

УДК 550.834

О.О. Верпаховська<sup>1</sup>, В.М. Пилипенко<sup>1</sup>, Н.І. Павленкова<sup>2</sup>

## ДОСЛІДЖЕННЯ БУДОВИ ЗЕМНОЇ КОРИ МІГРАЦІЙНИМИ ПЕРЕТВОРЕННЯМИ СПОСТЕРЕЖЕНОГО ХВИЛЬОВОГО ПОЛЯ ЗА ДАНИМИ МОРСЬКОЇ СЕЙСМОРОЗВІДКИ

*Стаття присвячена питанням виконання міграційних перетворень хвильового поля за даними морських сейсмічних спостережень з метою дослідження будови земної кори. Метод дозволяє отримати глибинне зображення геологічного середовища з присутніми в ньому структурними елементами, що сприяє підвищенню рівня інформативності результату обробки та інтерпретації регіональних сейсмічних матеріалів. В статті наведено приклади застосування методу міграції поля заломлених хвиль, розробленого в Інституті геофізики, при обробці морських профілів, розміщених в районах Атлантичного та Тихого океанів.*

Задачею сейсмічних досліджень земних надр є отримання якомога більшої інформації про глибинну будову району спостережень. Застосування методів міграції при обробці та інтерпретації сейсмічних матеріалів дозволяє отримати зображення глибинної будови досліджуваного регіону з усіма її структурними елементами, що підвищує рівень інформативності результату проведених сейсмічних робіт.

Останнім часом значна частина регіональних сейсмічних спостережень проводиться на морі. Обробка та інтерпретація таких даних пов'язана з деякими особливостями, до яких належать необхідність враховувати рельєф океанічного дна, нерідко складна будова земної кори, різка диференціація швидкості в розрізі, значні відстані від пункту збудження коливань до пункту реєстрації та ін. Існуючі методи міграції передбачають переважно інтегральні, згладжені описи швидкісної моделі середовища. Вони націлені на обробку та інтерпретацію поля відбитих хвиль, запис яких обмежується відстанню по профілю, яка не перевищує глибини досліджень [4,6,8,11]. Тому актуальним є створення методів формування зображень середовища, які б враховували особливості морських сейсмічних спостережень і дозволили відтворити тонкі деталі будови товщі земної кори на глибині, значно більшій за відстань між джерелом коливань та сейсмоприймачем. На таких інтервалах профілю реєструється складне хвильове поле, в якому можна виділити заломлені хвилі. Метод міграції поля заломлених хвиль, розроблений в Інституті геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, орієнтовано саме на обробку такого хвильового поля. Застосування цього методу міграції до даних морських сейсмічних спостережень дозволяє отримати чітке зображення будови земної кори різного ступеня складності.

© О.О. Верпаховська<sup>1</sup>, В.М. Пилипенко<sup>1</sup>, Н.І. Павленкова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАНУ, Київ, Україна

<sup>2</sup> Інститут фізики Землі ім. О.Ю. Шмідта РАН, Москва, Росія

Теоретичним основам методу міграції поля заломлених хвиль присвячено ряд статей [1-3], тому в даній статті зупинимось лише на деяких принципових моментах її виконання та більше уваги приділимо застосуванню даного методу міграції в обробці та інтерпретації морських сейсмічних матеріалів.

Широке використання міграції поля заломлених хвиль стримується проблемою неоднозначності задачі формування зображення границі заломлення, яка пов'язана з наявністю двох точок заломлення на промені заломленої хвилі при проходженні нею двошарового середовища. В нашому методі дану проблему вирішено шляхом перенесення джерела збудження з денної поверхні на границю заломлення в точку (фіктивне джерело), яка відповідає першій точці заломлення променя [3]. Для окремого пункту збудження формування зображення границі заломлення відбувається таким чином: хвильове поле перераховується у фіктивне джерело, а далі виконується саме міграція, яка складається з прямого продовження часового поля та зворотного продовження хвильового поля. Останні базуються на скінченно-різницевому методі, який є найбільш стійким і точним у розрахунках і дозволяє отримати дані в будь-якій точці простору.

