовые, имеющая более высокие значения этих параметров.

Гистограммы V_p и ρ для отдельных групп гнейсов свидетельствуют о нормальном распределении их значений и удовлетворительной выборке каждой группы с незначительной асимметрией вариационных кривых в ту или иную сторону для последующего статистического анализа данных (см. рис. 4). Разнообразие минерального состава, структурно-текстурные особенности пород, пористость являются главными факторами, определяющими их плотность и ее колебания в пределах отдельных разновидностей. В целом более низкие значения V_p и ρ характерны для выделенных гнейсов биотитового состава. Значения плотности у них колеблются в пределах 2,622—2,780 г/см³. Скорость распространения упругих продольных волн изменяется от 5,20 до 6,40 км/с, в среднем составляя 5,25—6,08 км/с. Большинство гнейсов имеет высокую степень упругой анизотропии. Более высокие значения V_p для некоторых разновидностей биотитовых гнейсов, на фоне их низкой плотности, можно связать с их текстурными особенностями. Породы слоистой или сланцеватой структуры, в связи с наличием, например, слоистого

биотита или амфибола, имеют скорость вдоль слоистости значительно выше, чем вкрест ее (в слоистых минералах: биотит, мусковит — $V_{[001]} < V_{[010]} = V_{[100]}$), при этом плотность, как известно, не имеет анизотропии.

Для гнейсов, в составе которых главными темноцветными минералами являются высокоскоростные и высокоплотные амфибол и пироксен, характерны и более высокие упругоплотностные параметры. В нашем случае у биотит-амфиболовых и амфиболовых гнейсов $\rho=2,740\div 3,102$ г/см³, $V_p=5,30\div 6,85$ км/с, у гнейсов пироксен-амфиболового и амфибол-пироксенового состава $\rho=2,950\div 3,201$ г/см³, достигая 3,21 г/см³ для пироксенового кристаллосланца $V_p=6,12\div 7,00$ км/с. Это хорошо видно на рис. 4, где наблюдается смещение в сторону увеличения средних значений плотностей и скоростей гнейсов от биотитового состава к амфиболовому и пироксеновому (табл. 2).

Неотъемлемой частью дальнейшего комплексного изучения различных пород УЩ, согласно нашим методикам [Корчин, 2007, 2011, 2013а,б; Корчин и др., 2013], является исследование образцов в условиях всестороннего гидростатического давления при комнатной температуре. Этот этап исследований необходим для детального объяснения процессов, происходящих с породой при различной термобарической нагрузке, и, в частности, расчета плотности мине-

Т а б л и ц а 2. Средние значения скоростей упругих продольных волн, плотностей, их расчетных значений и минерального состава для выделенных групп гнейсов

Гнейсы	V_p , км/с	ρ , г/см ³	Минеральный состав (об. %)								$\rho_{расч}$	$V_{pрасч}$
			Пл	КПШ	Кв	Би	Пир	Амф	Гр	Акц		
Биотитовые	5,74	2,719	39,1	3,7	32,7	21,8	0	0	0	2,9	2,762	5,75
Биотитовые с гранатом	5,63	2,787	33,6	2,0	33,4	22,6	0	0	6,5	2,9	2,782	5,63
Пироксеновые	5,85	2,752	36,9	5,7	30,5	16,0	8,3	0	0	2,6	2,806	5,88
Биотит-амфиболовые	5,78	2,818	24,9	2,0	28,0	33,5	0	9,7	0	1,9	2,854	6,09
Амфибол-биотитовые, амфиболовые	6,39	3,027	19,1	0	10,8	6,0	0	60,3	0	3,8	3,085	6,45
Пироксен-амфиболовые и амфибол-пироксеновые	6,69	3,082	28,4	0	7,6	2,0	29,3	28,2	0	4,6	3,082	6,69

рального вещества на различных глубинах. В связи с большой сложностью измерения изменения объема образца породы непосредственно в камере высокого давления обычно используются ультразвуковые измерения. А именно, изменение плотности пород в условиях гидростатического сжатия рассчитывалось по данным изменения упругих модулей пород — сжимаемости (β) или модуля всестороннего сжатия (K):

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

где V_P и V_S измерялись в ходе опытов [Справочник..., 1969].

На рис. 5 для примера представлены результаты расчета плотностей некоторых гнейсов в условиях всестороннего давления по данным упругих модулей породы, измеренных ультразвуковым методом. Как видно, зависимости имеют два разноградиентных участка — при давлениях, соответствующих глубинам 0—5 и 5—25 км.

Изменение плотности пород на первом участке в два раза выше, чем на втором, где, как правило, она увеличивается по линейному закону. При высоком гидростатическом давлении в 1 кбар наиболее вероятные значения упругоплотностных параметров для гнейсов биотитового и пироксенового состава увеличиваются и

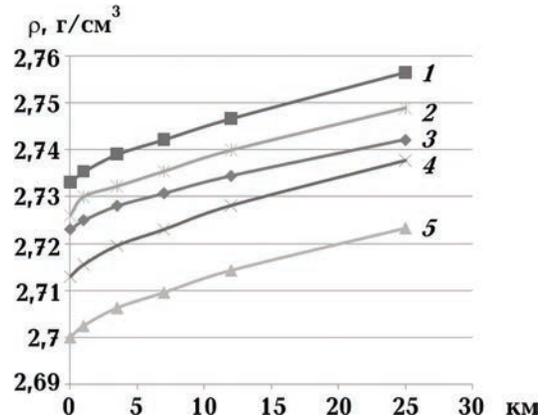


Рис. 5. Влияние гидростатического давления на изменение плотности биотитовых и пироксенобиотитовых гнейсов: 1 — обр. 2364\475, 2 — 2374\142, 3 — 2374\356, 4 — 2367\494, 5 — 2363\269.

составляют $V_{Pcp}=5,77$ км/с, $\rho_{cp}=2,725$ г/см³. При давлении в 5 кбар значения продолжают возрастать и составляют $V_{Pcp}=5,90$ км/с, $\rho_{cp}=2,747$ г/см³. Максимумы значений скоростей распространения упругих волн по данным, представленным на гистограммах, смещаются на 0,1—0,2 км/с от атмосферного давления до 1 кбар, а затем на $\approx 0,15$ км/с до 5 кбар (рис. 6).

Максимумы значений плотностей смещаются в среднем на $\approx 0,01$ г/см³ от атмосферного давления до 1 кбар, а затем на $\approx 0,025$ г/см³ до 5 кбар. Увеличение значений скоростей и плотностей с возрастани-

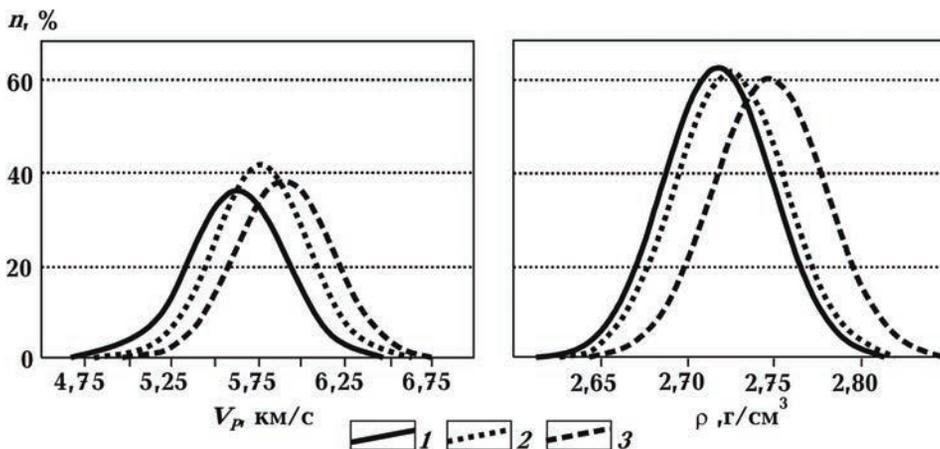


Рис. 6. Вариационные кривые распределения средних значений V_P (а), ρ (б) для гнейсов биотитового и пироксенового состава (29 образцов): 1 — в атмосферных условиях ($V_{P0cp}=5,64$ км/с; $\rho_{0cp}=2,718$ г/см³), 2 — при воздействии на образцы высокого гидростатического давления 1 кбар ($V_{P1cp}=5,77$ км/с; $\rho_{1cp}=2,724$ г/см³), 3 — при воздействии на образцы высокого гидростатического давления 5 кбар ($V_{P5cp}=5,89$ км/с; $\rho_{5cp}=2,747$ г/см³).

