

Зоны разуплотнения земной коры центральной части Украинского щита (по материалам петрофизического и сейсмогравитационного моделирования)

© В.А. Корчин, П.А. Буртный, В.П. Коболев, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 17 февраля 2016 г.

Представлено членом редколлегии О. М. Русаковым

Швидкість поширення поздовжніх хвиль і густина гірських порід істотно залежать від тиску і температури, вплив яких необхідно враховувати при розрахунках цих параметрів на різних глибинах. Уперше представлені експериментальні дані про зміну швидкості поздовжніх хвиль і густини для окремих різновидів гірських порід залежно від температури і тиску з глибиною. За даними термобаричного петрофізичного сейсмогравітаційного моделювання отримано уточнений речовинний розріз ділянки земної кори центральної частини Українського щита. Виявлено локальні зони пониження густини гірських порід, які, як правило, збігаються із зоною низьких швидкостей і формуються глибинними термодинамічними умовами. Такі зони розуцільнення мінерального середовища можуть слугувати однією з діагностичних ознак під час пошуків родовищ корисних копалини.

Ключові слова: тиск, температура, петрофізика, речовина, модель, зона розуцільнення.

Введение. Проблематику применения интегрированной интерпретации материалов глубинных сейсмических зондирований (ГСЗ) путем построения региональных петрофизических термобарических моделей литосферы можно с уверенностью отнести к актуальным задачам современной геофизики. Одна из таких задач — построение согласованной модели глубинного строения с использованием корреляционных связей скорость—плотность для различных геологических объектов, в которой расчетные волновые и гравитационные поля совпадают с наблюдаемыми. Формально количественное совпадение наблюдаемого и расчетного полей не является достаточным критерием единственности решения поставленной задачи. Оно указывает лишь на одно из множества эквивалентных решений. Поэтому решение задачи должно наилучшим образом соответствовать совокупности известных априорных данных сейсмометрии, гравиметрии, геотермии, петрологии, изучения физических свойств и др. [Сейсмогравитационное ..., 1994].

Обычно при конструировании гравитационных моделей консолидированной земной коры

и верхов мантии выбираются значения плотности в соответствии с соотношением $\rho = f(V_p)$ на основании экспериментальных данных [Красовский, 1981]. Однако параметры этих регрессионных зависимостей существенно иные, чем полученные в лабораторных в термобарических условиях. Поэтому для расчета плотностных параметров пород консолидированной земной коры следует пользоваться зависимостями, измеренными при давлениях и температурах, соответствующих глубинам их естественного залегания.

Нашими многолетними исследованиями убедительно доказано, что в условиях больших глубин существенное влияние на зависимости скорости и плотности от глубины залегания ($V_p = f(H)$ и $\rho = f(H)$) оказывает температура [Корчин и др., 2013]. В большинстве случаев эта связь далека от линейной даже для отдельных разновидностей пород на различных глубинах [Корчин, 2013а, б]. В первую очередь эта неоднозначность возникает при сложных зависимостях упругих и плотностных характеристик горных пород от температуры (T) и давления (P).

Петрофизическое термобарическое моделирование базируется на сопоставлении экспери-

ментальных данных об изменении физических параметров горных пород (в частности, скорости распространения упругих волн и плотности) в PT -условиях, соответствующих термобарическим режимам земной коры исследуемых регионов, с материалами ГСЗ и гравиметрии. Это позволяет перейти от данных о физических свойствах глубинных горизонтов коры к определению возможного вещественного состава пород, слагающих эти горизонты [Буртный и др., 2013].

Основываясь на значениях скоростей распространения сейсмических волн по данным ГСЗ, с учетом их распределения по вертикали и латерали и геолого-структурных особенностей исследуемого района, петрофизическое термобарическое моделирование дает возможность выделить отдельные блоки, отличающиеся сейсмическими параметрами, построить скоростные колонки изменений скоростей с глубиной с разделением их на разноградиентные участки. Сопоставленные таким образом материалы ГСЗ и данные экспериментальных исследований об изменении скоростей распространения упругих продольных волн в PT -условиях, соответствующих глубинным условиям земной коры района, позволяют отдельные участки сейсмического разреза в виде скоростных колонок трансформировать в опорные литологические колонки, характерные для выделенных ранее блоков.

В настоящей статье впервые представлены экспериментальные данные об изменении плотности пород с глубиной ($\rho = f(PT) = f(H)$) для отдельных разновидностей горных пород неко-

торых участков Украинского щита (УЩ), используемые при построении соответствующих глубинных петрофизических моделей.

Результаты экспериментальных определений упругоплотностных параметров горных пород. Как показали лабораторные эксперименты, при высоких давлениях и температурах упругие и плотностные характеристики горных пород изменяются по нелинейным законам с проявлением на зависимостях этих параметров максимумов и минимумов на определенных глубинах (рис. 1). В интервале PT -условий, соответствующих глубинам 5–15 км, на графиках зависимости $V_p = f(PT) = f(H)$ проявляются зоны низких скоростей (ЗНС) (рис. 1, а).

Появление ЗНС зависит от программных термобарических условий опытов, соответствующих конкретным изучаемым регионам. Комплекс физических и структурных исследований горных пород показал, что в данном интервале P и T происходит микроразрушение пород как результат развития в среде неоднородных термоупругих напряжений [Корчин, 2013а, б]. Эти напряжения приводят к хрупкому на микроуровне разуплотнению межзернового пространства породы. После разуплотнения при дальнейшем увеличении PT -параметров включаются механизмы, характерные пластичным превращениям среды и происходит уплотнение породы под воздействием глубинных P и T за счет ее вещественных и структурных преобразований. При этом скорости распространения упругих волн в среде интенсивно увеличиваются [Корчин, 2013а, б; Корчин та ін., 2014].

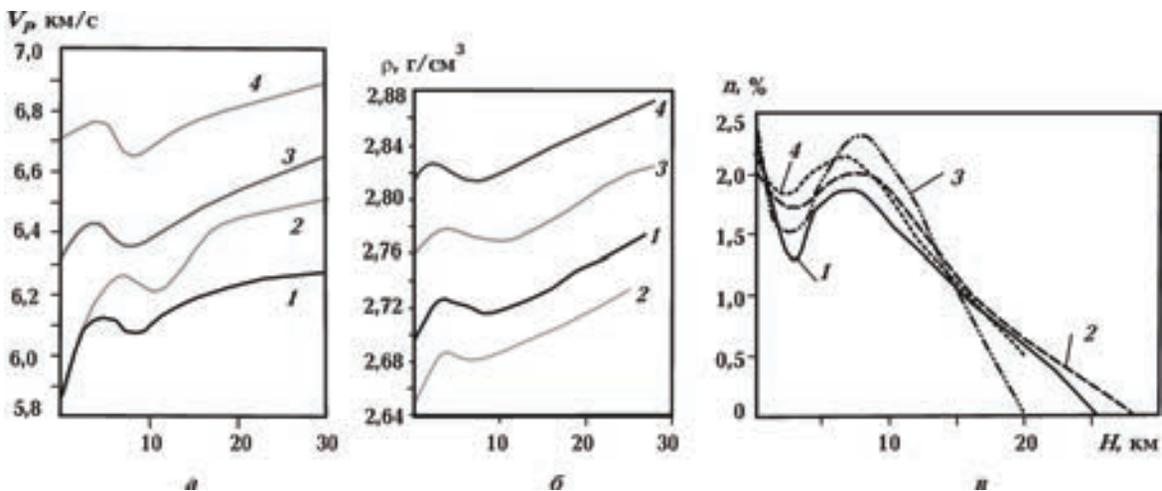


Рис. 1. Экспериментальные зависимости скорости продольных волн (а), плотности (б) и пористости (в) с глубиной при одновременном воздействии температуры и давления в породах: 1 — гнейсы, 2 — граниты, 3 — эндербиты, 4 — анортзиты.

ЗНС возникают в тех случаях, когда градиент температуры на соответствующих глубинах превышает определенный порог, а давление не способно компенсировать нарушение сплошности минерального вещества, вызванное действием температуры [Корчин, 2013б]. Выдвинутые положения о механизме возникновения ЗНС подтверждаются данными изучения изменения плотности пород под влиянием программного воздействия температуры и давления. Приведенные экспериментальные зависимости изменения с глубиной скорости и плотности для отдельных групп, а также рассчитанные изменения пористости однозначно свидетельствуют о нелинейном характере распределения этих параметров (см. рис. 1). Эксперименты показали, что при PT -условиях, соответствующих глубинам от 5 до 15 км, градиент роста плотности пород падает до нуля или становится отрицательным ($\Delta\rho \approx -0,01 \text{ г/см}^3$), при этом в зоне инверсии V_p и ρ происходит изменение пористости пород (рис. 1, в), подтверждая тем самым интенсивное разуплотнение пород в этих горизонтах.