Оскільки промінь заломленої хвилі від фіктивного джерела спочатку поширюється у заломлюючому середовищі, а потім переходить у перекриваюче середовище, необхідно враховувати розподіл швидкості, властивий обом середовищам. Для продовження часового та хвильового полів використовують різні швидкісні моделі. Пряме продовження часового поля базується на скінченно-різницевому наближенні рівняння ейконалу з використанням криволінійної сітки, лінії якої є променями та ізохронами; при цьому враховується швидкісна модель, яка описує заломлюючу товщу. Продовження хвильового поля використовує розподіл швидкості, який характеризує покриваючу товщу. При зворотному продовженні хвильового поля вирішується хвильове рівняння скінченно-різницевим методом за допомогою спеціальної просторово-часової косокутної сітки, яка передбачає продовження хвильового поля з швидкісною редукцією, що дозволяє значно скоротити об'єми обчислювань.

Отже, для виконання міграційних перетворень поля заломлених хвиль вхідними даними є дві швидкісні моделі окремо для покриваючого та заломлюючого середовища та глибинне положення фіктивного джерела.

Необхідною умовою для використання міграції поля заломлених хвиль на відміну від міграції поля відбитих хвиль є наявність різкої зміни швидкості на границі заломлення [2], тому даний метод дозволяє формувати зображення контрастних границь, таких як кристалічний фундамент, верхня границя кори, ускладнена різними порушеннями (складками, куполами, інтрузіями та ін.), зона переходу континентальної кори в океанічну та ін. Метод міграції поля заломлених хвиль було апробовано при обробці ряду модельних та реальних матеріалів. Розглянемо застосування методу при формуванні глибинного зображення середовища за даними морських сейсмічних спостережень.

Першим прикладом застосування міграційних перетворень поля заломлених хвиль є обробка та інтерпретація даних глибинного сейсмічного зондування у Південній Америці за проектом CINCA95 [10]. Необхідно відзначити особливості реєстрації коливань за даним проектом. Спостереження велися за односторонньою системою. Запис сигналів провадився сейсмічними станціями, розташованими на суші, при цьому пневматичні джерела розміщувалися на морі. В районі досліджень берегова лінія переходить в гірську систему Анд, тому сейсмічні станції перебували на різних висотних рівнях. Ці обставини викликали потребу при обробці даних враховувати рельєф берегової лінії, а також рельєф океанічного дна. На рисунку 1а подано схему розміщення профілю 7 проекту CINCA95, 1б — швидкісну модель, яка була отримана німецькими дослідниками із застосуванням методу моделювання променів [10]. Метою досліджень проекту CINCA95 було вивчення зони заглиблення плити Наска під Південно-Американську плиту.

Даний район характеризується значною диференціацією швидкості як у вертикальному, так і горизонтальному напрямках, що дає підстави для використання міграції поля заломлених хвиль при обробці та інтерпретації даних морських спостережень.

При міграції даних профілю 7 проекту CINCA95 у швидкісній моделі покриваючої товщі необхідно було врахувати перепад абсолютних відміток не тільки моря (від 5.8 до 0 км), а й суші (від