ем давления от атмосферного до 1 и далее до 5 кбар приводит к смещению их средних значений в сторону увеличения. Породы в условиях высокого давления также характеризуются, как правило, вариационными кривыми нормального распределения скоростей и плотности, что свидетельствует об оптимальной представительности совокупности образцов и отсутствии в них неконтролируемых нарушений и изменений физического состояния пород в результате интенсивного выветривания, трещиноватости и т. п.

Существующая 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 гнейсов.

Результаты экспериментальных исследований при высоких значениях P и T . При изучении изменения упругоплотностных параметров горных пород в различных термобарических условиях опытов использовалась методика, которая позволила на одном образце реализовать две PT -программы методом дискретной нагрузки (рис. 7).

Суть метода заключается в том, что при медленном постоянном нагреве образца при достижении определенной T в каме-

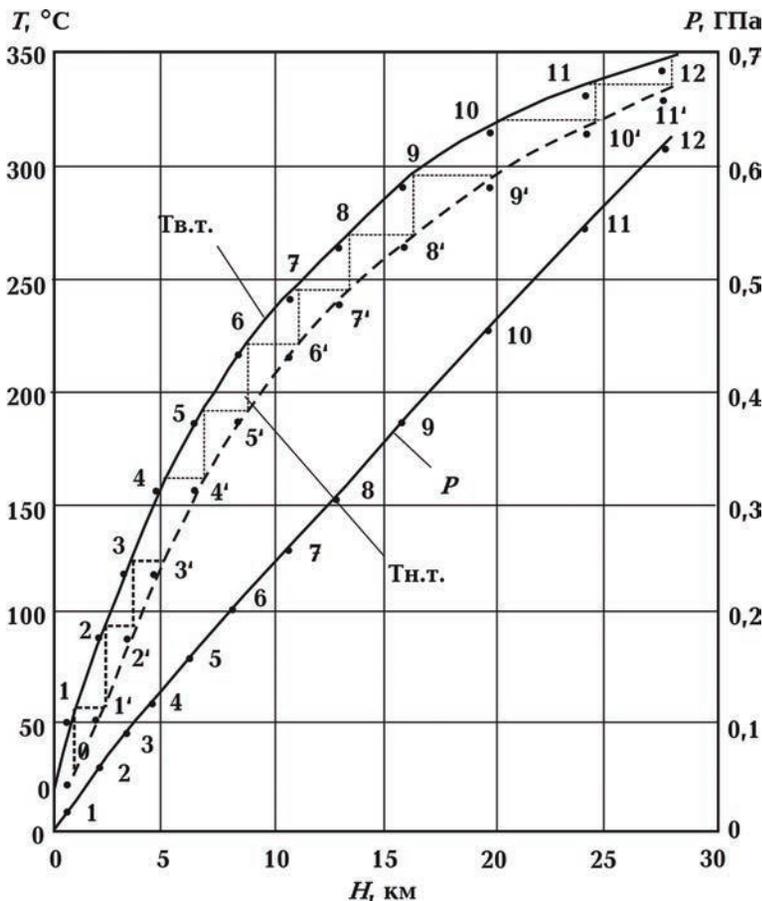


Рис. 7. Программы изменения в аппарате экспериментальной установки одновременно давлений и температур (Тв.т., Тн.т. — высоко- и низкотемпературный режим опытов). Точками 1—12 отмечены измерения скоростных и плотностных параметров (значения P и T).

ре P увеличивалось в соответствии с программой. Например, в точке 5 на глубине 7 км ($P_5=1,8$ ГПа) проводится замер параметров при температуре 160 °С (точка 4'), затем при 185 °С (точка 5), далее при этой

же температуре давление увеличивается до 2,1 ГПа ($H=9$ км, точка 6) и проводится измерение. Таким образом, в опытах реализуется две PT -программы. Различие температур, как правило, при давлении,

соответствующем одной глубине, составляет 50 ± 15 °С, что дает возможность при необходимости вносить поправки изменения плотности с глубиной для районов со слабоизученными температурными режимами или, наоборот, вносить поправки в *PT*-условия на конкретной глубине изучае-

мого района, используя данные геофизических полевых наблюдений.

Результаты экспериментальных исследований изменения плотности метаморфических пород УЩ (гнейсы и кристаллосланцы) с глубиной представлены в табл. 3.

Как следует из данных, приведенных в

Т а б л и ц а 3. Плотности метаморфических пород УЩ на различных глубинах

Номер образца	Плотность при <i>PT=H</i> , км									
	0	1	3,5	6	9	13	16	20	25	30
Гнейсы биотитовые										
1977/242	2,770	2,776	2,776	2,773	2,776	2,790	2,801	2,811	2,820	2,830
1977/95	2,720	2,726	2,730	2,727	2,728	2,737	2,745	2,755	2,766	2,778
2564/510	2,735	2,74	2,745	2,741	2,738	2,741	2,745	2,752	2,762	2,772
3662/100	2,754	2,759	2,759	2,754	2,756	2,760	2,765	2,771	2,777	2,783
1946/489	2,705	2,713	2,714	2,709	2,710	2,717	2,722	2,729	2,736	2,741
2376/494	2,729	2,738	2,74	2,734	2,737	2,744	2,747	2,752	2,756	2,761
1804	2,710	2,718	2,722	2,715	2,717	2,734	2,742	2,750	2,757	2,764
3161/70	2,717	2,723	2,723	2,718	2,720	2,726	2,730	2,736	2,743	2,750
2250/178	2,709	2,712	2,718	2,716	2,713	2,712	2,715	2,722	2,734	2,743
2032/166	2,72	2,733	2,737	2,730	2,736	2,743	2,751	2,760	2,771	2,782
6/17	2,69	2,702	2,724	2,723	2,709	2,716	2,73	2,749	2,772	2,79
3156/120	2,733	2,742	2,741	2,735	2,736	2,742	2,748	2,756	2,763	2,771
11/30	2,65	2,653	2,659	2,654	2,657	2,672	2,685	2,699	2,713	2,723
2980	2,720	2,726	2,726	2,722	2,730	2,743	2,751	2,759	2,767	2,775
2374/356	2,711	2,713	2,717	2,714	2,71	2,712	2,717	2,724	2,73	2,735
3100	2,780	2,789	2,792	2,789	2,790	2,803	2,809	2,818	2,828	2,837
3479	2,780	2,785	2,785	2,777	2,787	2,801	2,808	2,816	2,825	2,834
Гнейсы пироксен-биотитовые										
2321/333	2,736	2,740	2,749	2,748	2,745	2,748	2,757	2,769	2,785	2,800
2027/478	2,660	2,663	2,667	2,661	2,664	2,669	2,675	2,680	2,687	2,694
19/56	2,758	2,774	2,801	2,795	2,801	2,821	2,83	2,842	2,861	2,879
2242/325	2,700	2,704	2,704	2,693	2,695	2,710	2,718	2,727	2,739	2,752
3320	2,760	2,768	2,767	2,763	2,768	2,778	2,787	2,793	2,800	2,808
344E	2,842	2,845	2,853	2,854	2,851	2,853	2,858	2,864	2,871	2,878
2363/269	2,700	2,709	2,715	2,715	2,712	2,713	2,714	2,716	2,718	2,720
2301	2,84	2,853	2,853	2,848	2,86	2,877	2,887	2,901	2,913	2,928
2364/475	2,733	2,737	2,739	2,739	2,735	2,736	2,738	2,741	2,744	2,747
58/75	2,969	2,975	2,989	2,989	2,986	2,987	2,991	3,000	3,009	3,020
Гнейсы амфибол-биотитовые										
7/19	2,74	2,752	2,774	2,772	2,765	2,768	2,781	2,798	2,814	2,831