Очевидно, что изменение скорости и плотности пород на глубинах проявления зон их инверсий существенно изменяют зависимости $V_p = f(\rho)$ от принятых среднестатистических. Это, в свою очередь, дает возможность уточнить связь $V_p = f(\rho)$ на различных глубинах (рис. 2). При сопоставлении статистических зависимостей $V_p = f(\rho)$ (рис. 2, а) с таковыми для отдельных образцов пород (рис. 2, б) наблюдается нарушение прямой корреляционной зависимости — более плотной породе соответствует большая скорость [Корчин та ін., 2014]. Именно в ЗНС традиционная зависимость скорость—плотность нарушается с образованием "петель" на кривых $V_p = f(\rho)$ (см. рис. 2, б). Таким образом, для этого диапазона глубин необходим подбор плотностей корового минерального вещества непосредственно по отдельным образцам горных пород с подходящими значениями скорости и плотности. Другими словами, построив по данным совпадения экспериментальных и наблюдаемых (ГСЗ) скоростей распределение минерального вещества с глубиной, дальнейший подбор плотностных зависимостей следует осуществлять в соответствии с условием $\rho = f(PT) = f(H)$ для конкретных пород. Такие данные о распределении плотности с глубиной используются на первом этапе гравитационного моделирования. Проверка наших построенных предполагает, что на глубине 5—20 км в земной коре могут вполне обоснованно суще-

ствовать зоны с пониженной плотностью относительно вышележащих и подстилающих минеральных образований.

Исходя из данных геологического картирования, была подобрана коллекция горных пород для экспериментальных измерений скоростей распространения упругих продольных волн и плотности пород Кировоградского рудного района: граниты рапакиви, граниты новоукраинские, граниты равномернозернистые и порфириовидные кировоградского комплекса, основные породы габбро-анортозитового состава, гнейсы ингуло-ингулецкой серии [Кировоградский ..., 2013].

На первом этапе были определены скорости упругих продольных волн и плотности в атмосферных условиях. Разнообразие минерального состава и структурно-текстурных особенностей исследованных пород обуславливает дифференциацию упругоплотностных параметров и широкий диапазон их изменения в пределах одной петрографической разновидности. Так, для гранитов рапакиви значения скорости распространения упругих продольных волн, измеренные в атмосферных условиях, составляют 5,23—6,43 км/с ($V_{pcp} = 5,93 \text{ км/с}$), при этом значения плотности образцов колеблются в пределах 2,623—2,750 г/см³ ($\rho_{cp} = 2,685 \text{ г/см}^3$). Для гнейсов ингуло-ингулецкой серии эти параметры составляют соответственно 5,28—6,14 км/с ($V_{pcp} = 5,82 \text{ км/с}$) и 2,659—2,754 г/см³ ($\rho_{cp} = 2,714 \text{ г/см}^3$). Построенные по данным измерений вариационные кривые показали, что наиболее вероятные значения скорости для гранитов рапакиви лежат в интервале 5,80—6,05, у гнейсов 5,70—5,90 км/с. Плотности указанных пород соответственно 2,65—2,68 и 2,69—2,71 г/см³.

Данные экспериментальных определений в условиях одновременного воздействия давления и температуры с учетом среднестатистических параметров скоростей распространения упругих продольных волн при атмосферных условиях дают возможность получить наиболее вероятные значения скоростей продольных волн на определенных глубинах в земной коре (табл. 1) и сравнить их с имеющимися сейсмическими материалами. Подобным образом были получены значения плотностей изученных пород (табл. 2), которые были использованы для корректировки построенной "сейсмоскоростной" модели.

Результаты петрофизического термобарического моделирования. Объектом петрофизического моделирования была выбрана цент-

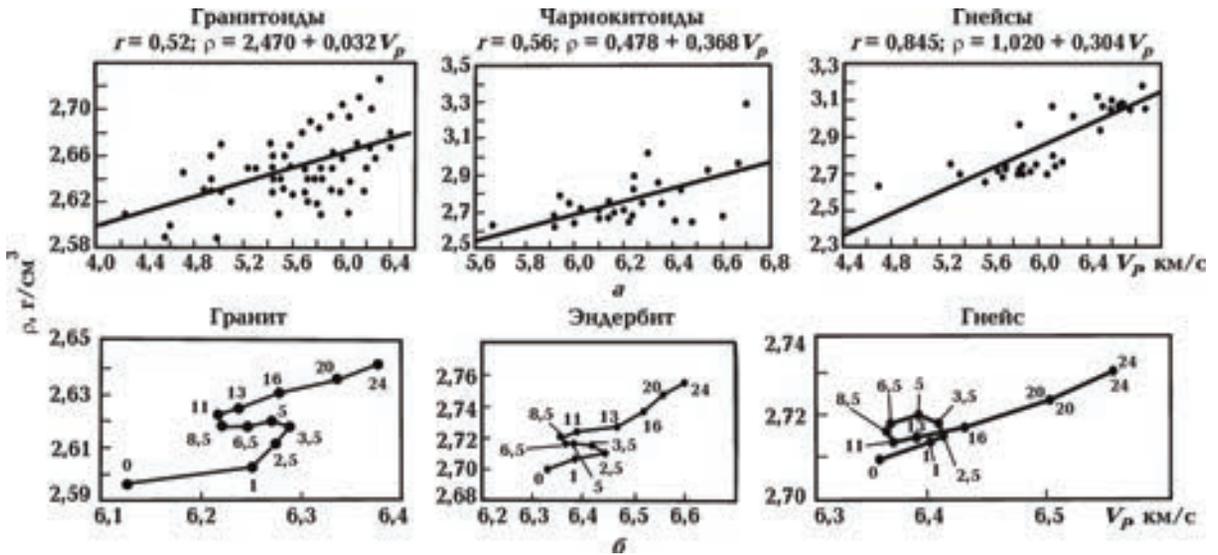


Рис. 2. Графики корреляции скоростей продольных волн и плотности некоторых групп пород (а) и зависимости $V_p = f(\rho)$ для отдельных их разновидностей (б) УЩ на различных глубинах (цифры на кривых соответствуют глубинам, км).

ральная часть УЩ (рис. 3). Этот регион достаточно хорошо изучен в геологическом отношении в связи с большим объемом выполненных поисково-разведочных работ в Кировоградском рудном районе. Обширная геологическая информация [Каляев, Комаров, 1972; Стрыгин, 1978; Геологическая ..., 1983; Щербаков, 1975, 2005; Державна ..., 2001, 2007 и др.] дает довольно четкое представление о тектоническом положении,

структурных элементах, составе и возрасте горных пород, слагающих верхние горизонты коры этого региона. Кировоградский рудный район детально исследован методом ГСЗ по профилям субширотного и субмеридионального направлений [Ильченко, Крюченко, 1981; Литосфера ..., 1988; Старостенко и др., 2007]. Таким образом, этот район является наиболее благоприятным для петрофизического моделирова-

Т а б л и ц а 1. Средние значения скорости продольных волн в горных породах на различных глубинах (экспериментальные данные), км/с

Породы	Глубина, км							
	0	3	6	10	15	20	30	40
Граниты рапакиви	5,93	6,15	6,30	6,25	6,40	6,50	6,55	6,60
Анортозиты	6,44	6,48	6,46	6,45	6,53	6,62	6,70	6,80
Габбро	6,52	6,60	6,58	6,53	6,58	6,65	6,73	6,78
Граниты новоукраинские	5,95	6,18	6,15	6,15	6,10	6,13	6,25	6,40
Граниты порфириовидные (кировоградские)	5,80	6,20	6,25	6,25	6,25	6,20	6,35	6,40
Граниты равномернoзернистые	5,85	6,05	6,00	6,05	6,15	6,17	6,22	6,25
Гнейсы ингуло-ингулецкой серии	5,82	6,13	6,05	6,13	6,12	6,17	6,35	6,47
Чарнокиты	6,05	6,20	6,20	6,15	6,35	6,40	6,50	6,60
Эндербиты	6,15	6,35	6,37	6,33	6,50	6,55	6,65	6,70
Основные гранулиты	6,50	6,60	6,55	6,55	6,65	6,70	6,85	6,95

Т а б л и ц а 2. Средние значения плотности горных пород на различных глубинах (экспериментальные данные), г/см³

Породы	Глубина, км							
	0	3	6	10	15	20	30	40
Граниты рапакиви	2,685	2,694	2,693	2,695	2,701	2,706	2,715	2,725
Анортозиты	2,757	2,764	2,767	2,777	2,789	2,795	2,805	2,817
Габбро	3,130	3,137	3,140	3,150	3,162	3,168	3,178	3,190
Граниты новоукраинские	2,661	2,670	2,669	2,671	2,676	2,683	2,691	2,701
Граниты порфиroidные (кировоградские)	2,637	2,646	2,645	2,647	2,653	2,658	2,667	2,667
Граниты равномернозернистые	2,654	2,663	2,662	2,664	2,670	2,675	2,684	2,694
Гнейсы ингуло-ингулецкой серии	2,714	2,720	2,719	2,722	2,730	2,737	2,748	2,759
Чарнокиты	2,667	2,670	2,671	2,679	2,692	2,707	2,732	2,751
Эндербиты	2,825	2,830	2,836	2,842	2,859	2,870	2,896	2,917
Основные гранулиты	2,925	2,930	2,936	2,942	2,959	2,970	2,996	3,017

ния и построения модели глубинного вещественного строения земной коры.