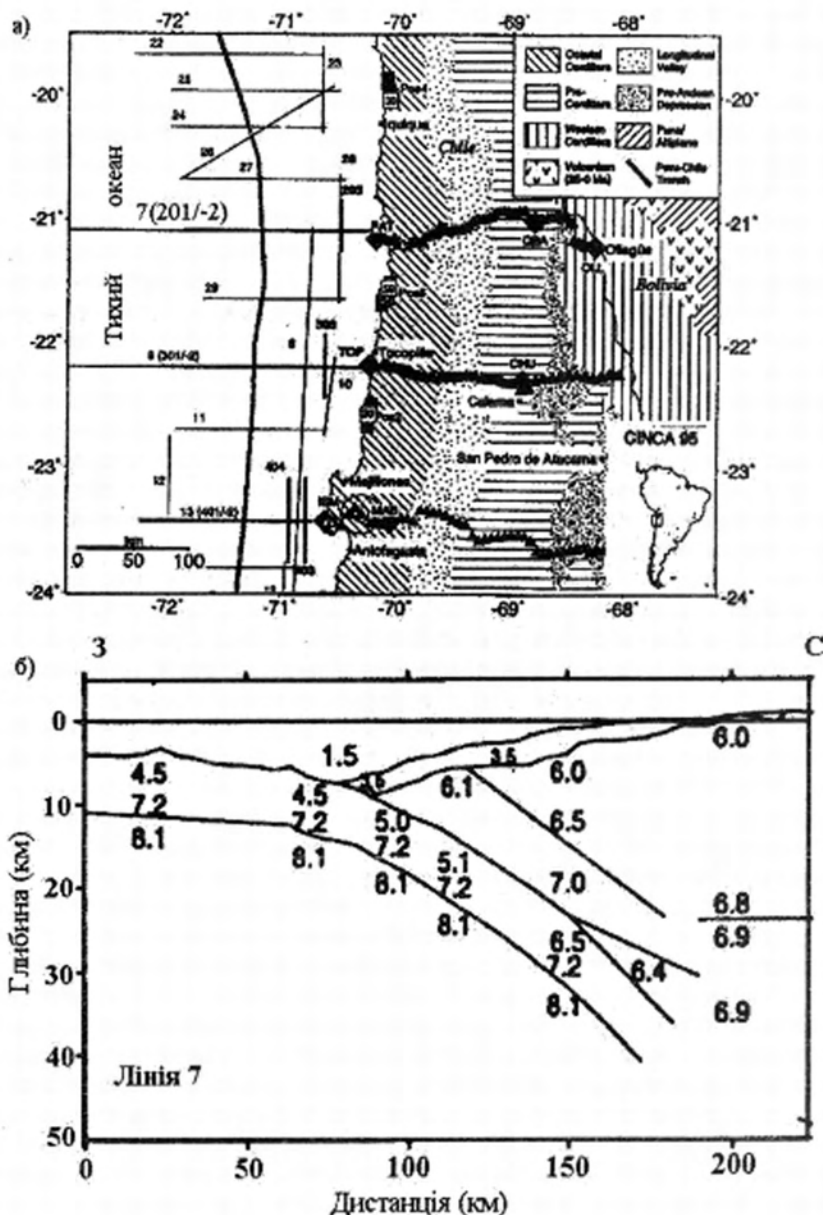


Рис. 1. а – карта розміщення профілю 7 проекту CINCA95; б – швидкісна модель, отримана за допомогою методу моделювання променів

0.5 км до 2.7 км). Перепад швидкостей по горизонталі в даному районі становив від 1.5 до 5.4 км/с. На рис. 2 подано швидкісну модель, яка застосовувалася для формування глибинного зображення в районі спостережень профілю 7 проекту CINCA95.

Специфікою міграції поля заломлених хвиль є формування зображення окремої заломлюючої границі. Тому, якщо в розрізі є декілька контрастних границь, на яких відбувається стрибок швидкості, необхідно відбудувати кожену границю окремо і зводити отримані зображення в сумарний глибинний розріз.

На рисунку 3а зображено границю океанічної кори, побудовану міграцією поля заломлених хвиль за даними профілю 7 проекту CINCA95. До 45 км границя, що відповідає океанічній корі, з невеликими перепадами простежується на глибині 10 — 12 км, далі вона різко заглиблюється до 20 км під континентальну кору і на 65 — 145 км профілю поступово спадає до глибини приблизно 27 км. Заломлююча товща характеризується швидкістю поширення хвиль 7.6-7.7 км/с (рис.2).

