

УДК 550.834

Г.М. Дрогицкая

*Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины,
г. Киев*

ПОСТРОЕНИЕ 3D СЕЙСМОГЕОЛОГИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ КИРОВОГРАДСКОГО РУДНОГО РАЙОНА (УКРАИНСКИЙ ШИТ) ПО ДАННЫМ ОБМЕННЫХ ВОЛН ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

На основе статистического анализа обменных волн землетрясений (МОВЗ) в статье рассмотрено глубинное строение Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского гранитоидных массивов, определяющих архитектуру Кировоградского рудного района. Сделан вывод, что массивы отличаются не только по составу, генезису, характеру контактов с породами рамы, но и по вертикальной протяженности. Одним из доказательств, служит обнаружение аномалий обменных волн на границе кора–мантия под Корсунь-Новомиргородским рапакиви-анортозитовым массивом при отсутствии таковой под Новоукраинским гранитоидным массивом, что косвенно подтверждает мантийное происхождение первого и коровое – второго массивов.

Ключевые слова: метод обменных волн землетрясений (МОВЗ), гранитоидные массивы, кора, мантия.

Введение. Консолидированная кора представляет собой гетерогенную среду со сложным распределением неоднородностей, слабо дифференцированных по скоростным параметрам. Литологические контакты внутри коры, как правило, не являются акустически жесткими, а представляют собой сложные переходные зоны.

Опыт использования метода обменных волн землетрясений (МОВЗ) для изучения литосферы показывает, что обменные волны значительной интенсивности, как правило, образуются на “нежестких” контактах. Динамика *PS* волн в значительной степени зависит от таких параметров среды, как трещиноватость, расслоенность, мощность границы, а также от напряженно-деформированного состояния земной коры на участках исследования [1].

Поэтому для решения задачи изучения внутренней структуры больших блоков коры обменные волны могут быть более информативными, чем рефрагированные или отраженные, используемые в методе ГСЗ.

Метод МОВЗ основан на регистрації і послідуєчій інтерпретації волн PS , которые образуются при прохождении продольных волн (P) от далеких и близких землетрясений через анизотропную кору, трансформируясь при этом в поперечные волны (S).

Волны PS , образовавшиеся в коре под пунктом приема, регистрируются на сейсмических записях вслед за продольными волнами (P) в интервале времен до 10–12 с и несут информацию о дифференциации коры по физическим параметрам непосредственно под пунктом приема. Очаговые S - и SP -волны характеризуются более низким частотным диапазоном и приходят с большим временным запаздыванием, т. е. в интервале до 10–12 с, кроме волн PS других поперечных волн нет.

Для построения поля обменов используется разность времен прихода обменных и образующих их продольных волн [2].

Сейсмические исследования МОВЗ в Кировоградском рудном районе. Сейсмические исследования методом обменных волн землетрясений в районе Кировоградского полиметального рудного района проводились с 1977 по 1980 г. (рис. 1). Регистрация продольных и обменных волн осуществлялась трехкомпонентными сейсмостанциями типа “Земля” в полосе частот 0,7–12 Гц, со средним расстоянием между пунктами наблюдения 3–4 км. Полевые наблюдения и интерпретация материалов проводились по стандартной методике [3].

Это был первый опыт использования обменных волн для изучения глубинного строения консолидированной коры. Исследования выполнялись параллельно с работами ГСЗ, что позволяло регистрировать продольные P - и обменные PS -волны от взрывов и землетрясений.

Очаги зарегистрированных землетрясений располагались в основном в пределах Тихоокеанского, Средиземноморского, Атлантического и Памиро-Алтайского сейсмических поясов. Эпицентральные расстояния варьировались от 5° (Румыния) до 150° .

Поскольку количество станций было ограничено, профили отрабатывались в несколько этапов (стоянок). Длительность стоянки (одновременно работающих станций) составляла 15–27 дней. Стоянка считалась отработанной, если было зарегистрировано не менее 8–10 информативных землетрясений с продольной волной, имеющей запись четких вступлений. Оптимальная продолжительность стоянки определялась необходимой точностью задаваемых исследований и степенью сложности строения коры.