Непосредственно район исследований находится в субмеридиональной осевой зоне Ингульского мегаблока и включает в себя такие основные структуры как Корсунь-Новомиргородский и Новоукраинский массивы, а также расположенную восточнее Приингульскую синклинали (см. рис. 3). Фундамент Корсунь-Новомиргородского блока сложен анортозит-рапакиви-гранитовым комплексом пород. Более три четверти его площади занимают граниты рапакиви, основные породы габбро-анортозитового состава в некоторых местах выходят на поверхность в виде отдельных массивов. На севере породы Корсунь-Новомиргородского блока по разлому сочленяются с осадочно-метаморфической толщей ингуло-ингулецкой серии. На юге он граничит с Новоукраинским блоком по Субботско-Мошоринскому разлому. Фундамент последнего сложен розовыми преимущественно трахитоидными новоукраинскими гранитами (собственно Новоукраинский массив). В его южной части расположен Бобринецкий массив кировоградских гранитов, который отделен от Новоукраинского массива зоной Компаниевско-Марьевского разлома северо-восточного простираия. На юге Новоукраинский блок ограничен зоной Звенигородско-Анновского разлома северо-западного простираия и сочленяется с осадочно-метаморфическими породами ингуло-ингулецкой серии, слагающими Брат-

скую синклинали. Фактически в пределах Новоукраинского блока можно выделить два блока: собственно Новоукраинский и Бобринецкий. Приингульская синклинали выполнена в основном гнейсами ингуло-ингулецкой серии (центральная часть) и частично гранитами кировоградского комплекса (порфиroidными и равномернозернистыми), образующими небольшие массивы в ее западном и восточном обрамлении, а также в ее северной части [Каляев, Комаров, 1972; Щербаков, 1975; Геологическая ..., 1983; Державна ..., 2001, 2007].

Основой для построения петрофизической модели распределения пород в земной коре был взят профиль ГСЗ XXIV, который пересекает с севера на юг практически по осевой части Корсунь-Новомиргородский и Новоукраинский массивы (см. рис. 3). Следует отметить, что земная кора вдоль профиля наиболее полно охарактеризована скоростями сейсмических волн лишь в ее верхней части до глубины 10—15 км. Для более глубоких горизонтов коры скорости продольных волн определены лишь в средней части профиля (ПК 80—160), по их значениям в коре выделено два блока (рис. 4, б). Северный блок (ПК 200—130) соответствует Корсунь-Новомиргородскому плутону, в коре которого граница K_2 зафиксирована на глубине 10 км, скорости составляют порядка 6,4 км/с и достигают 7,0 км/с на границе М. Южный блок (ПК 130—70) относится к более высокоскоростному Новоукраинскому массиву, граница K_2 от-

мечена на глубине около 15 км скорости на поверхности M изменяются от 6,6 км/с до 7,1 км/с.

Корсунь-Новомиргородский блок. Скоростные характеристики верхних горизонтов коры блока до границы K_2 вдоль профиля XXIV наиболее полно представлены только в южной его части (ПК 160—130, рис. 4, б), где наблю-

дается их сложное соотношение. Зарегистрированная вблизи поверхности скорость сейсмических волн 6,0 км/с с глубиной увеличивается и достигает 6,5 км/с на глубине 5 км. Затем снижается до 6,1 км/с и постепенно увеличивается до 6,3 км/с до глубины около 10 км, где зафиксирована граница K_2 . Далее без ви-

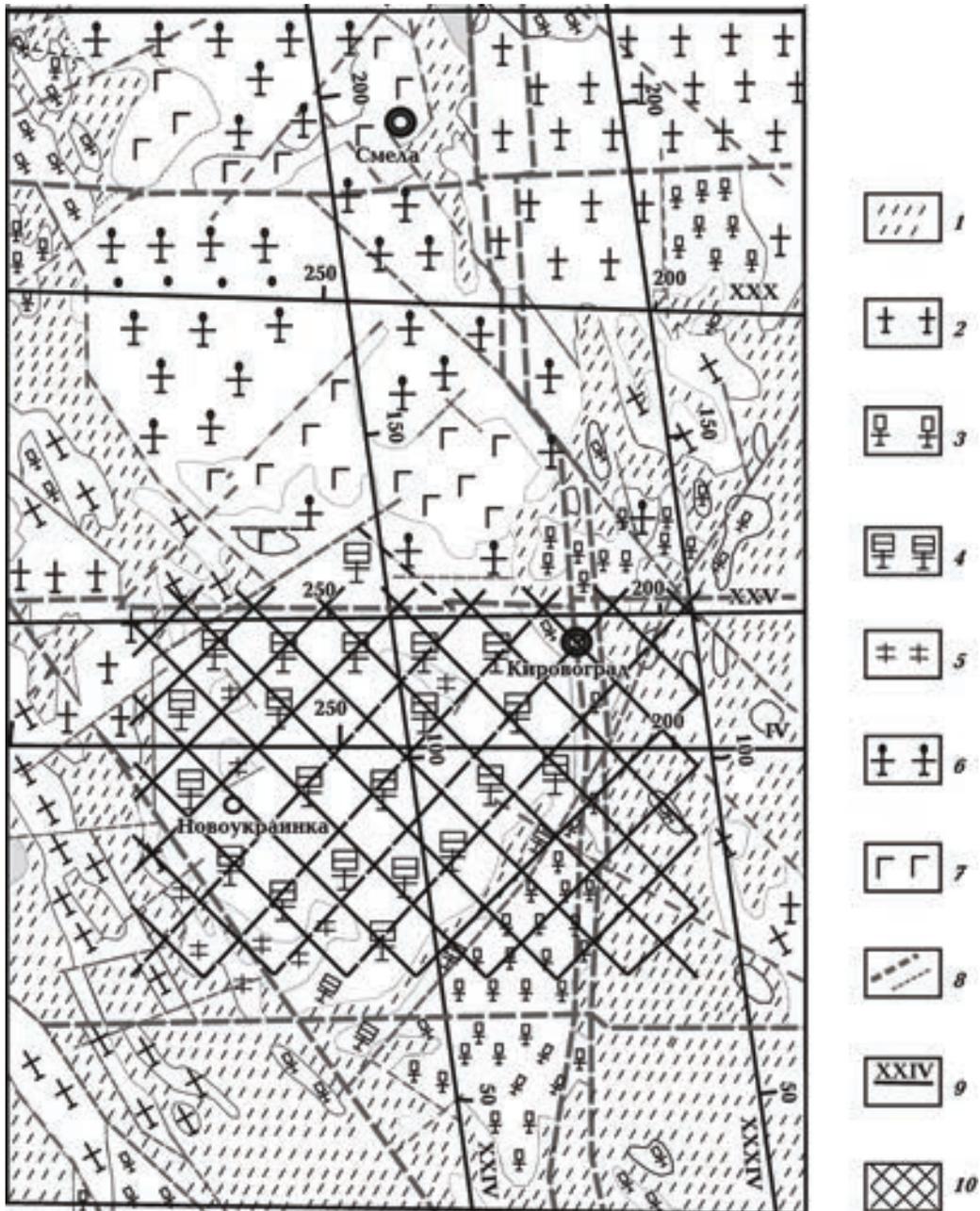


Рис. 3. Схема геологического строения района исследований (по [Геологическая ..., 1983]): 1 — гнейсовые комплексы ингуло-ингулецкой серии, 2, 3 — гранитоиды кировоградского комплекса (2 — равномернозернистые, 3 — порфиробластические), 4 — граниты новоукраинские, 5 — монзониты новоукраинские, 6 — граниты рапа-киви, 7 — габбро-анартозиты, 8 — разломы, 9 — профили ГСЗ, 10 — зона корового разуплотнения ($H = 6 \div 12$ км).

димого скачка скорость сейсмических волн продолжает возрастать и вблизи границы М достигает 7,0 км/с.