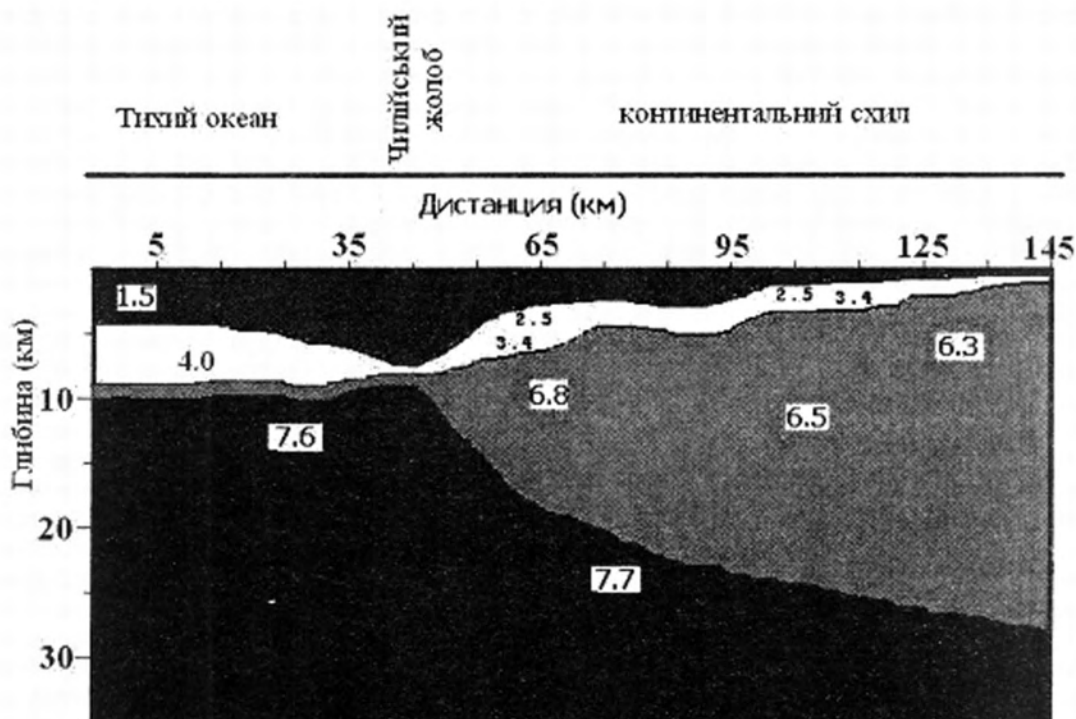


Рис. 2. Швидкісна модель, яку використано для міграції поля заломлених хвиль в районі спостережень профілю 7 проекту CINCA95

Сформоване окреме зображення для континентальної кори за даними профілю 7 проекту CINCA95 подано на рис. 3б. Границя континентальної кори від 65 до 145 км профілю поступово підіймається з 8 до 3 км глибини. На зображенні досить чітко просліджуються усі особливості границі, яка ускладнена невеликими підняттями та заглибленнями. Це є свідченням того, що за допомогою міграції поля заломлених хвиль можна підвищити детальність результату обробки та інтерпретації морських спостережень. Швидкість поширення хвиль в заломлюючій товщі коливається від 6.3 до 6.8 км/с (див. рис.2).

При сумі двох зображень, сформованих окремо для границь континентальної (рис.3б) та океанічної кори (рис.3а) отримано сумарне глибинне зображення будови кори даного регіону (рис.3в), на якому чітко видно зону переходу від океанічної до континентальної кори. Результат дозволяє говорити про можливість формування зображення за полем заломлених хвиль в умовах складної тектонічної будови зони переходу океанічної кори у континентальну при достатній довжині профілю. На рисунку 4 наведено розріз земної кори, отриманий за сейсмічними даними у 1962 році Р.Фішером та Р.Рейтом [5] при дослідженні будови Чилійського жолобу в районі м. Антофагаста. Порівнюючи рисунки 3в і 4, можна відмітити їхню схожість.