Номер образца	Плотность при $PT=H$, км									
	0	1	3,5	6	9	13	16	20	25	30
9/26	2,75	2,758	2,768	2,762	2,763	2,78	2,791	2,804	2,823	2,841
7/20	2,74	2,752	2,773	2,773	2,768	2,775	2,786	2,801	2,818	2,83
27/75	2,936	2,947	2,952	2,948	2,945	2,947	2,95	2,957	2,966	2,974
Гнейсы биотит-амфиболовые, амфиболовые										
334E	2,912	2,918	2,93	2,934	2,933	2,93	2,935	2,945	2,957	2,965
48/75	3,017	3,025	3,035	3,038	3,037	3,032	3,034	3,046	3,061	3,077
43/206	3,077	3,083	3,093	3,096	3,09	3,094	3,105	3,117	3,13	3,144
8/22	3,102	3,114	3,143	3,143	3,132	3,131	3,135	3,145	3,161	3,177
Гнейсы пироксен-амфиболовые, амфибол-пироксеновые										
21/63	3,077	3,083	3,093	3,096	3,09	3,094	3,105	3,117	3,13	3,144
16/75	3,111	3,117	3,135	3,129	3,129	3,144	3,158	3,179	3,199	3,211
13/75	3,069	3,073	3,08	3,082	3,082	3,078	3,081	3,091	3,109	3,122
49/228	3,06	3,065	3,072	3,069	3,065	3,082	3,098	3,114	3,131	3,143
159/128	3,075	3,083	3,096	3,083	3,085	3,1	3,115	3,127	3,142	3,157
18/49	3,07	3,083	3,096	3,079	3,076	3,086	3,101	3,121	3,146	3,171
23/69	3,08	3,094	3,111	3,104	3,098	3,103	3,11	3,128	3,152	3,175
16/44	2,95	2,954	2,962	2,959	2,96	2,967	2,974	2,988	3,002	3,017
53-2	3,201	3,213	3,210	3,203	3,204	3,218	3,228	3,240	3,256	3,273

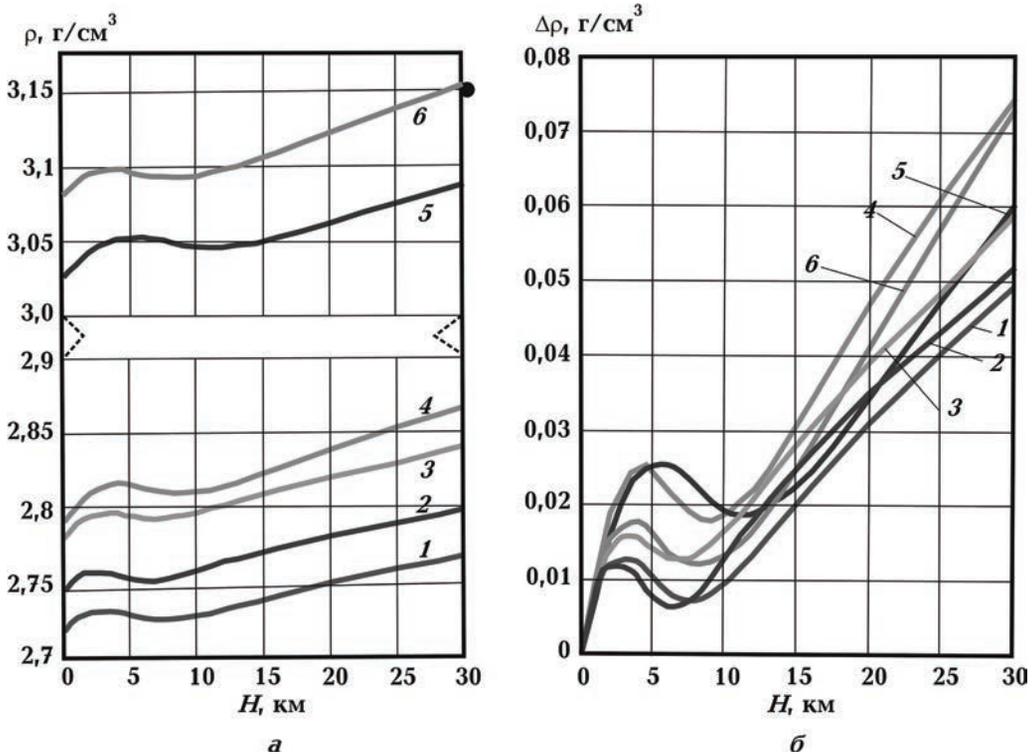


Рис. 8. Графики изменения средних значений плотности пород (а) и их абсолютные изменения (б) с глубиной. Группы гнейсов: 1 — биотитовые, 2 — биотитовые с гранатом, 3 — пироксен-биотитовые, 4 — амфибол-биотитовые, 5 — биотит-амфиболовые, амфиболовые, 6 — пироксен-амфиболовые, амфибол-пироксеновые.

таблице и на графиках (рис. 8), для изученных пород характерны сложные зависимости $\rho=f(PT)=f(H)$, где каждая кривая является средним значением $\rho=f(H)$ для нескольких образцов соответствующей группы пород (см. табл. 3). При одновременном воздействии на минеральное вещество глубинных давлений и температур, изменяющихся по программам (температурный режим опытов соответствует распределению температуры с глубиной центральной части УЩ, отмечен на рис. 7, как Тн.т.) плотностные характеристики горных пород с глубиной изменяются по нелинейным законам [Корчин, 2013а,б; Корчин и др., 2013; Лебедев и др., 1986; Korchin, 2017]. На графиках $\rho=f(H)$ проявляются максимумы и минимумы значений, образуются зоны инверсии плотности, подобные ранее обнаруженным зонам низких скоростей упругих волн в горных породах при давлениях и температурах различных глубин [Корчин, 2007, 2011, 2013а,б; Корчин и др., 2013]. Как показали детальные исследования образцов пород в ходе эксперимента и после, обнаруженная инверсия плотности связана в основном со структурными изменениями пород и менее зависит от вещественных.

