

**ПОВЫШЕНИЕ ДОСТОВЕРНОСТИ
ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЧАСТИ УКРАИНСКОГО ЩИТА
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСИРОВАНИЯ
СЕЙСМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ГСЗ И МОВЗ**

Введение. В центральной части Украинского щита (УЩ) расположен крупный многофазный плутон, состоящий из двух гранитоидных массивов – Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского, протянувшихся с севера на юг почти на 150 км. Несмотря на пространственную сопряженность, указанные массивы отличаются по составу слагающих их пород, условиям их залегания и образования, хотя и близки по возрасту.

Вместе с тем, в их формировании отмечается генетическое сходство, выразившееся в наличие пород двух формаций – основной и кислой, а также в субщелочном характере пород, проявившемся в обогащенности калием даже наиболее основных их разновидностей.

Оба массива детально изучены с использованием различных модификаций сейсмического метода: глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), метода обменных волн землетрясений (МОВЗ), а в северной части Новоукраинского массива и на западе Корсунь-Новомиргородского плутона проведены площадные исследования методом отраженных волн (МОВ) и общей глубинной точки (ОГТ) [1–9] (рис. 1).

Использование многоволновой сейсмоки позволило значительно расширить возможности сейсмического метода и получить наиболее полное представление о геологической модели района исследований.

Основные результаты применения метода ГСЗ. Благодаря применению метода ГСЗ удалось изучить морфологию поверхности Мохо (M). Надежная идентификация преломленных и отраженных волн от подошвы коры позволила с достаточно высокой точностью определить мощность коры, служащую одним из основных критериев глубинного тектонического районирования, а выделение отражающих границ и их фрагментов в коре – изучить ее тонкослоистую структуру. Кроме того, построение разрезов $V(x, z)$ позволило установить определенные закономерности в распределении скоростных параметров во всей толще коры, как по глубине, так и по латерали, без знания которых невозможно решение проблемы ее вещественного состава.