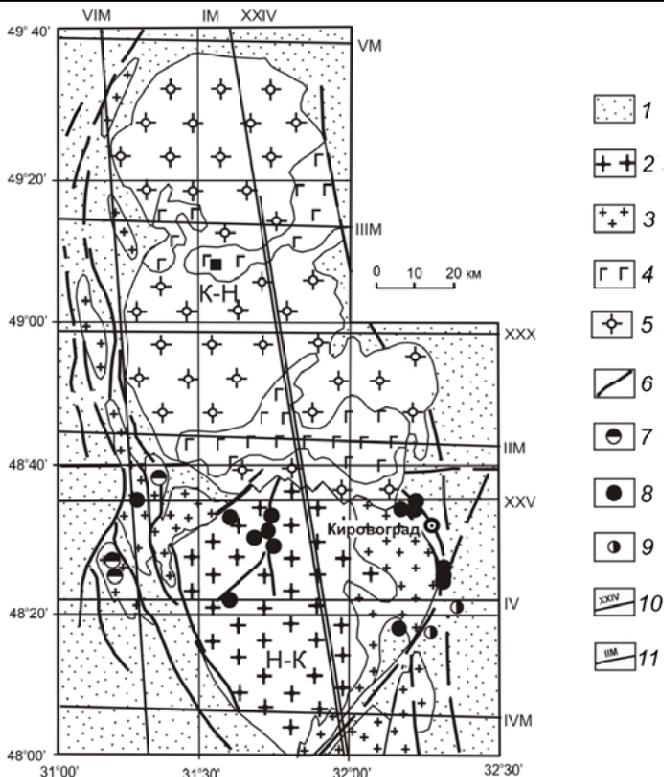


Рис. 1. Сейсмическая изученность Кировоградского рудного района: 1 – ингуло-ингулецкая серия; 2 – диорит-монзониты; 3 – гранит-мигматиты; 4 – габбро-анортозиты; 5 – граниты рапакиви; 6 – разломы; 7–9 – месторождения литий (7), уран (8), золото (9); 10 – профиль ГСЗ и его номер; 11 – профиль МОВЗ и его номер; Н-К – Новоукраинско-Кировоградский массив; К-Н – Корсунь-Новомиргородский массив

Таким образом, исходное поле обменов на каждом из профилей представляет собой реализацию случайного процесса, который зависит от расстояния между станциями, длительности и времени проведения эксперимента. Поэтому к ним применимы все процедуры статистической обработки.

Кроме информации о плотности распределения точек обмена вдоль профиля были собраны данные о кратности обменов в одной точке, она колебалась от 3 до 5 и выше, а также зафиксирован динамический параметр отношения амплитуды обменной волны к амплитуде продольной волны от одного и того же землетрясения A_{PS}/A_P в процентах.

Обменные волны, имеющие отклонение азимута подхода от прямой продольной волны $\pm 20^\circ$ и более, рассматривались как боковые и особым образом отмечались на разрезе. Это касалось и волн с обращением фазы на 180° (инверсными фазами).

Всего с 1977 по 1980 г. было отработано 8 профилей: 2 меридиональных, 4 широтных и 2 диагональных, проинтерпретированы материалы по 33 стоянкам, к обработке было принято 461 землетрясение.

Таким образом, накоплен значительный объем фактического материала, но его геологическое истолкование и увязка с результатами ГСЗ вызывали трудности. Объяснялось это недостаточной разработкой физических основ самого метода, сложностью расшифровки природы обменных волн, слабой обоснованностью динамических и кинематических критериев выделения, корреляции и идентификации волн *PS*. Отсутствовал опыт проведения МОВЗ в условиях Украинского щита и интерпретации его данных.

С целью выявления возможных характерных особенностей поведения обменов по разрезу, недостаточно четко проявленных в поле обменов исходные данные были просуммированы в узлах преобразующей сети. Выбор оптимальных параметров трансформации – типа и размера палетки – имел существенное значение. С учетом поставленной задачи обнаружение среди многочисленных обменов аналогов поверхностей M и K_2 , имеющих отчетливо выраженную субгоризонтальную ориентировку, преобразование исходного поля обменов носило не изотропный характер с применением круговой или квадратной палетки, а анизотропный [3, 4]. Осреднение выполнялось вручную со сдвигом в пол окна, что снижало точность и достоверность получаемых результатов.