В отличие от зависимостей изменения плотности пород при высоком гидростатическом давлении и комнатных температурах на графиках можно выделить три участка. На первом участке, соответству-

ет начальному интервалу глубин (0—5 км), плотности резко возрастают. Здесь с глубиной происходит интенсивное уплотнение пород за счет литостатического давления, закрывается большинство открытых микроскопических трещин, а иногда и пор в породе и зернах породообразующих минералов. Этот участок на кривых $\rho=f(H)=f(PT)$ сопоставим с начальным высокоградиентным участком $\partial V_{p,s}/\partial P$ для скоростных зависимостей $V_{p,s}=f(PT)=f(H)$.

Максимальное увеличение плотности гнейсов биотитового состава происходит на глубинах 3,0—4,5 км и составляет 0,012—0,025 г/см³, гнейсов амфиболового состава — 0,025—0,027 г/см³ на этих же глубинах, гнейсов амфибол-пироксенового состава — 0,018—0,020 г/см³ на 4,5 км.

Достигнув максимальных значений, ρ начинает снижаться примерно до глубины 6—11 км, а затем вновь возрастает, достигая ранее полученного максимума на глубинах 11—16 км. Таким образом, в интервале глубин 3—16 км на кривых изменения плотности $\rho=f(H)=f(PT)$ выделяются зоны «низкой плотности» или зоны инверсии ρ . Эти аномальные участки характеризуются шириной зоны понижения плотности по глубине (ΔH) и максимальной величиной ее уменьшения ($\Delta\rho$). Анализ имеющихся материалов позволил отметить некоторые особенности проявления зон инверсии плотности у выделенных разновидностей гнейсов. Определен интервал глубин рас-

Таблица 4. Средние значения плотностей и характеристики зон разуплотнения гнейсов

Гнейсы	$\rho_{нач}$	ρ_{maxI} до 3 км	$\Delta\rho_{maxI}$	ρ_{min}	$\Delta\rho^*$	$H_{min'}$ км	ΔH , км	ρ , $H=30$ км
Биотитовые	2,718	2,731	0,013	2,725	0,006	7,5	3,5—11,0	2,757
Гранат-биотитовые	2,745	2,757	0,012	2,751	0,006	6,0	3,0—10,0	2,781
Пироксен-биотитовые	2,780	2,796	0,016	2,793	0,003	7,5	3,5—10,0	2,825
Амфибол-биотитовые	2,792	2,817	0,025	2,809	0,008	9,0	4,5—13,5	2,857
Амфиболовые	3,027	3,052	0,025	3,046	0,006	11,0	5,0—16,0	3,087
Пироксен-амфиболовые, амфибол-пироксеновые	3,080	3,098	0,018	3,093	0,005	8,0	4,0—12,5	3,142

* снижение плотности в зоне разуплотнения; ΔH — ширина зоны разуплотнения; ρ , $\Delta\rho$ — в г/см³.

пространения таких зон в земной коре и H_{\min} максимального падения плотности в них (табл. 4).

Так, у гнейсов биотитового и гранат-биотитового состава зоны инверсии проявляются на глубинах 2—14 км, а минимальные значения плотности — на глубинах 6—8 км. У некоторых разностей такие зоны более широкие, расположены на глубинах 4—18 км, а минимумы плотности — на глубине 9—11 км. Большая часть гнейсов пироксен-биотитового и амфибол-биотитового состава, наоборот, характеризуется широкими зонами на глубинах 4—18 км с минимумом плотности в интервале 9—1 км и в меньшем количестве имеет зоны инверсии на глубинах 2—12 км с минимумами 6—8 км. Падение плотности в зонах инверсии составляет 0,004—0,01 г/см³ (редко 0,011—0,02 г/см³). У биотит-амфиболовых гнейсов и амфиболитов зоны более широкие, расположены

на глубинах 6—20 км с минимумами на глубинах 10—13 км. Перепад плотности в них составляет 0,005—0,006 г/см³. Зоны инверсии пироксен-амфиболовых и амфибол-пироксеновых гнейсов располагаются в интервале глубин 3—16, иногда 6—17 км с минимумами на глубинах соответственно 7—9 и 10—13 км. Падение плотности в них от 0,004 до 0,02 г/см³. Основные параметры изменения плотности исследуемых пород представлены в табл. 4.

Прежде чем перейти к обсуждению результатов экспериментов, отметим некоторые особенности изменения плотности гнейсов в зависимости от температурных программ опытов. На рис. 9 представлены графики изменения плотности в одном и том же образце, измеренные в низко- и высокотемпературных режимах опытов. Как видно из рисунка, при заданных различных режимах графики однотипных пород близки по своему характеру и вместе с

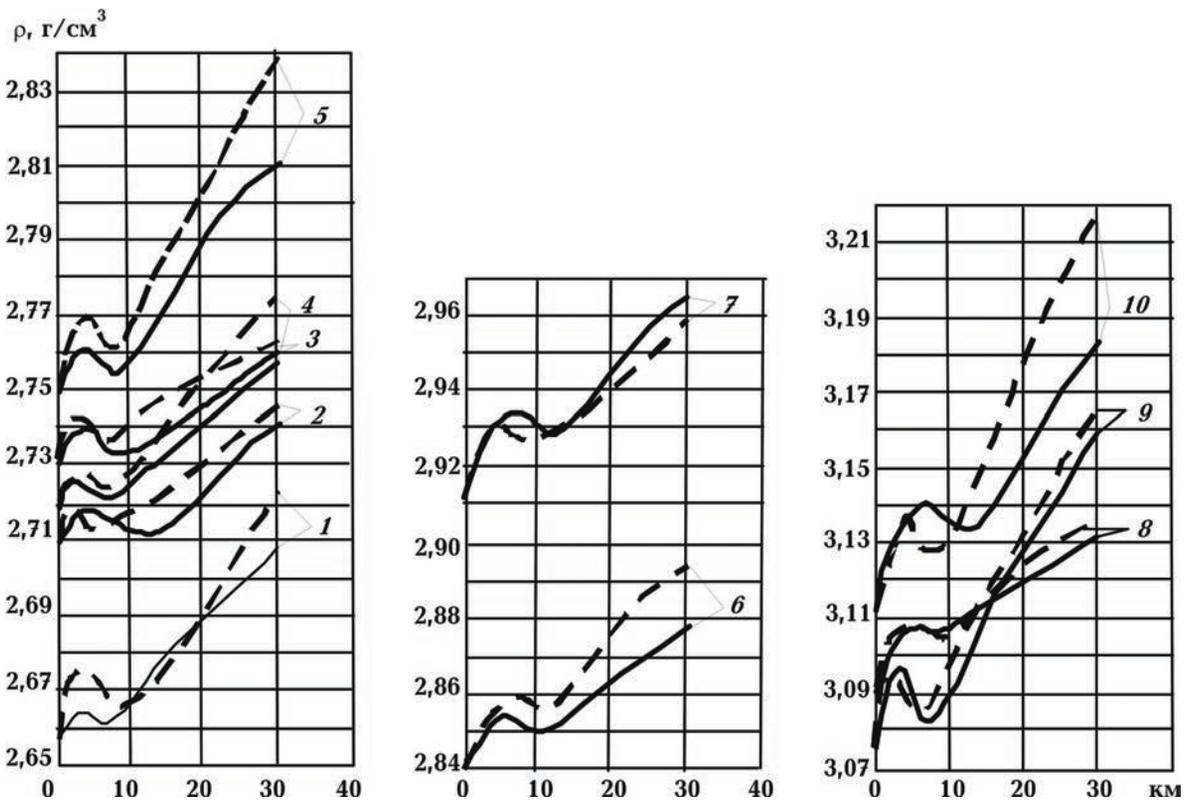


Рис. 9. Графики изменения плотности гнейсов, измеренные при различных температурных режимах опытов. Номера образцов (см. табл. 2): 1 — 11/30, 2 — 2250/178, 3 — 2376/494, 4 — 1977/95, 5 — 9/26, 6 — 344, 7 — 334, 8 — 49/228, 9 — 159/128, 10 — 16/75. Штриховые линии — низкотемпературный режим.