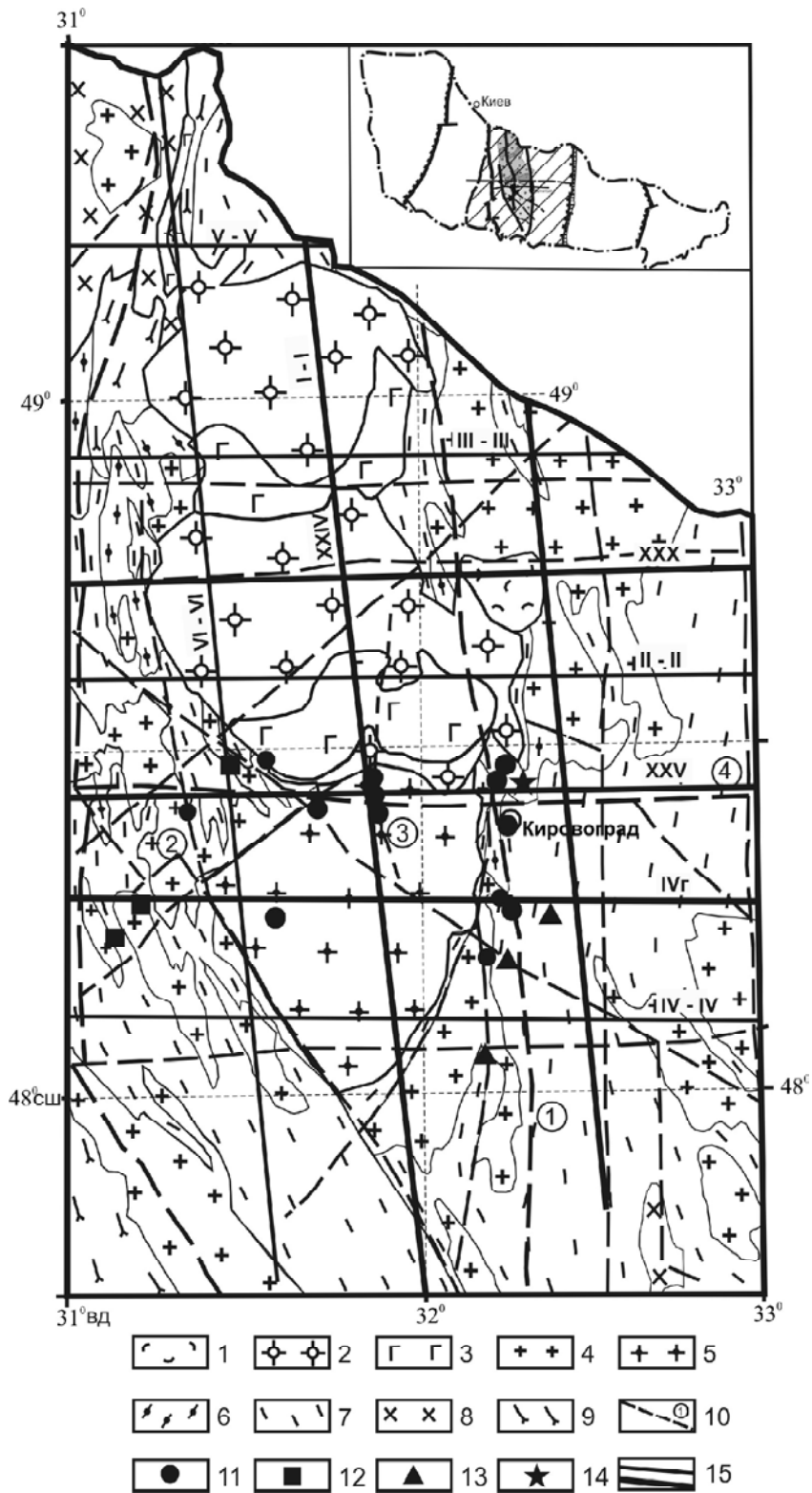


Рис. 1. Геологоструктурная карта центральной части Украинского щита. 1 – Болтышская астроблема (MZ); 2–3 – породы Корсунь-Новомиргородского плутона (PR₁): граниты рапакиви (2), габбро, габбро-анортозиты (3); 4–5 – граниты Новоукраинского массива (PR₁): кировоградские (4), новоукраинские (5); 6 – мигматиты; 7 – гнейсы ингуло-ингулецкой серии (PR₁); 8 – граниты подольского комплекса (AR); 9 – гнейсы днестрово-бугской серии (AR); 10 – разрывные нарушения: цифры в кружках – Кировоградский разлом (1), Звенигородско-Анновский (2), Новоконстантиновский (3), Субботско-Мошоринский (4); 11–14 – месторождения и рудопроявления: урана (11), лития (12), золота (13), кимберлиты (14); 15 – сейсмические профили и их номера

Единственная достаточно выдержанная сейсмическая отражающая граница в разрезе коры, зафиксированная по данным ГСЗ – поверхность K_2 на глубине 10–17 км, природа которой остается дискуссионной. Кроме нее в толще коры выявлены лишь многочисленные непротяженные элементы, отражения от которых прослежены как в докритической, так и в закритической областях регистрации. Последние формируют так называемое “штриховое” поле, статистический анализ которого позволил изучить расслоенность коры и выделить области относительно повышенной и пониженной отражательной способности.

По геологическим данным, в разрезе коры изучаемых массивов присутствуют тела основных пород, интерес представляет восстановление их конфигурации на глубине. Граница между основными породами и вмещающими их гранитоидами не является акустически жестким контактом, где изменение скорости происходит скачкообразно, а представляет собой сложную переходную зону (часто через породы промежуточного состава, например монцониты [10]). В связи с этим возможности широкоугольного низкочастотного метода ГСЗ и высокочастотного метода ОГТ, использующего вертикальные лучи, ограничены. Лишь комплексирование с гравитационными данными позволяет оконтурить эти тела в разрезе. Установлено, что их мощность составляет первые километры, увеличиваясь до 5–6 км лишь в районах краевых разрывных нарушений.

Неглубокое распространение габбро, габбро-норитов и анортозитов подтверждено и результатами трехмерного гравитационного моделирования, где показано, что высокая плотность, характерная для пород основного состава, на глубине 5 км нивелируется, совпадая с плотностью вмещающих пород [11].

Что касается установления максимальной глубины распространения гранитоидных пород, то по сейсмическим данным это также вызывает определенные трудности.

Используя скоростные разрезы, построенные по результатам применения рефрагированных и отраженных волн, достаточно условно кору можно разделить на слои, не имеющие сейсмических границ: гранитный ($V \leq 6,3$ км/с); диоритовый или промежуточный ($6,3 > V \leq 6,8$ км/с) и базальтовый ($V > 6,8$ км/с).