Методика и результаты статистической обработки данных обменных волн землетрясений. Ниже приведены результаты статистического анализа исходного поля обменов по меридиональным и широтным профилям с использованием программных пакетов “КОСКАД-3D” и Surfer 8 [5], выполненного в 2009–2011 гг.

Проанализированы три параметра. Кроме плотности распределения точек обмена по разрезу были привлечены еще два: отношение амплитуды обменной волны к амплитуде образовавшей ее продольной A_{PS}/A_P и кратность обменов в одной и той же точке.

В наблюдаемом поле фиксируется значительное количество обменов, произошедших вне плоскости профиля (так называемые боковые

обмены). Их следует рассматривать как проекции истинных точек обмена на плоскость профиля. При расчетах всех трех параметров они были исключены из исходных данных.

Поскольку все программные пакеты обработки используют равномерную сеть, а наблюдаемое поле характеризуется значительным разбросом параметров, данные были интерполированы в плоскости каждого разреза по сетке 1×1 км. Выбор размера интерполяционного окна был продиктован расстоянием между сейсмостанциями (3–4 км) и длинами продольных и обменных волн (500–1000 м), регистрируемых в эксперименте.

Интерполяция осуществлялась методом Крайгинга, суть которого заключается в весовом осреднении поля в интерполируемых точках. Перед процедурой интерполяции на основе пространственно-статистического анализа всего массива данных по разрезу строились вариограммы, из которых выбирались весовые коэффициенты.

Для анализа взаимной корреляции выбранных параметров: плотности распределения точек по разрезу, кратности обменов в одной точке и отношения амплитуды обменной волны к амплитуде проходящей, все профили были объединены по соответствующим признакам и вычислены коэффициенты линейной корреляции между парами признаков (табл. 1).

Из данных табл. 1 можно сделать вывод о высокой коррелируемости всех трех признаков (коэффициент взаимной корреляции 0,94–0,98), при этом статистическая точность их определения около 10 % (среднеквадратичное отклонение 0,09–0,11).

Таблица 1

Параметр	Признаки		
	1–2	1–3	2–3
Количество точек	21900	21900	21900
Среднее значение коэффициента корреляции	0,936	0,945	0,980
Средне квадратичное отклонение	0,117	0,113	0,093
Коэффициент вариации	0,01	0,01	0,01
Коэффициент асимметрии	–5,45	–6,07	–8,13
Коэффициент эксцесса	38,4	45,7	46,9
Минимальное значение	0	0	0
Медиана	0,972	0,978	1
Максимальное значение	1	1	1

Коэффициенты асимметрии и эксцесса указывают на несоответствие распределения нормальному закону – заостренная вершина и левосторонний скос (растянутость) кривой распределения. Несмотря на это, вывод о высокой коррелируемости признаков следует считать надежным – об этом свидетельствуют очень малые различия между средними и медианными значениями. Последние три значения: минимальное, максимальное и медиана, фиксируют пределы изменения частных определений коэффициента корреляции от 0 до 1 (отрицательных связей нет). Все три параметра характеризуют один и тот же физический признак – степень гетерогенности или расслоенность среды.

В дальнейшем при характеристике разрезов МОВЗ приоритет был отдан параметру A_{PS}/A_P , отражающему обменоспособность среды, поскольку он менее других зависит от условий проведения эксперимента: времени наблюдения, расстояния между станциями, и является объективной характеристикой границ и поверхностей обмена.

Кратность учитывалась путем повторения данных соответствующее количество раз, а плотность распределения точек присутствовала виртуально, поскольку отсутствие точки автоматически подразумевало и отсутствие параметра A_{PS}/A_P .

Данные табл. 2 характеризуют свойства распределения выбранного параметра (A_{PS}/A_P) в каждом из профилей: количество интерполированных точек; среднее значение параметра по профилю; его среднее квадратичное колебание в пространстве профиля; пределы изменения (минимальное – максимальное) и значение центра распределения. Все – в рабочей шкале значений параметра.