тем несколько различаются между собой. Такое различие особенно четко проявляется у гнейсов биотитового состава, содержащих значительное количество кварца. В этих породах при высокотемпературных режимах опытов более резко увеличивается плотность в начальном интервале P и T и наблюдается более интенсивное ее уменьшение в зоне разуплотнения при дальнейшем увеличении термобарических воздействий с глубиной. Менее заметно такое различие у основных разностей — гнейсов амфиболового и пироксенового состава (рис. 9, кривые 7—10). Характерная особенность пород, изученных в низкотемпературном режиме при высоком давлении (другими словами, на больших глубинах), — более высокие плотности. В среднем на глубине 20—30 км перегрев пород на 30—60 °С от среднего уменьшает их плотность на 1,5—2 %. К большим изменениям склонны породы более крупнозернистые и анизотропные.

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 в меньшей степени зависит от вещественных преобразований минерального вещества [Корчин, 2007, 2011, 2013а,б, 2015, Корчин и др., 2013]. Ранее совместный анализ параметров сейсмических волноводов (зон низких скоростей — ЗНС) или инверсии скорости, обнаруженных PT -петрофизическими исследованиями, позволил сделать предположение о термодинамической природе ЗНС в земной коре, которое подтверждается данными изучения плотности пород под влиянием программного воздействия P и T . Как и ожидалось, при PT , соответствующих глубинам ЗНС, плотности также уменьшаются, иногда $\partial\rho/\partial H$ приобретают отрицательные значения, подтверждая тем самым интенсивное разуплотнение пород в PT -условиях этих горизонтов, образуя области пониженной плотности. Это явление обусловлено естественным противодействием давлений и температур, су-

ществующих на определенных глубинах.

В земной коре породы испытывают сжатие, разогрев, разного рода структурные, а иногда и вещественные превращения, определяемые PT -условиями. Нагрев горных пород сопровождается увеличением их объема. Коэффициент теплового расширения горных пород: $2 \cdot 10^{-6}—4 \cdot 10^{-4} \text{K}^{-1}$ (среднее $3 \cdot 10^{-5} \text{K}^{-1}$). При их разогреве даже на 200—300 °С наблюдается увеличение объема минерального вещества на 1,5 % 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 6 км в земной коре будут преобладать термодинамические силы объемного разрушения структурной целостности пород, что приводит к разуплотнению минерального вещества. В глубинных условиях изменения плотности будут порождать развитие (затем релаксацию) очень высоких микронапряжений.

Обобщая результаты комплексного структурного исследования различных пород при высоких давлениях и температурах [Корчин, 2013а,б, 2015] оптически, рентгеноструктурными, электронно-микроскопическими методами и анализируя материалы изучения упругоплотностных характеристик пород, был сделан ряд предположений о природе вертикальной зональности упругих особенностей и плотности минерального вещества отдельных горизонтов земной коры. Прежде всего, в зоне инверсии плотности ($H=3 \div 15$ км, $P=1,5 \div 3$ кбар, $T=150 \div 250$ °С) увеличивается сжимаемость на фоне уменьшения упругих констант (E , G , K) и коэффициента объемного расширения пород в результате изменения межзерновых границ за счет, например, их милонитизации, увеличивается количество магистральных микротрещин. Совокупность обнаруженных микроструктурных преобразований породы свидетельствует об упругом низкотемператур-

ном упрочнении и хрупком разрушении минерального вещества. Уменьшаются блоки мозаики отдельных зерен минералов. Плотность дислокаций увеличивается в блоках и уменьшается в межзерновых границах. Увеличиваются относительная деформация зерен, их двойникование, дефекты упаковки минералов, число центров генерации дислокаций [Корчин, 2013а,б, 2015; Корчин и др., 2013]. В данном *PT*-интервалеразуплотнению минеральной среды способствуют анизотропные коэффициенты линейного расширения отдельных минералов, эффект разрушения газожидких включений, миграция свободной воды и газа по микротрещинам породы.

В зоне низких значений плотности и скорости ($H=4\div 15$ км), области разуплотнения пород, разрыхления межзерновых границ наблюдается увеличение пористости. Используя данные по уменьшению скорости распространения упругих волн и изменению плотностей в этой зоне, выполнен расчет, который показал, что пористость горных пород с глубиной уменьшается на 50—70 % до глубины 3—5 км (горизонтов максимальных величин упругих характеристик пород над ЗНС) [Корчин, 2013а,б,

2014, 2015]. В зоне инверсии плотности (4—15 км) — зоне разуплотнения пород, разрыхления межзерновых границ отмечается увеличение пористости вплоть до исходного состояния пород. Плотность пород уменьшается на 10—20 % от значений на глубинах 3—5 км. Далее с глубиной наблюдается вторичное снижение пористости горных пород, повышается их плотность (рис. 10).

В связи со структурным разуплотнением пород в зоне пониженной плотности возможны более активные процессы массопереноса, проявления газожидких флюидов. Исследования показали, что термодинамические условия глубин зон разуплотнения в коре ($H=4\div 10$ км, $P=1\div 3$ кбар, $T=150\div 250$ °С) оказались наиболее приемлемыми для растрескивания газожидких включений. При температуре 120—160 °С в них развивается внутреннее давление порядка 1500—2000 бар, что дает возможность содержащимся во включении газам и флюиду переместиться в свободные области породы (открытые поры, трещины) [Рейдер, 1987]. Вслед за активным раскрытием включений, снижением локальных термодинамических

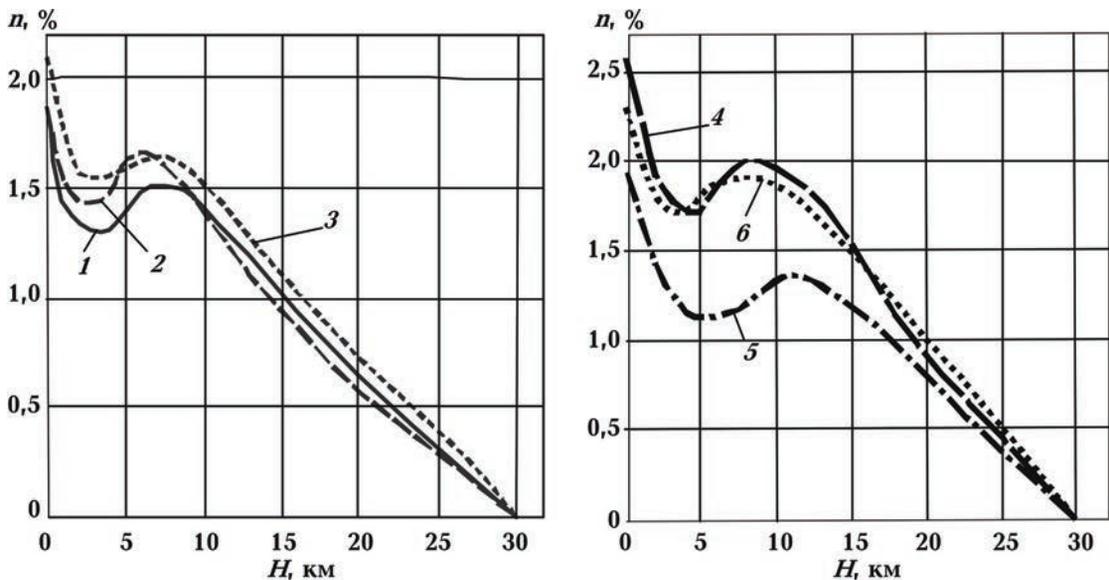


Рис. 10. Расчетные изменения пористости в гнейсах в термодинамических условиях соответствующих глубин. Гнейсы: 1 — биотитовые; 2 — гранат-биотитовые; 3 — пироксен-биотитовые; 4 — амфибол-биотитовые; 5 — амфиболовые; 6 — пироксен-амфиболовые, амфибол-пироксеновые.