Руководствуясь этим критерием, можно говорить о том, что мощность гранитов-рапакиви в пределах Корсунь-Новомиргородского плутона составляет 10–12 км, а новоукраинских трахитоидных гранитов в пределах Новоукраинского массива – до 17 км. Это коррелирует с положением внутрикоровой отражающей поверхности K_2 .

Как следует из анализа горизонтальных скоростных срезов, построенных для центральной части Ингульского мегаблока ($H = 5 \div 40$ км) с сечени-

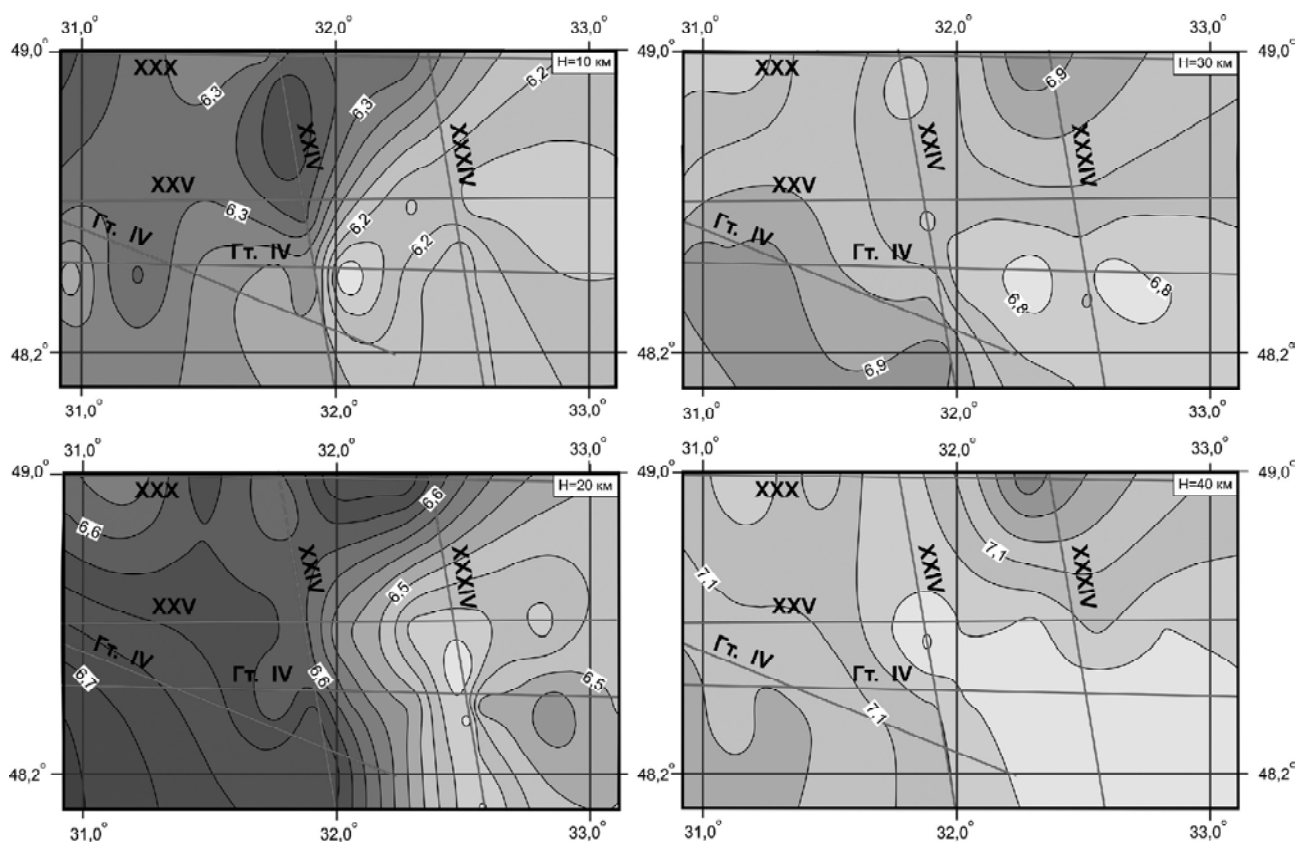


Рис. 2. Распределение скоростей продольных волн на глубинных срезах ($H = 10\div 40$ км) в центральной части Ингульского мегаблока УЩ

ем изолиний $0,05$ км/с, значения скорости меняются не только по глубине, но и по площади. Трансрегиональный тектонический шов Херсон-Смоленск, пересекающий гранитные массивы с севера на юг, делит его на две области пониженных (восточная часть) и повышенных (западная часть) значений скорости. С глубиной размеры областей несколько изменяются, но отмеченная закономерность сохраняется. Разность в скоростях между областями достигает $0,1\text{--}0,2$ км/с. Учитывая слабую скоростную дифференциацию консолидированной коры щита, такие изменения можно считать весьма существенными [12] (рис. 2).