Существенная неравномерность распределения исследуемого параметра, слабое заполнение данными, связанное с коротким периодом проведения эксперимента, значительный разброс значений даже на неболь-

Таблица 2

Параметр	Профили					
	I	II	III	IV	V	VI
Количество точек	30383	26460	12337	20640	15552	21900
Среднее значение	33,7	36,7	34,3	31,6	36,7	35,8
Средне квадратичное отклонение	26,5	25,3	24,9	29,6	25,4	25,7
Минимальное значение	28,0	30,7	31,3	21,7	38,6	31,2
Медиана	68,2	69,6	66,8	70,1	69,7	69,2
Максимальное значение	100	100	100	100	100	100

шой площі профіля і більші розміри цільових об’єктів вимуждали оптимальним образом отфільтровать (осреднить) исходные данные, не допуская доминирования отдельных направлений. Соответственно, для фильтрации было выбрано круговое окно с радиусом, близким к среднему радиусу автокорреляции аномалий 11,5 км, вычисленному как средневзвешенное для всех разрезов.

Данные по всем восьми профілям были трансформированы по описанной выше методике и построены вероятностные разрезы, иллюстрирующие распределение параметра A_{ps}/A_p в изолиниях: C – среднее значение, для всех профілей было выбрано значение 22,3 %, значения ниже среднего следовало рассматривать как фоновые; $C + 1,3 \times S$ – верхний предел фона; $C + 2,5 \times S$ – нижний предел аномалии. Обработанные таким образом данные МОВЗ по каждому из профілей приведены в работе [6–8].

Представление об объемном распределении выделенных на отдельных профілях аномальных зонах дают составленные из нескольких профілей каркасные блок-схемы. Одна из них показана на рис. 2 – это пересечение двух меридиональных ІМ, VIМ и двух широтных III, IV профілей.

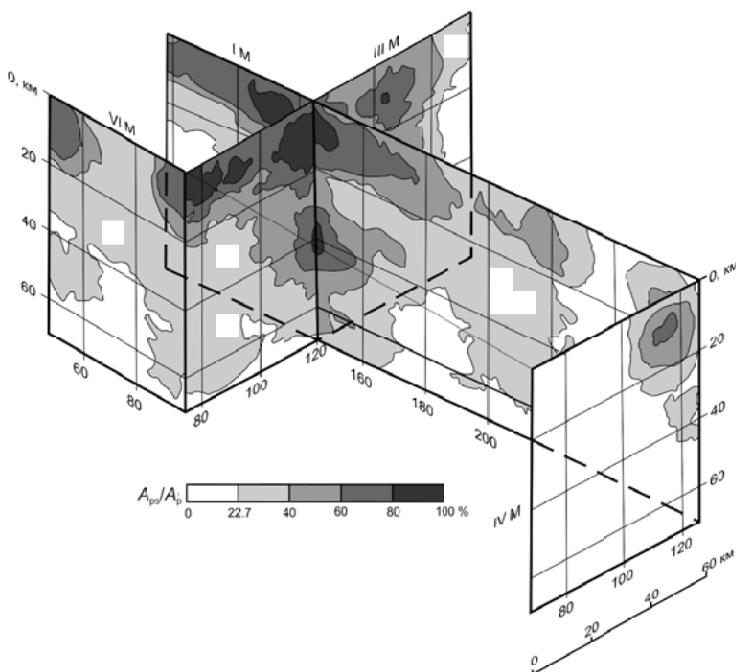


Рис. 2. Каркасная блок-диаграмма распределения параметра (A_{ps}/A_p)

Профиль ІМ проходит вдоль осевой части Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородского плутона и пересекает расположенный на глубине мантийный ров. Профиль ІІМ характеризует центральную часть Корсунь-Новомиргородского массива, профиль ІVМ – Новоукраинско-Кировоградский массив. Указанные профили были отработаны в разное время и отображают распределение обменных волн от различных землетрясений с разными эпицентрными расстояниями. В 2009–2010 гг. профили также обрабатывались по отдельности. И тем не менее, в местах пересечения профилей аномалии A_{PS}/A_P совпадают друг с другом. Наиболее убедительный пример – узел пересечения профилей ІМ и ІІМ, в котором между собой согласуются не только аномальные, но и все изолинии параметра A_{PS}/A_P . Эти факты свидетельствуют о высокой надежности изложенного выше способа анализа поля обменных волн землетрясений.