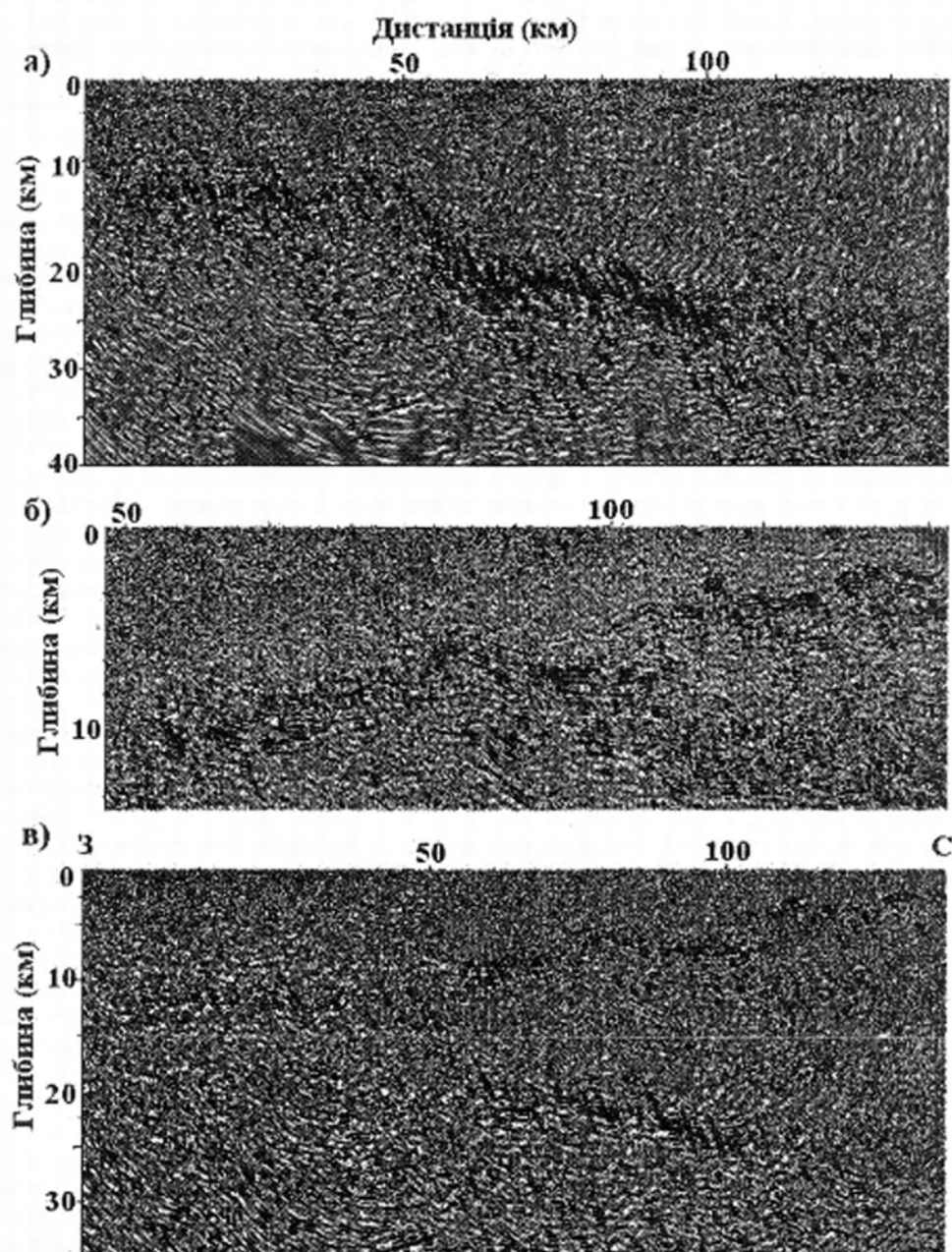


Рис. 3. Формування зображення земної кори за полем заломлених хвиль за даними профілю 7 проекту SINCA95: а) зображення океанічної кори; б) зображення континентальної кори; в) сумарне глибинне зображення будови кори в зоні переходу від Тихого океану до гірського масиву Анд