Максимальных значений различия в скоростях достигают на глубине $15\text{--}20$ км, что соответствует положению поверхности K_2 , глубже величина превышения постепенно снижается, различия нивелируются, при этом величина скорости остается более низкой по сравнению с соседними блоками.

По данным о глубине залегания поверхностей K_2 и M , полученным по профилям ГСЗ, построены схемы с сечением изолиний соответственно 1 и $2,5$ км, которые оправданы достаточно густой сетью профилей. Поведение изолиний поверхности M отображает в первую очередь тектонику раннепротерозойского плана. По поверхности M рельефно выделяются субмеридиональные структуры в виде зон с утолщенной (до 55 км) корой (рис. 3). Ингульский мегаблок ограничен двумя такими областями с востока – Ингуль-

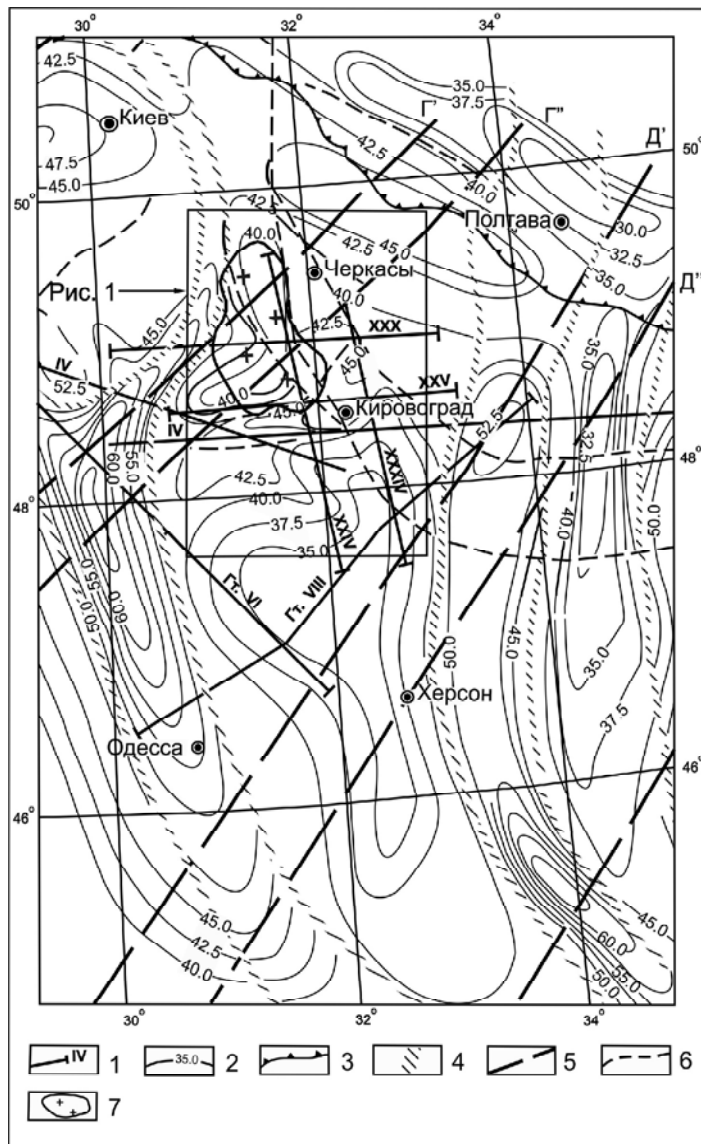


Рис. 3. Фрагмент структурной схемы раздела Мохо в пределах Украины, составленной Соллогубом В.Б.[1], с изменениями. 1 – сейсмические профили и их номера; 2 – изогипсы поверхности M , км; 3 – граница Днепровско-Донецкого палеорифта; 4 – глубинные разломы, разделяющие протогеосинклинальные и протоплатформенные зоны (по В.Б. Соллогубу); 5 – зоны мантийных разломов (литосферные линеаменты по В.Б. Соллогубу и А.В. Чекунову); 6 – глубинные разломы; 7 – контур Корсунь-Новомиргородского массива

ско-Криворожской, где поверхность M погружается до глубины 55–60 км, а с запада – Голованевской шовной зоной с мощностью коры до 60–62,5 км [1].