Каркасные блок-диаграммы обменных волн землетрясений были связующим звеном между поверхностными структурами Кировоградского рудного района, Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородским плутоном и мантийным рвом, над которым сосредоточены месторождения урана, лития и золота. В итоге именно согласованный анализ геологических данных и результатов работ методами ГСЗ и МОВЗ позволил построить сейсмогеологическую модель Кировоградского рудного района (рис. 3).

Модель характеризует современное глубинное строение Кировоградского рудного района на всю мощность древней континентальной земной коры, включая раздел кора–мантия. Модель отражает пространственную сопряженность корового Новоукраинско-Кировоградского и мантийного Корсунь-Новомиргородского рапакиви-анортозитового массива в виде единого плутона. Согласно модели, Новоукраинско-Корсунь-Новомиргородский плутон определяет архитектуру Кировоградского рудного района не только на поверхности, но и на глубине. Вместе с тем модель демонстрирует принципиальное различие указанных массивов по вертикальной протяженности, морфологии, распределению аномалий A_{PS}/A_P .

Корсунь-Новомиргородскому массиву в интервале глубин 0–20 км присуща крупная аномалия A_{PS}/A_P . Она протягивается в меридиональном направлении на 60–70 км, в широтном – на 40–50 км, выходя за пределы обнаженной части массива. В узле пересечения профилей ІМ и ІІМ аномалия достигает максимальной интенсивности – более 80 %.

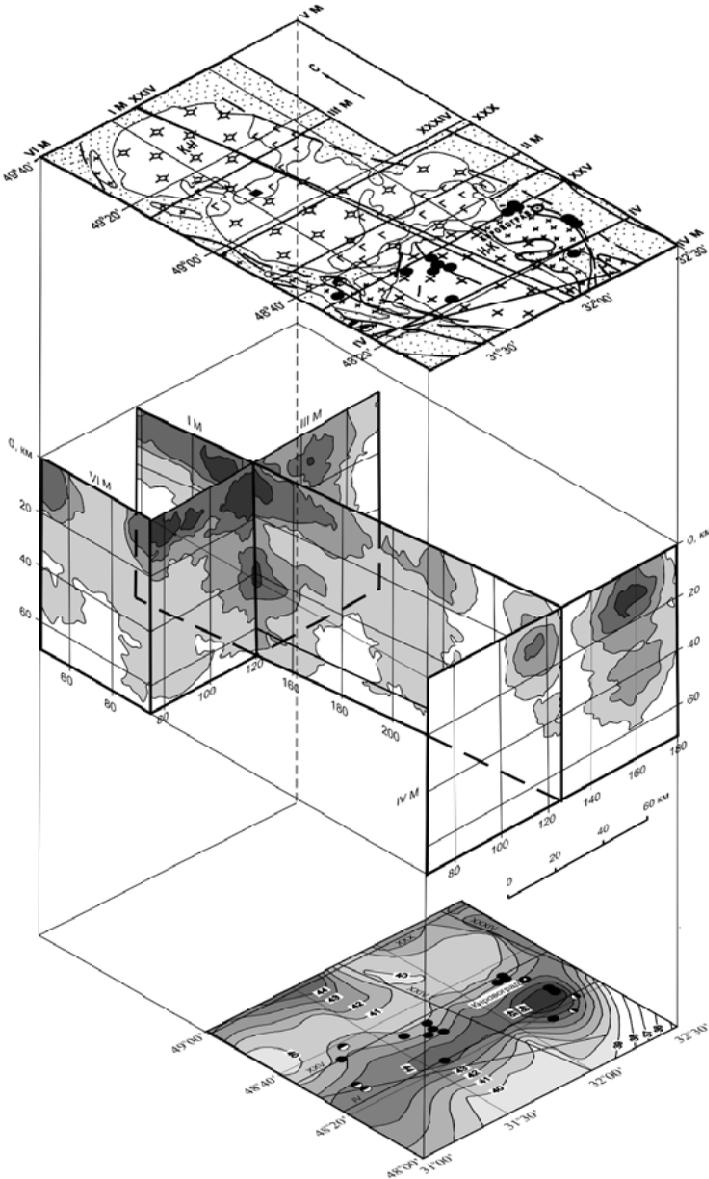


Рис. 3. Сейсмогеологічна модель Кіровоградського рудного району. Вверху – поверхнісні структури району, в середній частині – строєння Новоукраїнсько-Корсунь-Новомиргородського плутону в ізолініях параметра A_{ps}/A_p , внизу – проекція рудних місцезороджень на рельєф розділа Мохо