напряжений с повышением температуры и умеренных давлений активизируется диффузионный процесс перемещения флюидных веществ и самих включений. Возможна диффузия поверхностная вдоль границы раздела флюид-минерал или через минерал-хозяин. Массоперенос и диффузионные процессы в полях статических напряжений в кристаллах, вероятно, могут приводить к значительному перемещению включений [Гегузин, 1971; Korchin, 2017; Рейдер, 1987]. Скорее всего, перекристаллизация минерала-хозяина следует за включениями, стремясь уменьшить существующие напряжения, однако оставляя вторичные мелкие включения. Одним из важных моментов в случае напряженного состояния минерала, с увеличением литостатического давления, является миграция мелких включений к большим, которые будут находиться уже в новых метастабильных условиях соответствующих глубин. Есть предположение, что сблизившиеся включения могут срастаться даже под влиянием напряжений, вызванных высоким гидростатическим давлением, если оно больше давления во включении [Гегузин, 1971; Рейдер, 1987; Korchin, 2015]. Таким образом, в результате процесса расщурования, массопереноса и диффузии с увеличением действующих на породу дав-

лений и температур выше определенного порога начинается локализация содержимого раскрытых включений. Исследуя оптическими методами (шлиф, аншлиф) отдельные минералы и межзерновые границы, в основном подтвержден описанный выше механизм преобразования породы в результате декрепитации при высоких давлениях и температурах. Так, в образцах пород, испытавших *PT*-воздействие, соответствующих зонам ЗНС и разуплотнения, наблюдается увеличение газовой-жидких включений (особенно по краям зерен), появляются локализации в виде стоков мелких новообразованных включений в местах ранее существовавших микротрещин [Korchin, 2006, 2017].

Зависимости «скорость — плотность» в гнейсах на различных глубинах. В результате анализа экспериментальных данных установлено, что изменение скорости и плотности пород с глубиной, когда проявляются зоны инверсий V_p и ρ , существенно изменяет зависимости $V_p=f(\rho)$ на глубинах 3—20 км. Они отличаются от принятых среднестатистических и полученных в условиях высоких гидростатических давлений $V_p=f(P)$ и $\rho=f(P)$ и комнатных температур (рис. 11, 12).

Эксперименты показали, что на глубинах от 5 до 15 км градиент увеличения ско-

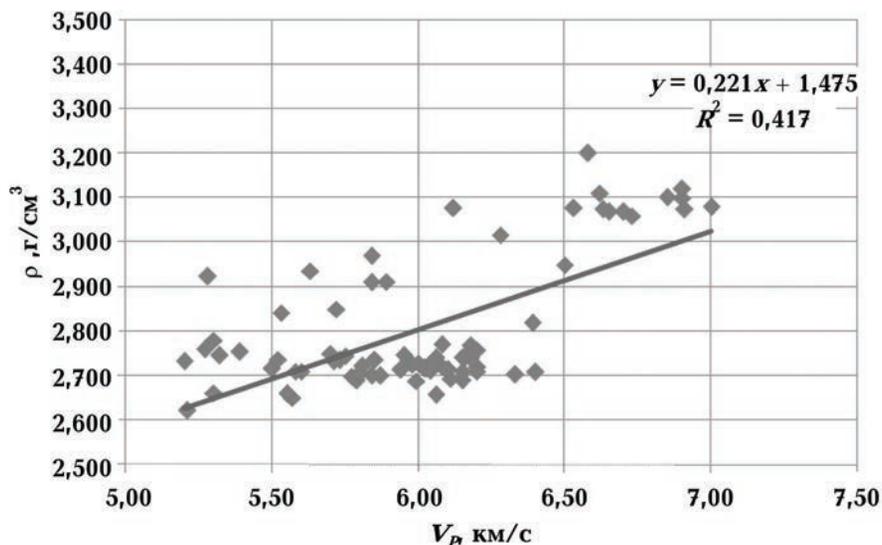


Рис. 11. График зависимости плотности от скорости для всех групп гнейсов.

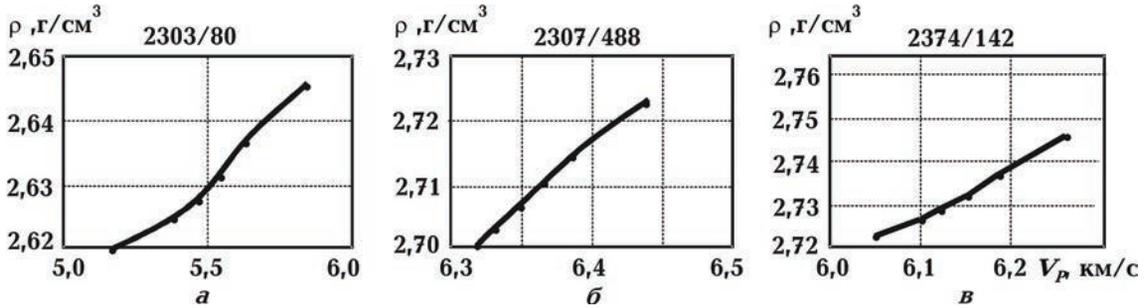


Рис. 12. График зависимости $V_p=f(\rho)$ для некоторых образцов гнейсов в условиях высокого гидростатического давления от атмосферного до 5 кбар: а — гнейс биотитовый (2303/80), б, в — гнейсы пироксен-биотитовые (2307/488, 2374/142).

рости и плотности пород спадает до нуля и становится отрицательным. Очевидно, изменение скорости и плотности пород на глубинах 3—15 км с проявлением зон инверсий V_p и ρ существенно изменяет зависимости $V_p=f(\rho)$ от принятых линейных среднестатистических (см. рис. 11, 12). При сопоставлении статистических зависимостей $V_p=f(\rho)$ с таковыми для отдельных образцов пород очевидно несоответствие данных. Для породы конкретного минерального состава зависимости $V_p=f(\rho)$ имеют сложную форму (образование петель) (рис. 13). Именно в зоне инверсии скорости и плотности традиционная зависимость скорость—плотность нарушается: большей плотности пород не соответствует большая скорость. На этом участке глубин необходим подбор плотностей корового минерального вещества непосредственно по отдельным образцам пород, имеющим соответствующие скорости и конкретные плотности. Это дало возможность уточнить связь $V_p=f(\rho)$ на различных глубинах.

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 [Корчин и др., 2011].