Кора северного участка блока (ПК 200—160, рис. 4, б) на профиле XXIV охарактеризована

лишь до глубины порядка 8 км, где скорости сейсмических волн изменяются от 6,0 до 6,7 км/с. Характер распределения сейсмических скоростей глубинных горизонтов этого участка позволяет уточнить данные сейсмических ис-

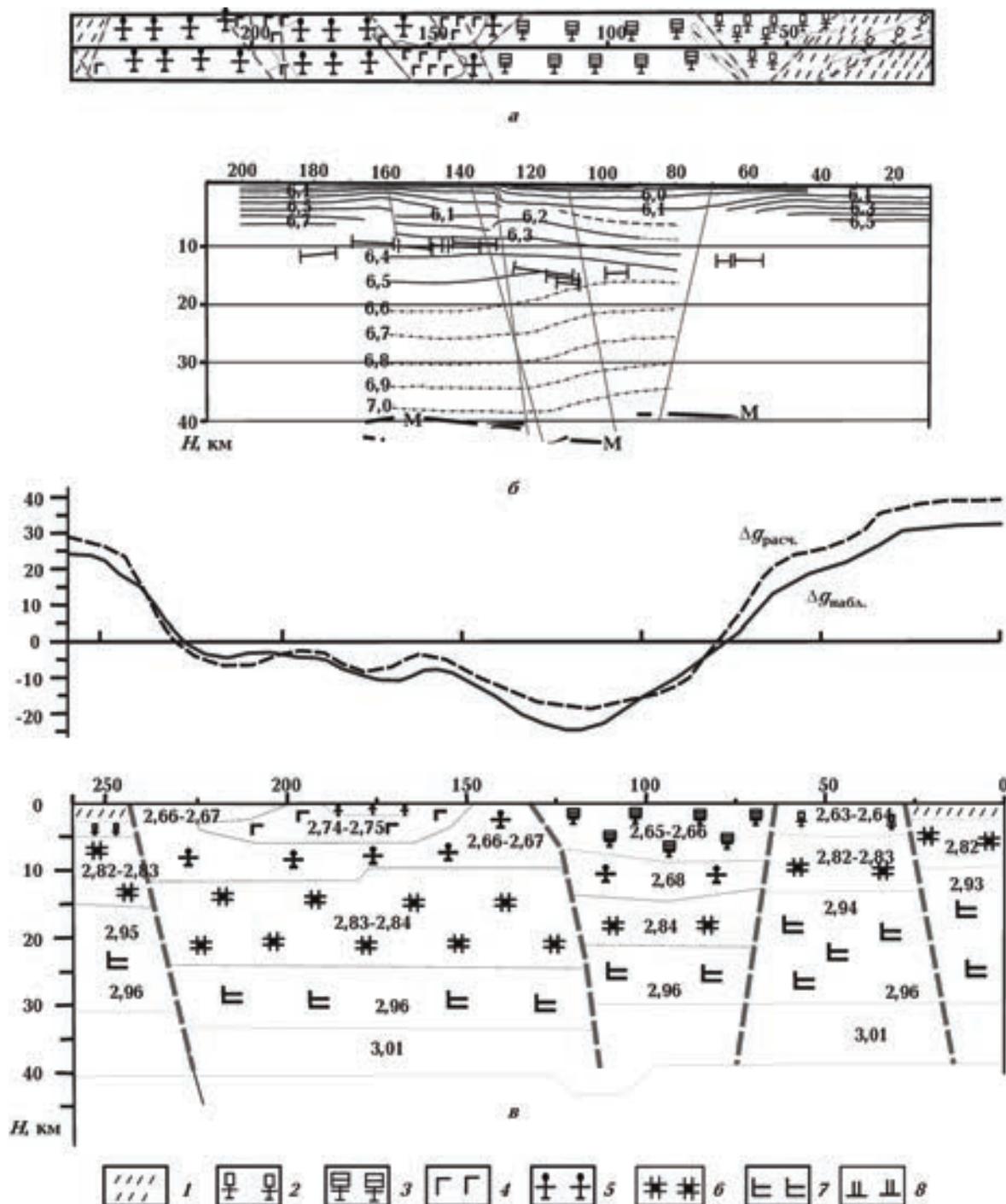


Рис. 4. Профиль ГСЗ XXIV. Геологическая обстановка (а), скоростной разрез (б), результаты сейсмогравитационного моделирования и модель распределения пород в земной коре (в): 1 — гнейсовые комплексы ингуло-ингулецкой серии, 2 — гранитоиды кировоградского комплекса, 3 — граниты новоукраинские, 4 — габбро-анортозиты, 5 — габбро-анортозиты, 6 — эндербиты, 7 — основные гранулиты, 8 — гнейсы пироксенового состава.

следований вдоль субширотного профиля ХХХ (см. рис. 3). В районе их пересечения (ПК 168 на профиле ХХIV и ПК 249 на профиле ХХХ) в коре выделяется высокоскоростной блок, в котором сейсмические скорости изменяются от 6,0 км/с вблизи поверхности до 6,5 км/с на глубине около 5 км (рис. 5, б). Высокоскоростной слой подстилается более низкоскоростными породами, для которых на глубинах около 6 и 10 км (граница K_2) скорости составляют соответственно 6,2 и 6,3 км/с. Ниже границы K_2 значения скоростей сейсмических волн и градиент их изменения с глубиной на обоих разрезах идентичны.

В результате анализа материалов ГСЗ были выделены наиболее типичные участки разреза, отличающиеся характером изменения ско-

ростей сейсмических волн с глубиной. Построенные по этим данным скоростные колонки сопоставлены с данными экспериментальных лабораторных исследований $V_p = f(PT) = f(H)$ горных пород исследуемого района. В результате сопоставления построены прогнозные колонки и возможный состав коры Корсунь-Новомиргородского блока (рис. 5).

Прежде всего, следует отметить, что нижняя часть коры массива как по скоростным характеристикам, так и по положению границы K_2 разбита на два блока второго порядка. В коре западного блока граница K_2 зафиксирована на глубине 10—12 км, глубже которой скорости сейсмических волн изменяются от 6,5 до 7,2 км/с на границе М. Граница K_2 восточного блока зафиксирована на глубине 15—16 км,