Вторая аномалия столь же высокой интенсивности зафиксирована на глубине около 40 км. Ее эпицентр находится вблизи раздела Мохо. Вторая аномалия либо отражает положение питающего канала для расположенной выше плитообразной интрузии анортозитов и гранитов рапакиви, либо указывает на положение промежуточной магматической камеры.

Под Новоукраинско-Кировоградским гранитоидным массивом аномалии A_{PS}/A_P протягиваются на меньшую глубину, имеют меньшую интенсивность и разделены почти вертикальными зонами фоновых значений этого параметра.

Область сочленения Корсунь-Новомиргородского и Новоукраинского гранитных массивов, которой на поверхности отвечает субширотный Субботско-Мошоринский глубинный разлом, а на глубине – погружение раздела Мохо на 5–6 км [10, 11], характеризуется фоновыми значениями обменоспособности. Причем на исходных данных до 30 км обмена отсутствуют, глубже обмена появляются, но слабой интенсивности.

Отмечено, что разломные зоны, которые являются наиболее неоднородными структурами в разрезе коры, в поле обменных волн имеют вид прозрачных зон. Это связано, по-видимому, с тем, что метод фиксирует структурированную гетерогенность, в то время как в районе нарушения происходит рассеяние энергии, возможна интерференция волн различного типа и направления, и станциями, расположенными вдоль одной линии профиля, они не фиксируются. Кроме того, обмен происходит на неоднородностях, соизмеримых с длиной волны, что для данного метода составляет 0,8–1,0 км. Аналогичное рассеяние волнового фронта наблюдается и в методе ОГТ. Прозрачными выглядят как наиболее изоморфные для сейсмических волн области, так и наиболее сложнопостроенные [9].

Заключение. Для анализа поля обменных волн землетрясений в Кировоградском рудном районе была предложена оригинальная методика статистической обработки данных, заключающаяся в статистическом анализе исходных данных по профилям с последующим осреднением результатов в изометрическом окне с радиусом, близким к среднему радиусу автокорреляции аномалий, вычисленному как средневзвешенное для всех профилей.

Использовался не один, а три параметра (признака): плотность распределения точек обмена по профилю, отношение амплитуды обменной волны к амплитуде породившей ее продольной волны A_{PS}/A_P и кратность

обмена в одной и той же точке. Применение кругового окна исключило возможность искусственного доминирования какого-либо одного направления.

По данным статистического анализа поля обменных волн землетрясений было показано, что Новоукраинский и Корсунь-Новомиргородский массивы, слагающие Кировоградский рудный район, различаются не только по соотношениям со стратифицированными породами ингуло-ингулецкой свиты и генезису, но и по вертикальной протяженности. Первый протягивается на 15–20 км ниже современного эрозионного среза щита, второй пересекает раздел Мохо и уходит своими корнями в верхнюю мантию.