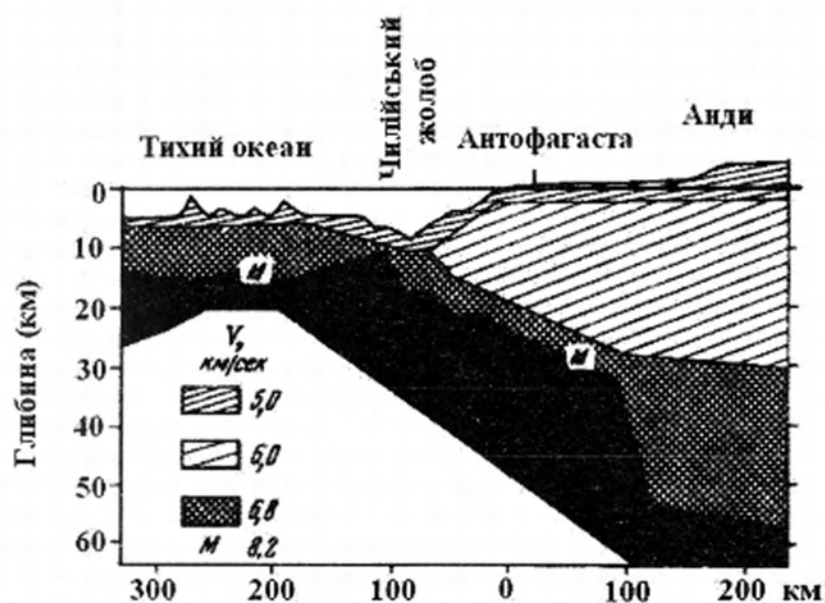


Рис. 4. Розріз земної кори, отриманий за сейсмічними даними в береговій зоні Південної Америки (м. Антофагаста) взято зі статті (R.L.Fischer, R.W.Raitt. Topography and structure of the Peru-Chile trench. Deep-Sea research, Pergamon press, 1962, pp.423-444)

Ще одним прикладом використання методу міграції поля заломлених хвиль при обробці даних морських сейсмічних досліджень є якісне зображення верхньої частини кори, отримане за даними профілю RAPIDS-34 в зоні північно-східного шельфу Атлантичного океану. Роботи за проектом RAPIDS проводилися за допомогою донних станцій. Методика реєстрації хвильового поля із застосуванням донних станцій набуває все більшого поширення при регіональних морських дослідженнях, оскільки дозволяє отримати якісні спостереження на протязі всього профілю (особливо на великих відстанях від пункту збудження коливаний) і збільшує детальність при обробці та інтерпретації даних морської сейсмозвідки. Профілі морських спостережень за проектом RAPIDS розміщувалися біля берегів Ірландії [7].

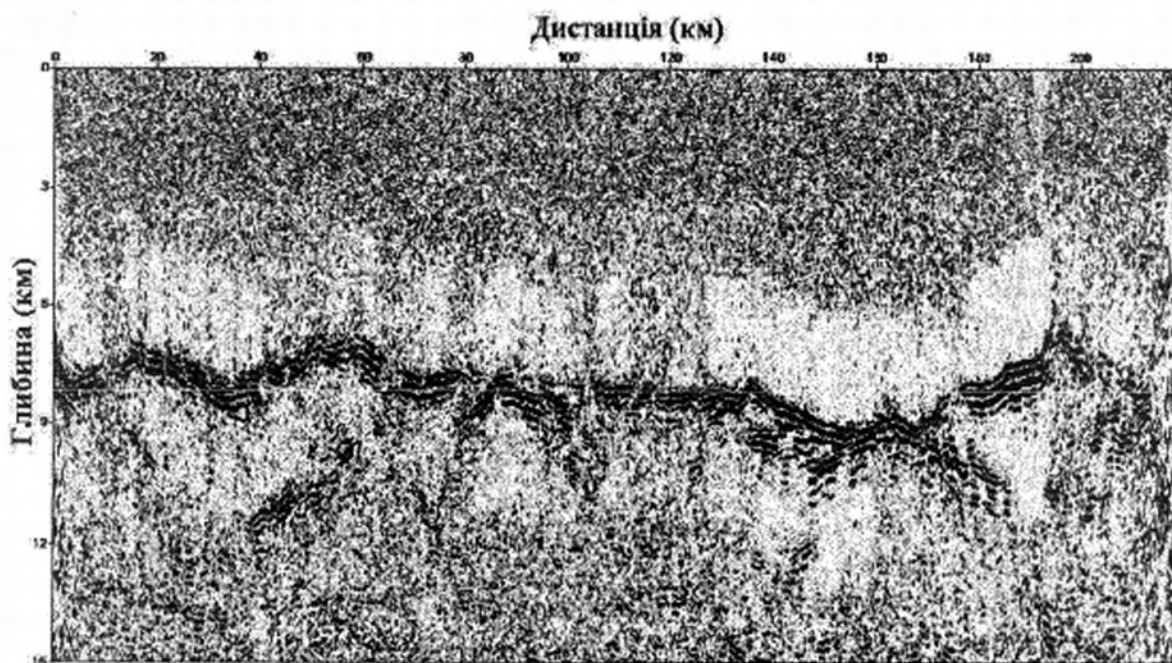


Рис. 5. Глибинне зображення верхньої частини океанічної кори (Атлантичний океан), сформоване за даними профілю RAPIDS-34

Довжина профілю RAPIDS-34 складала 220 км. Застосовувалася відносно розріджена система спостережень: віддаль між окремими донними станціями 3 — 6 км, між пунктами збудження на поверхні моря 120 — 150 м.