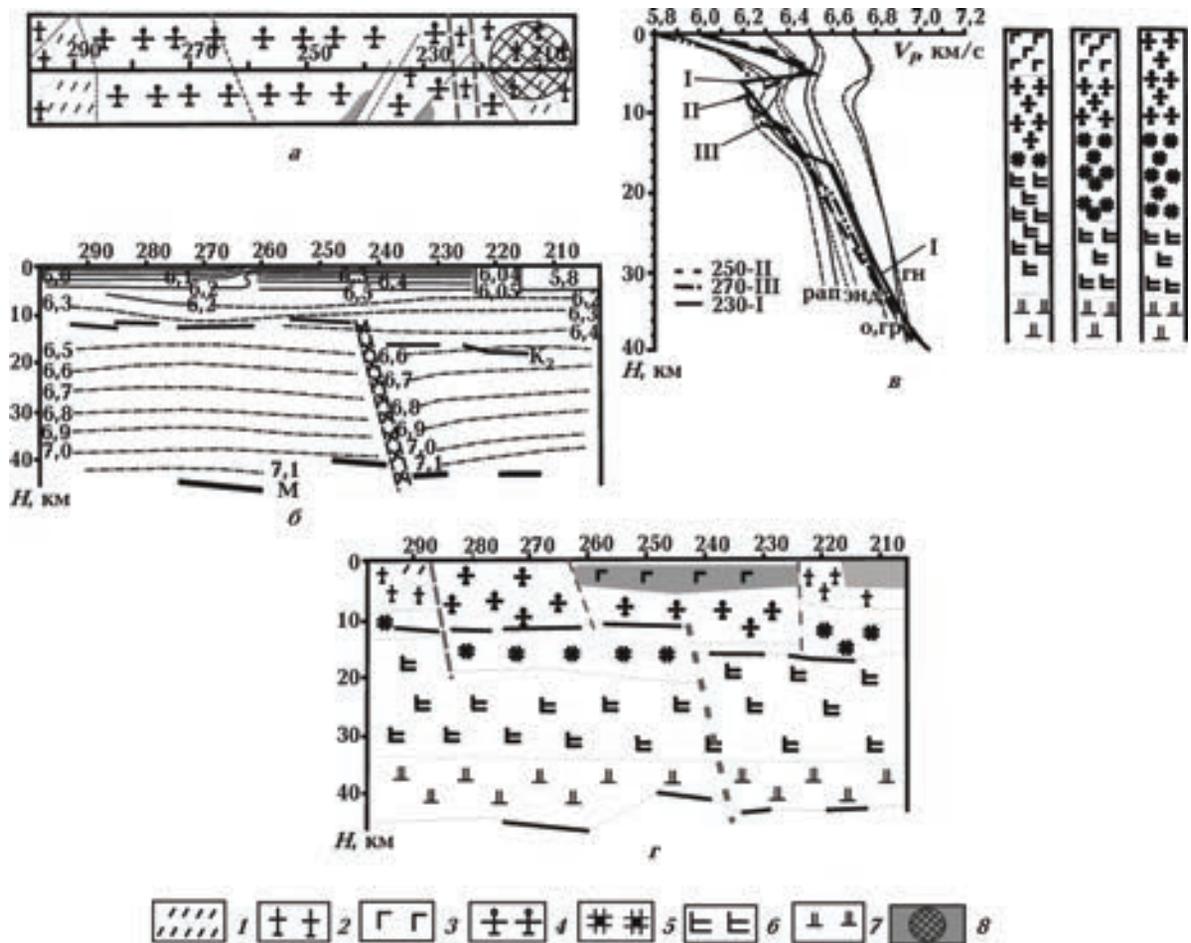


Рис. 5. Профиль ХХХ. Геологическая обстановка (а), скоростной разрез (б), изменение скорости сейсмических волн с глубиной по материалам ГСЗ (графики изменения скорости сейсмических волн I, II, III получены на пикетах 230, 250, 270 соответственно) и экспериментальные данные изменения скорости упругих продольных волн в горных породах с глубиной и литологические колонки (в); прогнозный состава коры Корсунь-Новомиргородского массива (г): 1 — гнейсы ингуло-ингулецкой серии, 2 — гранитоиды кировоградского комплекса, 3 — габбро-анортозиты, 4 — граниты рапакиви, 5 — эндербиты, 6 — основные гранулиты, 7 — гнейсы пироксеновые, 8 — Болтышская впадина.

а скорости сейсмических волн изменяются от 6,6 км/с на границе K_2 до 7,1 км/с на поверхности М. Границей между этими блоками служит зона разлома, расположенная в районе ПК 240—245 фактически под центром массива. На поверхности, судя по геологическим данным, этот разлом не прослеживается. Его можно было бы отождествить с зоной Кировоградского разлома, но на поверхности последний прослеживается значительно восточнее, в районе ПК 225.

В верхних горизонтах коры выше границы K_2 также выявлены два блока с разными скоростями сейсмических волн, границей между которыми служит Маловисковский разлом. Первый — высокоскоростной (ПК 220—265), в нем сейсмические скорости изменяются от 6,0 км/с на поверхности до 6,5 км/с на глубине около 5 км. Высокоскоростной слой подстилается более низкоскоростными породами, для которых установлены скорости от 6,2 км/с на глубине около 6 км до 6,3 км/с на глубине 10 км, где зафиксирована граница K_2 .

Второй — низкоскоростной, расположен западнее (ПК 265—295). Скорости на поверхности составляют 5,8 км/с, на глубине около 5 км достигают 6,2 км/с, а глубже (до 6—7 км) практически не изменяются. В этом интервале глубин зафиксированная изолиния скорости 6,2 км/с, аналогичная выявленной в высокоскоростном блоке. Мощность этой зоны постоянной скорости постепенно уменьшается в западном направлении и выклинивается в районе ПК 285 фактически на границе массива, ограниченно зоной Звенигородско-Анновского разлома.

Таким образом, в результате анализа материалов ГСЗ вдоль профилей XXIV и XXX в земной коре Корсунь-Новомиргородского массива можно выделить несколько участков, характеризующихся определенным соотношением в них скоростей сейсмических волн и, как результат, составом слагающих их пород. На рис. 5 выделяется, прежде всего, восточная часть массива (ПК 230), где отмеченный вблизи поверхности высокоскоростной участок, соответствующий скоростям V_p для пород габбро-анортозитового состава, на глубине около 4—6 км подстилается более низкоскоростными породами. Отмеченная на глубине 6—12 км сейсмическая зона понижения скорости по величине и градиенту хорошо совпадает с зоной низких скоростей, экспериментально установленной для гранитов рапакиви. Выделяемый приповерхностный высокоскоростной горизонт имеет свое продолжение и в западной части массива (ПК 250). Подстилают его более низкоскоростные

граниты рапакиви до глубины 10—12 км, т. е. до границы K_2 , которую можно отождествлять с границей выхода из ЗНС, установленной экспериментально для гранитов рапакиви. Распространение габбро-анортозитового слоя ограничено зоной Маловисковского разлома, западнее которого вплоть до края массива от поверхности и до границы K_2 можно предполагать развитие гранитов рапакиви, экспериментально установленные скорости для которых хорошо согласуются с сейсмическими скоростями в этом интервале глубин.

Что касается более глубоких горизонтов коры ниже границы K_2 , отметим следующее. В свое время, говоря о глубинном строении и составе континентальной коры, Б. Г. Лутц отмечал, что "базальтовый" слой коры это "осадочно-вулканогенные дифференцированные комплексы с преобладанием пород основного и среднего состава, метаморфизованные в гранулитовой фации и существенно негранитизированные" [Лутц, 1974, с. 261]. Рассматривая вопрос о генезисе пород анортозит-мангеритовой серии, он отмечал обязательную приуроченность этих комплексов к докембрию и пространственную связь с гранулитовыми комплексами: "... для возникновения анортозитов необходимы достаточно сухие и перегретые относительно мокрых эвтетик глубинные породы, которые при проникновении ювенильных растворов начинают плавиться. Такими "перегретыми и сухими" комплексами могли быть только породы гранулитовой фации" [Лутц, 1974, с. 234].

В целом породы, слагающие поверхность фундамента и верхнюю часть земной коры исследуемого района, представляют собой верхний структурный этаж. Нижний этаж общепринято считать гранулитовым, в котором преобладают продукты ультраметаморфизма гранулитовой фации — чарнокиты-эндербиты. Обобщение и анализ материалов экспериментальных исследований упругоплотностных параметров указанных образований дал основание выделить среди них несколько разновидностей, которым присущи определенные значения скорости упругих продольных волн и плотность. Исходя из этого, в составе нижнего структурного этажа можно предположить развитие (сверху вниз) пород типа эндербитов и основных гранулитов, для которых экспериментально установленные скорости $V_p = f(PT) = f(H)$ хорошо согласуются с сейсмическими скоростями, фиксируемыми в земной коре на этих глубинах. В основании коры, в зависимости от результатов

сопоставления (см. рис. 5, в), могут присутствовать метаморфические образования гранулитовой фации регионального метаморфизма — породы типа пироксеновых гнейсов.

Новоукраинский блок. В земной коре блока по распределению скоростей сейсмических волн на профиле XXIV (см. рис. 4, б) в верхней его части также выделяется два блока: северный, собственно Новоукраинский (ПК 130—65) и Бобринецкий (ПК 65—30). В пределах северного блока скорость сейсмических волн постепенно увеличивается от 5,8 до 6,1 км/с на глубине около 4 км, в интервале глубин 4—7 км она практически постоянная (6,1 км/с), глубже вплоть до границы K_2 происходит увеличение до 6,4 км/с. На границе K_2 (14—15 км) зафиксирован небольшой скачок скорости, которая с глубины 17 км увеличивается от 6,6 до 7,1 км/с на границе М. Для южной части за-

фиксирована скорость 5,8 км/с на поверхности фундамента и увеличение до 6,5 км/с на глубине около 6 км.