Сам Ингульский мегаблок по характеру конфигурации изолиний глубины до поверхности M условно можно разделить на три крупных участка. Северный, соответствующий Корсунь-Новомиргородскому плутону, где мощность коры сокращена до 40 км и южный, соответствующий Новоукраинскому массиву трахитоидных гранитов глубиной до подошвы коры 35 км, а также разделяющий их опущенный на 5–7 км блок субширотного простирания шириной 30–40 км. [1].

На субмеридиональном профиле XXIV (рис. 1), последовательно пересекающем с севера на юг Корсунь-Новомиргородский плутон и Новоукраинский массив, опущенный блок установлен по вертикальному смещению вдоль разломов поверхности K_2 (на 7 км) и M (на 4–6 км). Он имеет вид воронки, которая сужается с глубиной, его ширина в районе поверхности M составляет всего 20 км.

На субширотном профиле XXV, который проходит вдоль Субботско-Мошоринской тектонической зоны, поверхность M характеризуется преимущественно горизонтальным залеганием на глубине 40–43 км без значительных вертикальных смещений. Кировоградский глубинный разлом фиксируется в восточной части профиля как незначительное нарушение с вертикальной амплитудой около 2 км, где опущено восточное крыло. Звенигородско-Анновская разломная зона установлена по точкам дифракции, резкому изгибу изолиний скорости, разрыву опорных отражающих границ без вертикального смещения. В центральной части профиля зафиксировано Новокопчанское нарушение с пологим восточным углом падения 45–55°, оно прослежено и по данным магниторазведки в виде линейных аномалий. Вдоль зон всех трех разломов развиты тела натриевых метасоматитов и залежи урановых руд.

На IV геотраверсе, проходящем на 22 км южнее, поверхность M прослежена на глубине 44–46 км, а в районе Кировоградского разлома ступеннеобразно смещена по вертикали на 6–9 км, при этом восточное крыло оказывается уже приподнятым. Зона разлома детально изучена на разной глубине докритическими и закритическими отражениями, на небольшом участке поверхность M построена по субвертикальным отражениям, что является уникальным для докембрийских щитов при исследованиях ГСЗ. Это может быть объяснено либо тонкослоистым строением зоны перехода корамантия, когда отражения от различных слоев суммируются в фазе, либо в нижней части коры залегают породы с пониженными значениями скорости (возможно ниже 7 км/с) в результате чего возрастает коэффициент отражения [6, 7].

Таким образом, в пределах центрального участка поверхность M характеризуется сложным и пересеченным рельефом. При расстоянии между профилями всего 22–45 км ее глубина и элементы залегания сильно изменяются от разреза к разрезу.

На всей площади Ингульского мегаблока наблюдается постоянная мощность слоя, заключенного между горизонтом K_2 и поверхностью M , равная 28 км. Эта величина сохраняется и на опущенном участке Субботско-Мошоринской зоны, где наблюдается синхронное опускание по разломам обоих опорных границ.

Рассмотренные характеристики опущенного блока свидетельствуют о том, что здесь фиксируется ряд аномалий глубинного строения земной коры. К ним относятся пересеченный рельеф поверхности M и зона аномальных отражательных свойств этой поверхности. Кроме того, здесь отмечены и геофизические аномалии. Блок характеризуется повышенными значениями теплового потока – до 50–60 мВт/м² и более при среднем тепловом потоке УЩ 44–45 мВт/м². С аномалией теплового потока пространственно почти полностью совпадает региональная аномалия электропроводности.

Основные результаты применения МОВЗ – получение такой достаточно объективной характеристики земной коры как распределение точек обмена, отражающее различную ее расслоенность.

Работы МОВЗ в районе Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского массивов были выполнены в 1977–1980 гг., регистрация обменных волн PS осуществлялась станциями типа “Земля”, расстояние между пунктами приема составляло 3–4 км. Полевые наблюдения и интерпретация материалов проводилась по стандартной методике [9].