Незважаючи на відносно розріджену систему спостережень, міграція поля заломлених хвиль дозволила дослідити геологічну будову верхньої частини кори вздовж усього профілю. На рис. 5 показано сформоване зображення за даними профілю RAPIDS-34, на якому чітко виділяються різні за своїми структурними особливостями відрізки верхньої частини кори. Необхідно відзначити, що даний приклад дозволяє продемонструвати здатність міграції відтворювати зображення будови як границі заломлення, так і значної частини заломлюючої товщі. За допомогою міграційних перетворень фіксуються області розвитку складчастості у верхній частині кори, особливості будови океанічної та континентальної кори. На зображенні виділяються області інтрузій у кристалічному фундаменті, а також окремі розривні порушення. На рис. 6 подано швидкісну модель, яка є результатом обробки та інтерпретації даних профілю RAPIDS-34 німецькими дослідниками [9] із застосуванням методу моделювання променів. При порівнянні рисунків 5 і 6 чітко видно переваги методу міграції поля заломлених хвиль у досягненні детальності зображуваних границь, а також можливості відтворювати будову не лише границі, але і значної частини заломлюючої товщі.

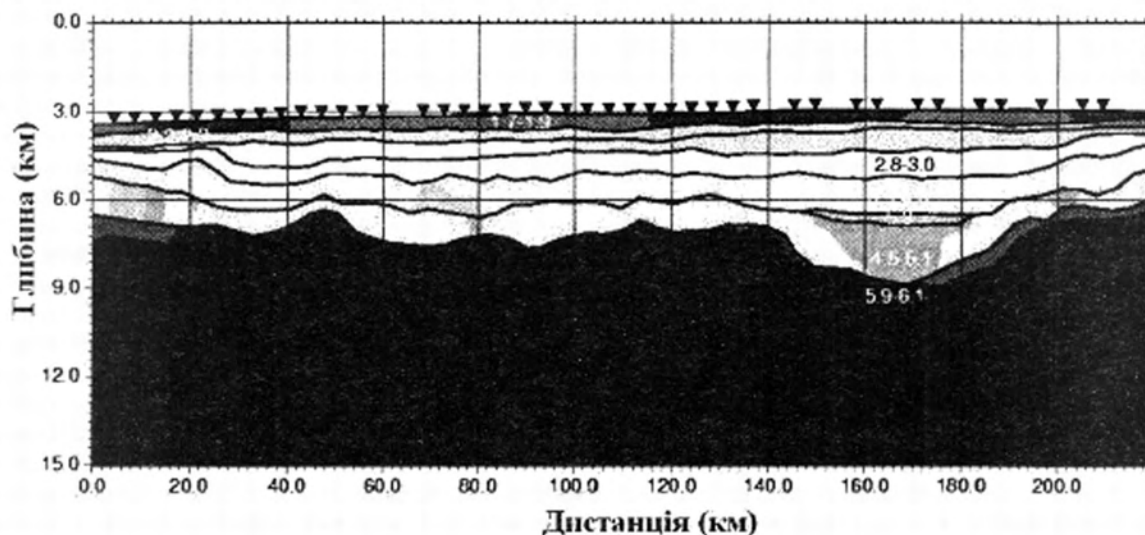


Рис. 6. Результат інтерпретації даних профілю RAPIDS-34 методом моделювання променів взято зі статті (J. Makris, V. Pylypenko. Refracted wave migration — imaging the crystalline basement on the profiles in Rockall Basin (Northern Atlantic). EAGE 65<sup>th</sup> Conference & Exhibitions — Stavanger, Norway — 2-5 June, 2003.- Z-03.)