Заключение. Экспериментальными исследованиями изменения плотностных параметров метаморфических пород в различных термобарических условиях опытов установлены сложные зависимости $\rho=f(PT)=f(H)$ с появлением на них участков понижения плотности. Независимо от состава метаморфических образований четко выделяются три участка, характеризующие различное поведение исследуемого параметра: интенсивное повышение плотности в интервале глубин от 0 до 4—5 км; второй участок на глубинах 4—16 км, в центре которого наблюдается максимальное снижение плотности ($\Delta\rho=-$

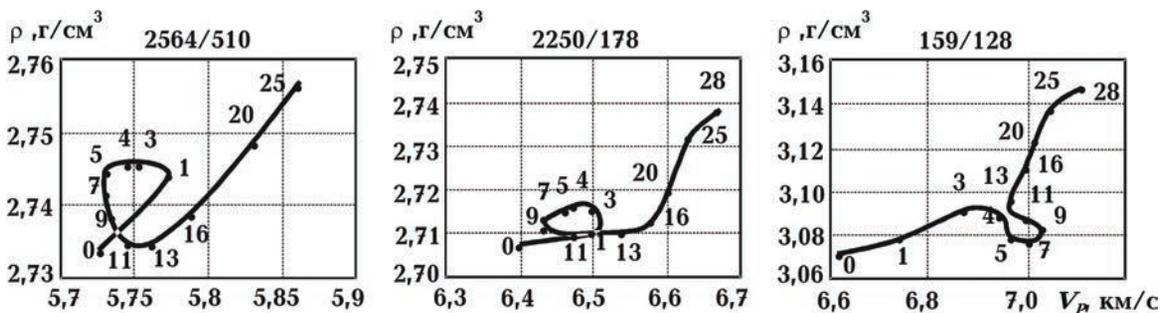


Рис. 13. График зависимости $V_p=f(\rho)$ для некоторых разновидностей гнейсов на различных глубинах (цифры на кривых соответствуют глубинам в км).

(0,006—0,02) г/см³); глубже — область интенсивного увеличения плотности.

Информация о существовании таких зон важна при интерпретации данных гравиметрических наблюдений, особенно на участках развития метаморфических пород, мощность которых может достигать до 10—15 км. Поэтому, в отличие от общепринятых построений, предусматривающих постепенное увеличение плотностных параметров с глубиной (однородный слой), в верхней части коры согласно экспериментальным данным будем иметь три горизонта, однородных по составу слагающих его пород, но различающихся своими физическими характеристиками, в частности плотностными параметрами.

Экспериментально установлено, что для различных разновидностей гнейсов УЩ (как и для изверженных пород) на зависимостях $\rho=f(P,T)=f(H)$ образуются зоны инверсии плотности шириной 5—15 км и скорости распространения упругих продольных волн шириной 3—20 км. Как и зоны низких сейсмических скоростей, горизонты пониженной плотности (по экспериментальным данным) чувствительны к температурным режимам земной коры. С повышением глубинного теплового по-

тока снижается плотность пород, активизируется способность пород к разуплотнению, повышается их проницаемость и гигроскопичность, т. е. активизируется процесс перемещения флюидов, и, как следствие, происходит метаморфическое преобразование пород. Другими словами, зоны пониженных значений V_p и ρ являются наиболее активными горизонтами современных геолого-геофизических преобразований минеральной среды земной коры. Их наличие может служить критерием поиска полезных ископаемых, поскольку они наиболее проницаемы для мигрирующих минеральных сред в земной коре. Зоны пониженных значений V_p и ρ 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 перспективному изучению с целью поисков полезного минерального сырья и уточнения глубинного строения Земли. Материалы этих исследований были использованы при построении соответствующих моделей распределения пород с глубиной для отдельных участков УЩ.

Список литературы

- Балашов Д. Б. Объемная сжимаемость твердых тел. В кн.: *Исследования в области высоких давлений*. Под ред. Е. В. Золотых. Москва: Изд-во Стандартов, 1987. С. 272—295.
- Берч Ф. Твердое тело в условиях высокого давления. Москва: Мир, 1965. 300 с.
- Беликов Б. П., Александров К. С., Рыжова Т. В. Упругие свойства породообразующих минералов и горных пород. Москва: Наука, 1970. 275 с.
- Буртный П. А., Корчин В. А., Карнаухова Е. Е. Моделирование вещественного состава глубинных горизонтов земной коры (новая концепция интерпретации геофизических данных). Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing, 2013. 188 с.
- Гегузин Я. Е., Кривоглаз М. А. Движение макроскопических включений в твердых телах. Москва: Металлургия, 1971, 344 с.
- Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых. Под ред. В. И. Старостенко, О. Б. Гинтова. Киев: Галактика, 2013. 500 с.
- Кобранова В. Н. Петрофизика. Москва: Недра, 1986, 392 с.
- Красовский С. С. Отражение динамики Земной коры континентального типа в гравитационном поле. Киев: Наук. думка, 1981. 262 с.
- Корчин В. А. Зоны низких скоростей термоба-

- рической природы в кристаллической коре. *Геофиз. журн.* 2015. Т. 37. № 5. С. 46—65. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111145>.
- Корчин В. А. Коровые зоны низких скоростей — перспективные горизонты локализаций 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 Всероссийской конференции 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. Термодинамика коровых зон низких сейсмических скоростей (новая научная гипотеза). LAP Lambert Academic Publishing, 2013б, 280 с.
- Корчин В. А. Термобарическое моделирование аномалий повышенной пористости в горных породах земной коры — горизонтов возможной миграции и локализации глубинных углеводородов. *Глубинная нефть*. 2014. Т. 2. № 9. С. 1434—1448.
- Корчин В. А. Упруго-плотностное термобарическое расслоение литосферы, коровые зоны низких сейсмических скоростей. *Материалы III тектонофизической конференции «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле»*. ИФЗ РАН, Москва, 8—12 октября 2012. Т. 2, С. 390—393.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Карнаухова Е. Е. Петрофизическое моделирование участков земной коры с зонами низких сейсмических скоростей. *Материалы X международной конференции «Геоинформатика: теоретические и прикладные аспекты»*. Киев, 2011, P056, CD-ROM.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Коболев В. П. Зоны разуплотнения земной коры центральной части Украинского щита (по материалам петрофизического и сейсмогравитационного моделирования). *Геофиз. журн.* 2016. Т. 38. № 3. С. 84—99. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107781>.
- Корчин В. А., Буртный П. А., Коболев В. П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013. 312 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., Корниец Д. В., Шаповал В. И., Корчин В. А. Упругие свойства горных пород при высоких давлениях. Киев: Наук. думка, 1972, 183 с.
- 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.
- Лебедев Т. С., Корчин В. А., Савенко Б. Я., Шаповал В. И., Шепель С. И., Буртный П. А. Определение петрофизических характеристик по образцам. Под ред. В. Н. Дахнова. Москва: Недра, 1977. 432 с.
- Лебедев Т. С., Корчин В. А., Шаповал В. И., Савенко Б. Я., Буртный П. А. Петрофизические исследования при высоких *PT*-параметрах и их геофизические приложения. Киев: Наук. думка, 1988. 250 с.
- Рейдер Э. Флюидные включения в минералах (в 2-х т.). Москва: Мир, 1987. 632 с.
- Справочник физических констант горных пород. Под ред. С. Кларка-мл. Москва: Мир, 1969. 544 с.
- Korchin, V. A. (2006). Thermobaric Seismic Stratification of the Lithosphere. *12 International Symposium on Deep Structure of the Continents and their Margins*. September 24—29, 2006. Shonan Village Centre, Hayama, Japan, NHA-P02, CD-ROM.
- Korchin, V. (2010). Low velocity zones in the Earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(4), 70.
- Korchin, V. (2017). *Anomalies of low density in the crystalline crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons*. Monograph 72: 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 2—13, 2007. Perugia, Italy, SS001, CD ROM.