1. Булин Н.К. Сейсмологические исследования МОВЗ на Балтийском щите и его южных склонах / Н.К. Булин, Э.В. Исанина, В.И. Литвиненко // Зап. Ленингр. горн. ин-та. – 1996. – **135**. – С. 53–64.
2. Померанцева И.В. Сейсмические исследования с аппаратурой “Земля” / И.В. Померанцева, А.Н. Мозженко. – М.: Недра, 1977. – 256 с.
3. Крюченко В.А. Опыт комплексной интерпретации материалов МОВЗ и гравиметрии в центральной части Украинского щита / В.А. Крюченко, Э.В. Исанина // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 16–26.
4. Крюченко В.А. Сопоставление результатов статистической обработки материалов МОВЗ и ГСЗ по профилю Канев–Николаев / В.А. Крюченко // Глубинное строение земной коры и верхней мантии Украины. – Киев: Наук. думка, 1984. – С. 3–16.
5. Никитин А.А. Комплекс спектрально-корреляционного анализа данных “КОСКАД-3D” / А.А. Никитин, А.В. Петров, А.С. Алексашин. – М.: Моск. гос. геологоразв. ун-т, 2004. – 158 с.
6. Старостенко В.И. Связь поверхностных структур Кировоградского рудного района (Украинский щит) с локальными неоднородностями коры и рельефом поверхности Мохо / В.И. Старостенко, В.И. Казанский, Г.М. Дрогицкая [и др.] // Геофиз. журн. – 2007. – **32**, № 1. – С. 3–33.
7. Старостенко В.И. От поверхностных структур к интегральной глубинной модели Кировоградского рудного района (Украинский щит) / В.И. Старостенко, В.И. Казанский, Н.И. Попов [и др.] // Там же. – 2010. – **32**, № 1. – С. 3–26.
8. Starostenko V.I. Deep structure and geodynamics of the Kirovograd ore district (Ukrainian shield): correlation of geologic and seismic data / V.I. Starostenko, V.I. Kazansky, G.M. Drogitskaya // Там же. – 2010. – **32**, № 4. – С. 165–170.
9. Дрогицкая Г.М. Глубинное строение западной части Корсунь-Новомиргородского плутона по данным сейсмических отраженных волн и гравитационного моделирования / Г.М. Дрогицкая, Л.М. Шимкив // Там же. – 1986. – № 2. – С. 76–82.
10. Дрогицкая Г.М. Сейсмогеологическая позиция Кировоградского рудного района (Украинский щит) в связи с локальными неоднородностями поверхности Мохо / Г.М. Дрогицкая, А.А. Трипольский, Н.И. Попов // Геофизика XXI столетия 2006 год:

Сб. тр. Восьмих геофиз. чтений им. В.В. Федынского (2–4 марта 2006 г., г. Москва). – М., 2007. – С. 21–27.

11. *Дрогицкая Г.М.* Повышение достоверности геологической модели центральной части Украинского щита на основе комплексирования сейсмических методов ГСЗ и МОВЗ / Г.М. Дрогицкая // Теоретичні та прикладні аспекти геоінформатики. – К., 2009. – С. 48–58.

Побудова 3D-сейсмогеологічної моделі Кіровоградського рудного району (Український щит) за даними обмінних хвиль землетрусів Г.М. Дрогицька

На основі статистичного аналізу обмінних хвиль землетрусів (МОХЗ) у статті розглянуто глибинну будову Корсунь-Новомиргородського та Новоукраїнського гранітоїдних масивів, що визначають архітектуру Кіровоградського рудного району. Зроблено висновок, що масиви відрізняються не тільки по складу, генезису, характеру контактів з породами рами, а й по вертикальній протяжності. Одним з доказів, служить виявлення аномалій обмінних хвиль на границі кора–мантія під Корсунь-Новомиргородським рапаківі-анортозитовим масивом при відсутності такої під Новоукраїнським гранітоїдним масивом, що опосередковано підтверджує мантійне походження першого і корове – другого масивів.

Ключові слова: метод обмінних хвиль землетрусів (МОХЗ), гранітоїдні масиви, кора, мантія.

Building process 3D seismogeological model of the Kirovograd ore district (Ukrainian shield) of converted waves of earthquakes G.M. Drogitskaya

On the basis of statistic analysis of converted waves of earthquake (MCWE) in this article the deep structure of Korsun'-Novomirgorod and Novoukrainsk granitoid massif the researches were made. It defines the architecture of Kirovograd ore district. The conclusion was made. The massifs differ by their structures, genesis and characters of contacts with rock rama breeds also in vertical extension. One of the proofs is discover of anamaly in converted waves on the crust–mantle border near Korsun'-Novomirgorod rapakivi-anorthosite massif. And lack of this anamaly in Novoukrainsk granitoid massif witnesses the maintainian origin of the first one and the crust origin of the second one.

Keywords: method of converted waves of earthquake (MCWE), granitoid massif, crust, mantle.