Метод основан на регистрации и последующей интерпретации волн PS , которые, распространяясь первоначально как продольные (P), при прохождении через анизотропную среду становятся поперечными (S). Для построения границ обмена используется разность времени прихода обменных и образующих их продольных волн. Метод позволяет изучать глубинное строение земной коры и верхней мантии от 0,8–1,0 до 100–150 км, выделять вертикальные, горизонтальные и наклонные границы и неоднородности в литосфере [8].

На разрезах МОВЗ хорошо выделяются вертикальные блоки пониженных и повышенных значений интенсивности обменных волн и слои с переменными значениями обменоспособности. Указанные обстоятельства позволяют сделать вывод о большей стабильности земной коры по вертикали и значительной изменчивости физических свойств по латерали [8, 9].

С целью повышения достоверности выделения и идентификации основных сейсмических горизонтов – внутрикоревой границы K_2 и подошвы земной коры поверхности M – и детального изучения расслоенности литосферы, была выполнена статистическая обработка исходного поля обменов с применением различных видов преобразований в окнах радиусом 3, 5 и 10 км [13].

Размеры окон определяли исходя из точности наблюдений (длины сейсмических волн), расстояния между станциями и характера исходного поля обменов. Для каждого окна были построены гистограммы, из которых видно, что оптимальным является преобразование в окне размером 3 км.

Кроме параметра плотности расположения точек (обменонасыщенности), в тех же окнах определялась обменоспособность среды, отношение амплитуды обменной волны к проходящей A_{PS}/A_P . Данный параметр не зависит от времени наблюдения, расстояния между станциями, а служит объективной характеристикой свойств границ и поверхностей обмена. Как показали исследования в районе Кольской сверхглубокой скважины СГ-3, обменные волны значительной интенсивности образуются, как правило, на “нежестких” контактах, динамика PS волн в значительной степени зависит не только от таких параметров среды как трещиноватость, перепад скорости, мощность границы, но и от напряженно-деформированного состояния земной коры на участках исследования [9].

В процессе обработки определены субгоризонтальные и субвертикальные зоны экстремумов обменоспособности среды. Максимумы совпадают на разрезах с основными отражающими горизонтами в коре – внутрикоровой границей K_2 и поверхностью M , а минимумы соответствуют вертикальным региональным разрывным нарушениям.

По всем вычисленным параметрам было выполнено сопоставление Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского гранитных массивов на разных уровнях, а также анализ анизотропии среды с использованием данных по широтным и меридиональным профилям.

В результате трансформации исходного поля обменов выделен целый ряд областей повышенной отражательной способности, часть из которых совпадает с отражающими поверхностями, установленными по данным ГСЗ. На глубине 4–5 км фрагментарно прослежен горизонт, соответствующий, по-видимому, контакту пород кислого и основного состава.

При сопоставлении материалов МОВЗ и ГСЗ установлено, что раздел M , выделенный по ГСЗ, совпадает с участками максимальной концентрации обменов в пределах аномальной зоны на глубине 38–43 км. Наиболее отчетливо она выражена в нижней части коры, ниже которой отмечается общее уменьшение расслоенности среды и не наблюдается столь интенсивных и протяженных горизонтов генерации обменных волн.

Установленная по ГСЗ поверхность K_2 в поле обменов в районе Корсунь-Новомиргородского плутона приурочена к подошве второй от поверхности фундамента аномальной зоне обменов на глубине 9–11 км, разграничивающей заметно различающиеся своим строением толщи: верхнюю, обладающую высокой способностью к генерации обменных волн, и нижнюю, характеризующуюся пониженной способностью к их образованию. В пределах Новоукраинского массива и его южного обрамления количество обменов в верхней части разреза резко падает, две верхние аномальные зоны полностью исчезают, а вместо них на глубине 13–14 км выделяется новый

слой повышенного образования обменов, с максимальной плотностью, который совпадает с поверхностью K_2 , прослеженной по данным ГСЗ.

Максимальные значения обменоспособности литосферы исследуемого района приурочены к центральной части Корсунь-Новомиргородского плутона, где расположен узел пересечения крупных разломов мантийного заложения: трансрегионального шва Херсон-Смоленск, широтного Смелянского разлома и литосферного линейамента "Г" северо-восточного простирания, выделенного В.Б. Соллогубом, который разделяет блоки с разной мощностью литосферы (рис. 4).