Decompaction of metamorphic rocks under thermodynamic conditions of the Earth crust (experimental data)

V. A. Korchyn, P. A. Burtnyy, E. E. Karnaukhova, 2018

A connection velocity—density inherent to the rocks of deep crust horizons is widely used while plotting concordant model of the Earth lithosphere with the methods of complex interpretation of geophysical data seeking for concordance of rated wave and gravity fields with the observed ones. Materials of experimental studies of elastic-density parameters of rocks under different thermobaric conditions of experiments, in particular, the values of density given in this work, complement and readjust information known before on relations of velocity and density of rocks at different depths considerably. Complex dependences $\rho=f(PT)$ have been shown for the first time with the areas of density inversion identified — thermodynamic decompaction of rocks, which have to be taken into account in petro-density thermobaric modeling of deep horizons of the earth crust. Zones of decompaction of lithosphere mineral material quite probably exist under present-day thermobaric conditions in the earth crust at the depth 5—15 km, they are characterized by decrease of density up to 0,02 g/cm³ and can produce horizons from 5 to 10 km thick. Rock decompaction is as a rule connected with structural transformations of substances stipulated by opposite per se phenomena of alteration of voluminous temperature expansion of minerals and their compressibility under thermobaric conditions of corresponding depths. Horizons of decreased density (by experimental data) as zones of low seismic velocities are sensitive to temperature regimes of the earth crust. While deep thermal flow increases density of rocks decreases, their ability to decompaction arouses, their permeability and absorbability rise, i.e. the process of mixing of fluids becomes more active and, as a result, metamorphic transduction of rocks takes place. In other words, zones of decreased V_p and ρ are the most active horizons of contemporary geologic-geophysical transformations of mineral medium of the earth crust. Their availability may be criteria for search of mineral deposits because they are the most permeable for migrating mineral media in the earth crust.

Key words: density of rocks, thermodynamic decompaction, pressure, temperature, velocity—density, modeling.

References

- Balashov, D. B. (1987). Volume compressibility of solids. In E. V. Zolotykh (Ed.), *Research in the field of high pressures* (pp. 272—295). Moscow: Izdatelstvo Standartov (in Russian).
- Berch, F. (1965). *Solid body under high pressure*. Moscow: Mir (in Russian).
- Belikov, B. P., Aleksandrov, K. S., & Ryzhova, T. V. (1970). *Elastic properties of rock-forming minerals and rocks*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Burtnyy, P. A., Korchin, V. A., & Karnaukhova, E. E. (2013). *Modeling of the real composition of deep horizons of the earth's crust (a new concept of interpretation of geophysical data)*. Saarbrücken: LAP Lambert Academic Publishing (in Russian).
- Geguzin, Ya. E., & Krivoglaz, M. A. (1971). *Motion of macroscopic inclusions in solids*. Moscow: Metallurgy (in Russian).

- Starostenko, V. I., & Gintov, O. B. (Eds.). (2013). *Kirovograd ore district. Deep structure. Tectonophysical analysis. Deposits of ore minerals*. Kiev: Galaktika (in Russian).
- Kobranova, K. N. (1986). *Petrophysics*. Moscow: Nedra (in Russian).
- Krasovsky, S. S. (1981). *Reflection of the dynamics of the Earth's crust of the continental type in the gravitational field*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Korchin, V. A. (2015). Low velocity zones of thermobaric origin in the crystalline crust. *Geofizicheskiy zhurnal*, 37(5), 46—65. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v37i5.2015.111145> (in Russian).
- Korchin, V. A. (2013a). Low velocity zones in the Earth's crust are perspective horizons of deep hydrocarbons localization. *Glubinnaya neft*, 1(8), 1099—1116 (in Russian).
- Korchin, V. A. (2011). Petrophysical features of zones of low seismic velocities in the earth's crust and their thermobaric instability. *Proceedings of the XVII All-Russian Conference with international participation «Problems of seismotectonics»* (pp. 273—277), Moscow, September 20—22 (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. (2013b). *Thermodynamics of crustal zones of low seismic velocities (new scientific hypothesis)*. LAP Lambert Academic Publishing (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. *Glubinnaya neft*, 2(9), 1434—1448 (in Russian).
- Korchin, V. A. (2012). Elastic-density thermobaric stratification of the lithosphere, crustal zones of low seismic velocities. *Proceedings of the III tectonophysical conference «Tectonophysics and topical issues of Earth sciences»* (Vol. 2, pp. 390—393). IPE RAS, Moscow, 8—12 October (in Russian).
- Korchin, V. A., Burtny, P. A., & Karnaukhova, E. E. (2011). Petrophysical modeling of Earth's crust sections with zones of low seismic velocities. *Proceedings of the X International Conference «Geoinformatics: Theoretical and Applied Aspects»*. Kiev, P056, CD-ROM (in Russian).
- Korchin, V. A., Burtnyy, P. A., & Kobolev, V. P. (2016). Zones of decompaction of the Earth's crust of the central part of the Ukrainian Shield (according to materials of petrophysical and seismogravitational modeling). *Geofizicheskiy zhurnal*, 38(3), 84—99. doi: <https://doi.org/10.24028/gzh.0203-3100.v38i3.2016.107781> (in Russian).
- Korchin, V. A., Burtnyy, P. A., & Kobolev, V. P. (2013). *Thermobaric Petrophysical Modeling in Geophysics*. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Lebedev, T. S., Korchin, V. A., Burtnyy, P. A. (1989). Geophysical applications of the results of the RT study of the elastic characteristics of rocks. In *Properties and state of mineral matter in the interior of the Earth*. Moscow: Nauka (in Russian).
- Lebedev, T. S., Kornietz, D. V., Shapoval, V. I., & Korchin, V. A. (1972). Elastic properties of rocks at high pressures. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Lebedev, T. S., Korchin, V. A., Savenko, B. Ya., Shapoval, V. I., & Shepel, S. I. (1986). Physical properties of mineral matter in the thermobaric conditions of the lithosphere. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Lebedev, T. S., Korchin, V. A., Savenko, B. Ya., Shapoval, V. I., Shepel, S. I., & Burtnyy, P. A. (1977). *Determination of Petrophysical Characteristics by Samples*. V. N. Dakhnova (Ed.). Moscow: Nedra (in Russian).
- Lebedev, T. S., Korchin, V. A., Shapoval, V. I., Savenko, B. Ya., & Burtnyy, P. A. (1988). Petrophysical studies with high RT parameters and their geophysical applications. Kiev: Naukova Dumka (in Russian).
- Raider, E. (1987). *Fluid inclusions in minerals* (Vols. 1-2). Moscow: Mir (in Russian).
- Clarke, C. Jr. (Ed.). (1969). *Handbook of physical constants of rocks*. Moscow: Mir (in Russian).
- Korchin, V. A. (2006). Thermobaric Seismic Stratification of the Lithosphere. *12 International Symposium on Deep Structure of the Conti-*

- nents and their Margins*. September 24—29, 2006. Shonan Village Centre, Hayama, Japan, NHA-P02, CD-ROM.
- Korchin, V. (2010). Low velocity zones in the Earth's crust. *Geofizicheskiy zhurnal*, 32(4), 70.
- Korchin, V. (2017). *Anomalies of low density in the crystalline crust of thermobaric origin: a new insight into migration and localization of hydrocarbons*. Monograph 72: 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 2—13, 2007. Perugia, Italy, SS001, CD ROM.