Довольно детально сведения о скоростном разрезе коры Новоукраинского блока представлены в материалах ГСЗ вдоль геотраверса IV (см. рис. 3), который пересекает его центральную часть в субширотном направлении (см. рис. 5, б, ПК 200—270). На скоростном разрезе указанный блок выделяется как единая структура, ограниченная зонами разломов — Кировоградского на востоке и Звенигородско-Анновского на западе. В отличие от профиля XXIV (рис. 6, б) в верхней части коры здесь четко зафиксирована зона понижения скоростей сейсмических волн, расположенная на глубине 8—15 км. Выход из зоны (граница K_2) характеризуется скачком скорости от 6,25 до 6,33 км/с. Ниже границы K_2 скорость сейсмических волн

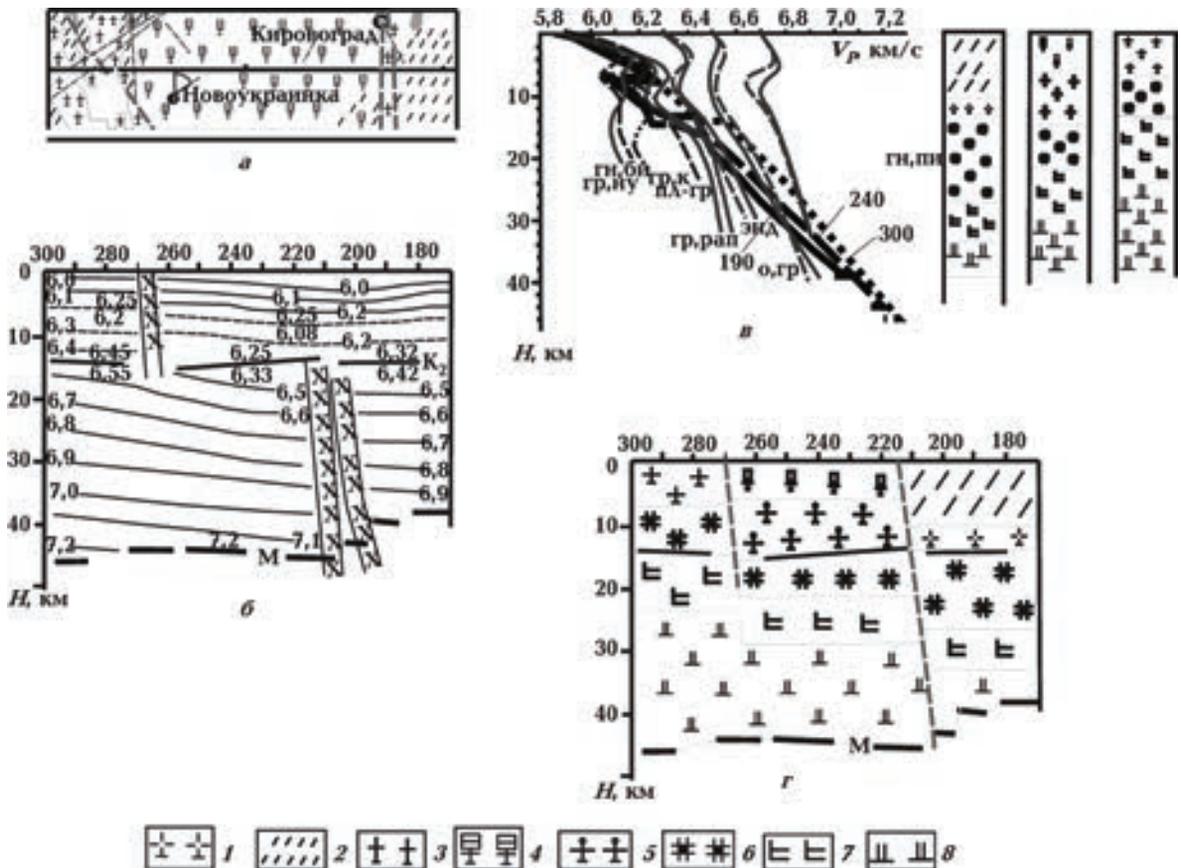


Рис. 6. Геотраверс IV. Геологическая обстановка (а), скоростной разрез (б), изменение скорости сейсмических волн с глубиной по материалам ГСЗ, экспериментальные данные изменения скорости упругих продольных волн в горных породах с глубиной и литологические колонки (в), прогнозный состава коры Новоукраинского массива (г): 1 — гнейсы ингуло-ингулецкой серии, 2 — плагиограниты, 3 — гранитоиды кировоградского комплекса, 4 — граниты новоукраинские, 5 — граниты рапакивты, 6 — эндербиты, 7 — основные гранулиты, 8 — гнейсы пироксеновые.

меньше установленных вдоль профиля XXIV, изменяется от 6,3 до 6,8 км/с на глубине около 32 км, где приближается к значениям скоростей, зафиксированным вдоль профиля XXIV.

В отличие от Корсунь-Новомиргородского поверхность Новоукраинского массива сложена порфиридовидными новоукраинскими гранитами, которые, исходя из экспериментальных данных, могут быть прослежены до глубины 5,0—6,0 км. Глубже сейсмические скорости в коре значительно выше полученных экспериментально значений скоростей упругих продольных волн этих пород и достаточно хорошо, вплоть до границы K_2 , согласуются с таковыми для гранитов рапакиви. Причем выявленная на профиле ГСЗ IV в интервале глубин 6—14 км ЗНС четко совпадает с экспериментально полученной в исследованных гранитах, выход из которых фиксируется как граница K_2 . Это дает нам право утверждать, что в данном случае граница K_2 имеет термодинамическую природу, когда скорости упругих волн интенсивно возрастают за счет увеличения с глубиной давления и температуры после ЗНС.

Состав коры глубже границы K_2 , как и в Корсунь-Новомиргородском блоке, предположительно гранулитовый. Как видно из рис. 6, наиболее близки к значениям сейсмических скоростей ГСЗ в определенных интервалах глубин экспериментально определенные скорости продольных волн для эндербитов, основных гранулитов, пироксеновых гнейсов.

Полученные в результате петроскоростного моделирования данные о составе коры Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского блоков были использованы при построении прогнозного разреза вдоль профиля ГСЗ XXIV, который пересекает осевую зону Кировоградского района в субмеридиональном направлении.

Для получения более точной информации о характере распределения и составе пород и корректировки построенной первичной модели было проведено сейсмогравитационное петроплотностное моделирование на данном участке профиля. Для этого на основании средне-статистических параметров плотности для определенных петрографических групп пород и изменения их с глубиной по данным экспериментальных исследований в PT -условиях, соответствующих PT -условиям коры, определены значения плотности для отдельных блоков или горизонтов. Исходя из полученных данных о плотностных характеристиках выделенных

ранее горизонтов пород была рассчитана составляющая гравитационного поля вдоль профиля, которая сопоставлялась с полученной при гравиметрических исследованиях. Характер совпадения наблюдаемого и расчетного графиков корректировался путем изменения в допустимых пределах значений плотности выделяемых слоев ($\pm 0,01$ г/см³), а более точное совмещение — изменением мощности тел и их конфигурации.

Обсуждение результатов. По данным петрофизического моделирования получен прогнозный вещественный разрез центральной части УЩ, который в какой-то мере приближает нас к реальной геологической обстановке. Анализ скоростных параметров коры Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского блоков показывает, что наиболее контрастные отличия присущи верхним горизонтам вплоть до границы K_2 . Такие отличия хорошо согласуются с особенностями геологического строения указанных массивов. Сопоставление материалов ГСЗ с экспериментальными данными изменения скоростных параметров пород, слагающих их при-поверхностные горизонты, позволяют с учетом геологической информации предположить их развитие на глубину.

Так, скоростные параметры коры в пределах Корсунь-Новомиргородского блока хорошо согласуются с экспериментальными данными об изменении упругих продольных волн с глубиной для гранитов рапакиви, развитие которых можно предполагать до глубины 10—12 км. Выявленный на профилях ГСЗ в приповерхностной части высокоскоростной участок соответствует присутствию здесь анортозитовых пород. Причем указанные породы могут быть представлены в виде пластовой залежи в толще гранитов в интервале глубин 0,5—4,0 км.

Глубже границы K_2 вплоть до границы М скоростные параметры коры рассматриваемых блоков практически совпадают, что может свидетельствовать и о сходстве их состава. Отметим, прежде всего, что скорости сейсмических волн здесь значительно ниже экспериментально измеренных скоростей упругих продольных волн для таких интрузивных и метаморфических пород как габбро-нориты, пироксениты, амфиболиты, пироксеновые гнейсы и сланцы. Наиболее близки по значениям и сопоставимы по характеру изменения упругих параметров с глубиной в определенных интервалах экспериментальные скорости продольных волн для эндербитов, основных гранулитов, габбро, анортози-

тов. Если же учесть, что в районе рассматриваемых блоков скважинами часто вскрывались породы чарнокитового ряда, образцы которых были отобраны и представлены для исследований, то вполне закономерно предполагать первичную гранулитово-базитовую кору и, как следствие, наиболее вероятный состав литосферы ниже границы K_2 (сверху вниз) — эндербиты, основные гранулиты, возможно, с прослоями пород типа анортозитов.

Следует отметить, что предложенная петроскоростная модель, основанная на данных ГСЗ и экспериментальных материалах, хорошо согласуется с положениями гипотезы о палингено-метасоматическом образовании пород гранит-анортозитовых комплексов [Стрыгин, 1978; Коваль, Валасис, 1989]. Причем, согласно нашим построениям, можно предположить, что рассматриваемый участок УЩ ранее представлял собой единое целое. В процессе его эволюции в результате тектонических движений он был разбит на блоки, границей смещения между которыми служила зона Субботско-Мошоринского разлома. Ввиду того, что метасоматические процессы и переработка более древнего архейского основания происходили снизу вверх, Корсунь-Новомиргородский блок испытал восходящее движение, в результате чего на земную поверхность были вынесены более молодые породы Коростенского комплекса, скрытые в пределах Новоукраинского массива под толщей одноименных пород.