Наряду с областями повышенной генерации обменных волн выделяют блоки и области почти полного их отсутствия, соответствующие крупным

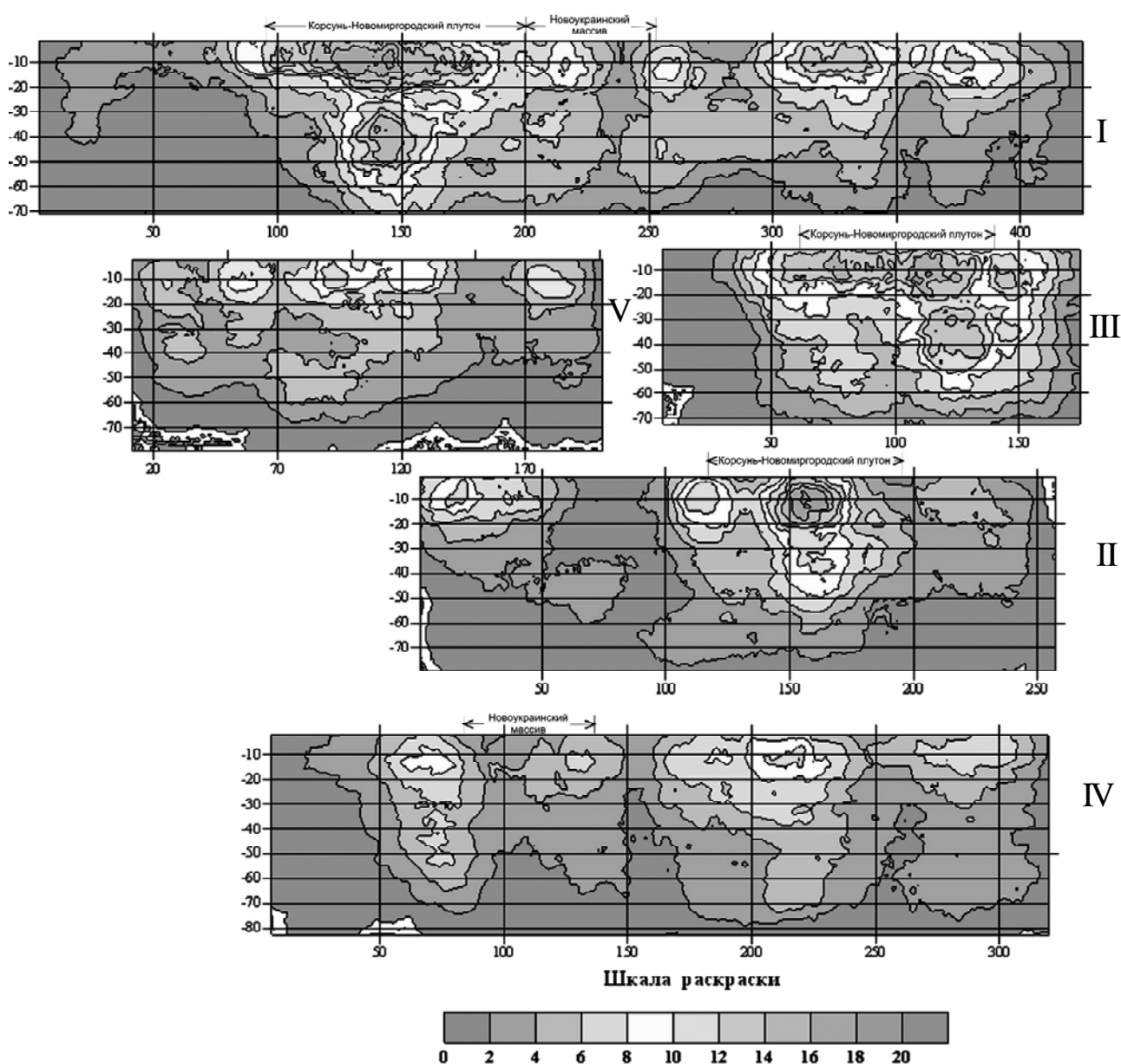


Рис. 4. Результаты статистической обработки материалов МОВЗ по профилям I; II; III; IV; V. Обменоспособность среды A_{ps}/A_p , осреднение с $R = 10$ км; КНП – Корсунь-Новомиргородский плутон; НУМ – Новоукраинский массив

краевым разломным зонам, разделяющим литосферу на блоки с разным характером расслоенности.