Отже, міграція трансформує спостережене хвильове поле в образ досліджуваного геологічного середовища з наявними в ньому структурними елементами. Метод міграції поля заломлених хвиль дозволяє обробляти регіональні сейсмічні дані, отримані навіть за розрідженою системою спостережень. При обробці морських сейсмічних матеріалів застосування методу дає змогу відтворити складні за будовою границі земної кори, а також зони переходу океанічної кори в континентальну. Приведені в статті результати застосування міграції поля заломлених хвиль в обробці та інтерпретації даних морської сейсмозвідки підтверджують результативність

методу за різних умов проведення спостережень, а також високий ступінь детальності отриманого зображення складної будови земної кори.

1. Пилипенко В.Н. Разностные продолжения временных и волновых полей в задачах формирования изображений среды // Физика Земли.— 1991 — №9 — С. 96–104.
2. Пилипенко В.Н., Верпаховская А.О. Особенности миграционного преобразования поля рефрагированных волн. // Геофизический журнал — Киев — 2003 — №1 — С.42-55.
3. В.Н. Пилипенко, Н.И. Павленкова, У. Луосто, А.О. Верпаховская. Формирование изображений среды по сейсмограммам глубинного сейсмического зондирования. // Физика Земли — Москва — 1999 — №7-8 — С. 164-176.
4. Bleistein Norman, Gray Samuel H.. From the Hagedoorn imaging technique to Kirchhoff migration and inversion// Geophys. Prosp.— 2001 — v.49 — P. 629-643.
5. R.L.Fischer, R.W.Raitt. Topography and structure of the Peru-Chile trench.— Deep-Sea research, Pergamon press,— 1962 — P.423-11444.
6. French W.S. Two-dimensional and three-dimensional migration of model-experiment reflection profiles// Geophysics.— 1974 — v.39 — N1 — P. 265-277.
7. Jacobs A.W., Shanon P.M., Makris J., Yauser F., Vogt U. & O'Reilly B.M. An Overview of the results of the RAPIDS seismic project, North Atlantic. In: Petroleum Geology of Ireland's Offshore Basins (ed. P. Crocer & P.M. Shannon) — Special Publication of the Geological Society — London — 1995 — № 93 — P.429-431.
8. Li-Yun Fu. Wavefield interpolation in the Fourier wavefield extrapolation// Geophysics — 2004 — v.69 — N1 — P.257-264.
9. J. Makris, V. Pylypenko. Refracted wave migration — imaging the crystalline basement on the profiles in Rockall Basin (Northern Atlantic). EAGE 65<sup>th</sup> Conference & Exhibitions — Stavanger, Norway — 2-5 June, 2003 — Z-03.
10. Patzwahl R., Merchie J., Schulze A. and Giese P. Two-dimensional velocity models of the Nazca plate subduction zone between 19.5°S and 25°S from wide-angle seismic measurements during the CINCA95 project // Journal of Geophysical research.— 1999.— 104, № 4 — P.7293-7317.
11. Seismic Tomography With Applications in Global Seismology and Exploration Geophysics. Edited by G.Nolet — D. Reidel Publishing Company.— 1987 — Dordrecht — Holand — 416с.

Статья посвящена вопросам выполнения миграционных преобразований волнового поля по данным морских сейсмических наблюдений с целью исследования строения земной коры. Миграция позволяет получить глубинное изображение геологической среды с присутствующими в ней структурными элементами, что способствует повышению уровня информативности результата обработки и интерпретации региональных сейсмических материалов. В статье приведены примеры применения метода миграции поля преломленных волн, разработанного в Институте геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, при обработке морских профилей, расположенных в районах Атлантического и Тихого океанов.

The questions of application of migration for the processing marine seismic data with the purpose to research of the earth's crust structure are considered in this article. Migration allows to get the deep image of the geological media with present in it structural elements, that is instrumental in the increase of level of informing of processing and interpretation result of regional seismic materials. The examples of application of refraction migration method to marine profiles, located in the Atlantic and Pacific oceans are given. The refraction migration method was developed in Institute of geophysics of Ukrainian NAS.