Анализ и обобщение материалов экспериментальных исследований плотности при высоких P и T показали, что плотность пород, как и скорости упругих волн, также изменяется по сложным законам с появлением на графиках $\rho = f(PT) = f(H)$ зон ее понижения на глубинах, соответствующих глубинам ЗНС (зоны разуплотнения). Используя эти материалы, нами построены скоростной и плотностной разрезы вдоль рассматриваемого профиля, которые позволяют подчеркнуть особенности распределения этих параметров в земной коре исследуемого района (рис. 7).

На разрезах, согласно экспериментальным данным, четко выделяются ЗНС (рис. 7, а) и соответствующие им зоны разуплотнения (рис. 7, б). Причем в коре Корсунь-Новомиргородского блока такие зоны слабо выражены вследствие того, что их верхние части перекрыты более высокоскоростными и высокоплотными породами габбро-анортозитового состава.

В коре Новоукраинского блока указанные зоны проявляются более четко. Здесь они занимают более широкий интервал глубин вследствие того, что зоны, выявленные в новоукраинских гранитах, имеют свое продолжение и плавно переходят в зоны низких скоростей и плотностей, выделенные в залегающих ниже гранитах рапакиви.

Заключение. Широко проявленная зона повышенной пористости (рис. 1, в) и проницаемости в коре Новоукраинского блока является наиболее благоприятной для локализации полезных ископаемых, о чем свидетельствует тот факт, что большая часть рудных месторождений расположена в пределах Новоукраинского блока [Кировоградский ..., 2013].

Приобретая характер широкомасштабной системы сквозных глубинных нарушений в коре, ЗНС (области разуплотненных пород) в период активизации тектономагматических процессов являются наиболее проницаемыми. К типичным проявлениям процессов разуплотнения пород на больших глубинах в условиях высоких давлений и температур относятся признаки естественного флюидоразрыва, тектонического дробления, интенсивного кливажирования весьма прочных пород [Лукин, 2014]. С ними связывается повышение интенсивности теплового потока, поступление продуктов магматизма (в том числе в виде гидротермальных растворов) и активизация процессов метасоматоза. Будучи корневой системой приповерхностных разломных структур, эти зоны в последующие этапы тектономагматической активизации способствуют выносу, перераспределению, формированию и локализации минерального вещества в близповерхностных частях коры. Они характеризуются существенными геохимическими аномалиями и наличием оруденений, приуроченных к глубинным разломам и термобарическим зонам разуплотнения коры, которые, естественно, генетически связаны с проявлениями разноглубинных тектономагматических процессов [Стрыгин, 1978; Щербаков, 2005; Кировоградский ..., 2013].

Таким образом, наличие ЗНС (областей разуплотненных пород) может служить критерием поисков полезных ископаемых, поскольку эти зоны наиболее проницаемы для мигрирующих минеральных сред в земной коре. Наиболее перспективны в данном аспекте горизонты палеообластей ЗНС, которые, возможно, в настоящее время находятся вблизи поверхно-

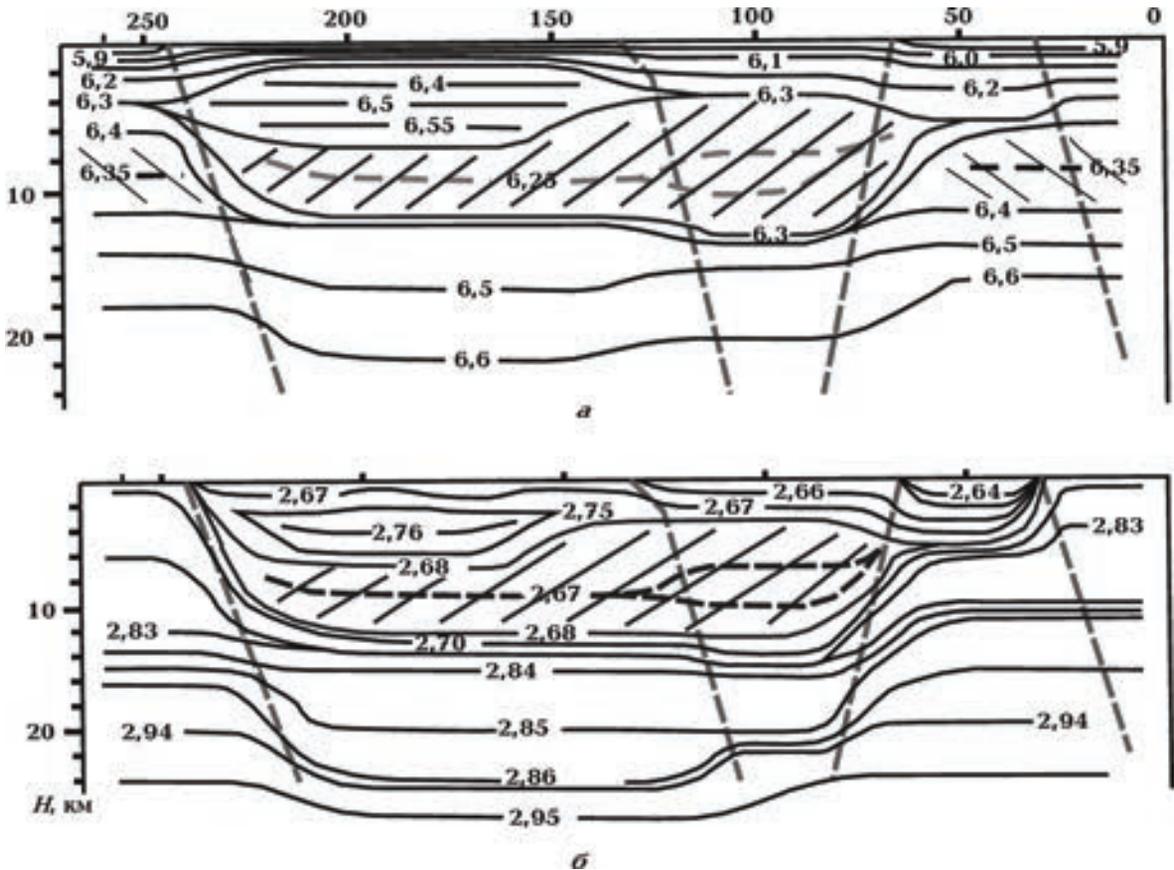


Рис. 7. Скоростной (а) и плотностной (б) разрезы земной коры вдоль профиля ГСЗ XXIV, построенные по данным экспериментальных исследований изменения скорости и плотности горных пород с глубиной.

сти в результате эрозии коры. В этих областях наиболее вероятно локализация как твердофазных полезных ископаемых, так и газово-жидких углеводородов abiогенного происхождения [Корчин, 2014].

ЗНС из известных глубинных аномалий физических полей наиболее доступны для изучения различными геолого-геофизическими методами, в том числе глубоким бурением, что спо-

собствует наиболее детальному и перспективному их изучению с целью поисков полезного минерального сырья и уточнения глубинного строения Земли, объяснения и предсказания процессов коровых землетрясений. Такие коровые зоны разуплотнения минеральной среды (ЗНС) могут служить глубинным диагностическим признаком при поисках месторождений полезных ископаемых.

Список литературы

Буртний П. А., Корчин В. А., Карнаухова Е. Е. Моделирование вещественного состава глубинных горизонтов земной коры (новая концепция интерпретации геофизических данных). Saarbrücken: Lambert Akadem. Publ., 2013. 188 с.

Укр. Геологічний щит м-ба 1 : 500 000. Объяснительная записка. Киев, 1983. 101 с.

Державна геологічна карта України м-б 1 : 200 000. Центральноукраїнська серія. Аркуш М-36-XXXII (Новоукраїнка). Київ, 2001. 119 с.

Геологическая карта кристаллического основа-

Державна геологічна карта України м-б 1 : 200 000.