Следует отметить, что различия в структуре коры изучаемых гранитных массивов (плотность распределения точек обмена, обменоспособность, связанная с этим расслоенность среды), так же как и особенности скоростного распределения по данным ГСЗ, касаются в основном первых 10–17 км, до поверхности K_2 . С глубиной они нивелируются, это свидетельствует о сходной истории формирования Корсунь-Новомиргородского плутона гранитов рапакиви и Новоукраинского массива трахитоидных гранитов, а также приуроченности их к единой крупной геотектонической единице, что подтверждается и результатами объемного плотностного моделирования коры и верхней мантии.

Заключение. Таким образом, каждый из отработанных методов имеет как свои преимущества, так и недостатки, основанные на природе, физических характеристиках используемых типов волн.

ГСЗ оперирует, главным образом, преломленными и закритически отраженными волнами. Одно из его главных преимуществ – возможность восстановления не только протяженных, ярко выраженных преломляющих границ, но и неоднородностей с плавными изменениями скоростных параметров.

МОВЗ регистрирует обменные волны и позволяет восстановить характеристики обменоспособности среды – свойства среды конвертировать продольные волны в поперечные. Данный параметр практически не изучается в ГСЗ и представляет собой дополнительную информацию для геологических и геодинамических построений.

Как видно из данного обзора, вышеперечисленные методы не противоречат, а удачно дополняют друг друга. Идея совместной интерпретации их результатов состоит в том, что недостатки одного метода могут быть частично устранены за счет преимуществ другого, что в конечном итоге позволяет получить более достоверную геологическую модель исследуемого региона.

1. Соллогуб В.Б. Литосфера Украины. – К.: Наук. думка, 1986. – 184 с.
2. Ильченко Т.В., Крюченко В.А. Результаты комплексной интерпретации сейсмических и гравиметрических данных по профилю ГСЗ XXV Бабанки – Пятихатки // Геофиз. журн. – 1981. – 3, № 1. – С. 94–105.
3. Крюченко В.А., Половинкин Б.В., Трипольский А.А. Глубинное строение земной коры центральной части Украинского щита по профилю ГСЗ Николаев – Канев // Геофиз. журн. – 1981. – 3, № 2. – С. 82–89.
4. Крюченко В.А., Половинкин Б.В., Шевченко В.И. Некоторые особенности строения глубинных горизонтов земной коры центральной части Украинского щита // Геол. журн. – 1985. – 5, № 2. – С. 100–107.

5. Трипольский А.А., Шаров Н.В. Литосфера докембрийских щитов северного полушария Земли по сейсмическим данным. – Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2004. – 159 с.
6. Старостенко В.И., Казанский В.И., Дрогицкая Г.М. и др. Связь поверхностных структур Кировоградского рудного района (Украинский щит) с локальными неоднородностями коры и рельефом раздела Мохо // Геофиз. журн. – 2007. – **29**, № 1. – С. 3–21.
7. Дрогицкая Г.М., Трипольский А.А., Попов Н.И. и др. Сейсмогеологическая позиция Кировоградского рудного района в связи с локальными неоднородностями поверхности Мохо // Геофизика XXI столетия: 2006 год. Сборник трудов Восьмых геофизических чтений имени В.В. Федынского. Москва – Тверь: ГЕОС, 2007. – С. 21–27.
8. Крюченко В.А. Сопоставление результатов статистической обработки материалов МОВЗ и ГСЗ по профилю Канев – Николаев // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 3–15.
9. Крюченко В.А., Исанина Э.В. Опыт комплексной интерпретации материалов МОВЗ и гравиметрии в центральной части Украинского щита // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. – К.: Наук. думка, 1984. – С. 16–26.
10. Щербаков И.Б. Петрология Украинского щита. – Львов: ЗУКЦ, 2005. – 364 с.
11. Куприенко П.Я., Макаренко И.Б., Старостенко В.И., Легостаева О.В. Трехмерная плотностная модель земной коры и верхней мантии Ингульского мегаблока Украинского щита // Геофиз. журн. – 2007. – **29**, № 2. – С. 17–41.
12. Старостенко В.И., Пашкевич И.К., Кутас Р.И. Глубинное строение Украинского щита // Геофиз. журн. – 2002. – **24**, № 6. – С. 36–48.
13. Дрогицкая Г.М., Заяц В.Б., Исанина Э.В. Результаты статистической обработки материалов МОВЗ по Кировоградскому рудному району (Украинский щит) // Материалы науч.-практ. конф. “Современные геофизические технологии”, посвященная 90-летию образования Горной Академии – МГРИ-РГГРУ, 26–27 июня 2008 г., Москва, 2008. – С. 27.