- Центральноукраїнська серія. Аркуш М-36-XXXXIII (Новоукраїнка). Київ, 2007. 102 с.
- Ильченко Т.В., Крюченко В.А. Результаты комплексной интерпретации сейсмических и гравитационных данных по профилю XXV Пятихатки—Бабанка. *Геофиз. журн.* 1981. Т. 3. № 1. С. 94—104.
- Каляев Г.И., Комаров О.М. Кіровоградський блок. В кн.: *Тектоніка Українського щита*. Київ: Наук. думка, 1972. С. 137—184.
- Кировоградский рудный район. Глубинное строение. Тектонофизический анализ. Месторождения рудных полезных ископаемых. Под ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. Киев: Прас-тыи луды, 2013. 500 с.
- Коваль В.Б., Валасис А.Г. Проблема аортозит-рапакивигранитной формации. *Геолог. журн.* 1989. № 2. С. 48—54.
- 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. Коровые зоны низких скоростей — перспективные горизонты локализаций глубинных углеводородов. *Глубинная нефть*. 2013а. Т. 1. № 8. С. 1099—1116.
- Корчин В.А. Термодинамика коровых зон низких сейсмических скоростей (новая научная гипотеза). Saarbrücken: Lambert Academ. Publ., 2013б. 280 с.
- Корчин В.А., Буртний П.А., Карнаухова Е.Е. Термодинамическое нарушение линейной связи "скорость—плотность" горных пород в земной коре: *Материалы XIV Междунар. конф. "Физико-химические и петрофизические исследования в науках о Земле"*. Москва: ИГЕМ РАН, 2014. С. 107—110.
- Корчин В.О., Буртний П.О., Карнаухова О.Є. Особливості термобаричного сейсмо-гравітаційного петрофізичного моделювання глибинних горизонтів літосфери. Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах: *Матеріали наукової конф.-семінару, присвяч. пам'яті Т.З. Вербицького та Ю.Т. Вербицького*. 3—5 червня 2014 р. Львів: Сполом, 2014. С. 99—103.
- Корчин В.А., Буртний П.А., Коболев В.П. Термобарическое петрофизическое моделирование в геофизике. Киев: Наук. думка, 2013. 312 с.
- Красовский С.С. Отражение динамики земной коры континентального типа в гравитационном поле. Киев: Наук. думка, 1981. 264 с.
- Литосфера центральной и восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII. Гл. ред. А.В. Чекунов. Киев: Наук. думка, 1988. 171 с.
- Лукин А.Е. Углеводородный потенциал больших глубин и перспективы его освоения в Украине. *Геофиз. журн.* 2014. Т. 36. № 4. С. 3—23.
- Лутц Б.Г. Петрология глубинных зон континентальной коры и верхней мантии. Москва: Наука, 1974. 304 с.
- Сейсмогравитационное моделирование при изучении литосферы. Под ред. В.И. Старостенко, Я. Шванцара. Киев: Наук. думка, 1994. 292 с.
- Старостенко В.И., Казанский В.И., Дрогицкая Г.М., Макивчук О.Ф., Попов Н.И., Тарасов Н.Н., Трипольский А.А., Шаров Н.В. Связь поверхностных структур Кировоградского рудного района (Украинский щит) с локальными неоднородностями коры и рельефом раздела Мохо. *Геофиз. журн.* 2007. Т. 29. № 1. С. 3—21.
- Стрыгин А.И. Петрология и рудные формации докембрия Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1978. 257 с.
- Щербаков И.Б. Петрография докембрийских пород центральной части Украинского щита. Киев: Наук. думка, 1975. 278 с.
- Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. Львов: ЗУКЦ, 2005. 364 с.

Zones of decompaction of the Earth crust of the central part of the Ukrainian Shield (according to materials of petrophysical and seismogravitational modeling)

© V. A. Korchin, P. A. Burtnyy, V. P. Kobolev, 2016

P-wave velocity and density of rocks depend considerably on temperature and pressure whose influence must be taken into consideration in calculating these parameters at different depths. For the first time, this paper presents experimental data on a *P*-wave velocity and density change for different rock types versus a change of temperature and pressure with depth. Based on thermobaric, petrophysical and seismo-gravity modelling, a clarified cross-section of material composition has been obtained for the area in the central part of the Ukrainian Shield. Local domains of decreasing rock density have been revealed, which mostly coincide with the low velocity zone and are produced by deep thermobaric conditions. Such zones of decreasing in material density can be served as one of diagnostic indicators in searching for deposits of mineral resources.

Key words: pressure, temperature, petrophysics, substance, model, zone of decompaction.

References

- Burtnyy P. A., Korchin V. A., Karnaukhova E. E., 2013. Modeling material composition of the deep horizons of the Earth's crust (a new concept of interpretation of geophysical data). Saarbrücken: Lambert Akadem. Publ., 188 p. (in Russian).
- Geological map of the crystalline basement of the Ukrainian Shield. 1 : 500000. An explanatory note, 1983. Kiev, 101 p. (in Russian).
- State geological map of Ukraine. 1 : 200000. Central Ukrainian series. Leaf M-36-XXXII (Novoukrayinka), 2001. Kyiv, 119 p. (in Ukrainian).
- State geological map of Ukraine. 1 : 200000. Central Ukrainian series. Leaf M-36-XXXIII (Novoukrayinka), 2007. Kyiv, 102 p. (in Ukrainian).
- Ilichenko T. V., Kryuchenko V. A., 1981. Results of integrated interpretation of seismic and gravity data on the profile XXV Pyatikhatki—Babanka. *Geofizicheskiy zhurnal* 3(1), 94—104 (in Russian).
- Kalyayev G. I., Komarov O. M., 1972. Kirovograd block. In: *Tectonics Ukrainian Shield*. Kyiv: Naukova Dumka, 137—184 (in Ukrainian).
- The Kirovograd ore area. Deep structure. Tectonophysical analysis. Ore deposits, 2013. Eds V. I. Starostenko, O. B. Gintov. Kiev: Prastyi Ludy, 2013. 500 p.
- Koval' V. B., Valasis A. G., 1989. Problem of the anorthosite-rapakivi-granite association. *Geologicheskii zhurnal* (2), 48—54 (in Russian).
- Korchin V. A., 2014. Thermobaric modeling anomalies increased porosity in the rocks of the crust — the possible horizons of migration and localization of deep hydrocarbon. *Glubinnaya nef't* 2(9), 1434—1448 (in Russian).
- Korchin V. A., 2013a. Crustal low-velocity zone — promising horizons of localization of deep hydrocarbon. *Glubinnaya nef't* 1(8), 1099—1116 (in Russian).
- Korchin V. A., 2013b. Thermodynamics crustal zones of low seismic velocity (a new scientific hypothesis). Saarbrücken: Lambert Akadem. Publ., 280 p. (in Russian).
- Korchin V. A., Burtnyy P. A., Karnaukhova E. E., 2014. Thermodynamic violation linear relationship "speed-density" of rocks in the Earth's crust: *Proceedings of the XIV International Conference "Physical-chemical and petrophysical studies in Earth Sciences"*. Moscow: IGEM RAS, 107—110 (in Russian).
- Korchin V. A., Burtnyy P. A., Karnaukhova O. E., 2014. Features thermobaric gravity-seismic petrophysical modeling of deep horizons of the lithosphere. Seismological and geophysical studies in seismically active areas: *Proceedings of the seminar, dedicated to the memory T.Z. Verbitskiy and Yu.T. Verbitskiy*.

- bitskiy*, 3—5 June 2014. Lviv: Spolom, 99—103 (in Ukrainian).
- Korchin V.A., Burtnyy P.A., Kobolev V.P.*, 2013. Thermobaric petrophysical modeling in geophysics. Kiev: Naukova Dumka, 312 p. (in Russian).
- Krasovskiy S.S.*, 1981. Reflection of the dynamics of the crust of the continental type in the gravitational field. Kiev: Naukova Dumka, 264 p. (in Russian).
- The lithosphere of central and eastern Europe. Geotraverses IV, VI, VIII, 1988. Ed. A.V. Chekunov. Kiev: Naukova Dumka, 171 p. (in Russian).
- Lukin A.E.*, 2014. Hydrocarbon potential of the great depths and perspectives of its development in Ukraine. *Geofizicheskij zhurnal* 36(4), 3—23 (in Russian).
- Lutts B.G.*, 1974. Petrology deep zones of the continental crust and upper mantle. Moscow: Nauka, 304 p. (in Russian).
- Seismogravitational modeling in the study of the lithosphere, 1994. Eds. V.I. Starostenko, Ya. Shvantzar. Kiev: Naukova Dumka, 292 p. (in Russian).
- Starostenko V.I., Kazanskiy V.I., Drogitskaya G.M., Makivchuk O.F., Popov N.I., Tarasov N.N., Tripol'skiy A.A., Sharov N.V.*, 2007. Contact surface structures Kirovograd ore district (Ukrainian Shield) with local heterogeneities of the crust and the Moho topography. *Geofizicheskij zhurnal* 29(1), 3—21 (in Russian).
- Strygin A.I.*, 1978. Petrology and ore formations of the Precambrian Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka, 257 p. (in Russian).
- Shcherbakov I.B.*, 1975. Petrography of the Precambrian rocks of the central part of the Ukrainian Shield. Kiev: Naukova Dumka, 278 p. (in Russian).
- Shcherbakov I.B.*, 2005. Petrology of the Ukrainian Shield. Lviv: ZUKTS, 364 p. (in Russian).