

Нейросетевая модель поля времен первых вступлений сейсмических волн в Украине

© М.А. Лазаренко, О.А. Герасименко, Н.Н. Остапчук, 2016

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 4 декабря 2015 г.

Представлено членом редколлегии А. В. Кендзерой

Запропоновано використання даних сейсмічних досліджень ГСЗ території України для побудови нейромережових моделей поля часів вступу сейсмічних сигналів, які дають змогу конструювати годографи поздовжніх хвиль уздовж довільно орієнтованих профілів у регіонах, що не мають сейсмічних спостережень, або коригувати швидкісний розріз, використовуючи один з методів обернення годографа. Наведено порівняння змодельованих часів вступу поздовжніх хвиль з такими, що були зареєстровані на території України.

Ключові слова: нейронна мережа, час вступу поздовжніх хвиль, сейсмічні дослідження, годограф.

Одним из замечательных свойств сетей искусственных нейронов является их способность к обобщению, т. е., получив свои "знания" в процессе обучения на множестве случайных примеров поведения некой функции, сеть способна генерировать обоснованный результат поведения этой функции для случаев, не появившихся в обучающем множестве.

Сформированная в результате обучения нейронной сети модель поля времен вступления сейсмических сигналов позволяет генерировать годографы вступлений продольных волн для произвольных координат начала и конца сейсмического профиля. Таким образом, появляется возможность прогнозировать годографы продольных волн вдоль произвольно ориентированных профилей в регионах, где не проводятся сейсмические наблюдения, либо получать оценку (или корректировку) скоростного разреза, используя один из методов обращения годографа. Множество пар "источник—приемник" с координатами на территории Украины и временами вступлений сейсмических сигналов было использовано для формирования векторов обучающего множества для сети искусственных нейронов.

Сейсмические исследования (ГСЗ), выполнявшиеся в Украине в прошлом столетии [Чекунов, 1972; Соллогуб, Чекунов, 1975; Соллогуб,

1986; Литосфера ..., 1988; Ильченко, 2002; Thybo et al., 2003], и современные проекты: DOBRE, GEORIFT [Лысынчук и др. 2002; Град и др., 2003; Старостенко и др., 2009, 2011; Starostenko et al., 2012, 2013 а, б, 2015; Janik et al., 2014] образовали довольно плотное покрытие территории сетью источников и точек приема сейсмических сигналов. На рис. 1 показаны доступные нам данные.

Для построения модели поля времен волн, регистрируемых на записях первых вступлений, которые выступают в роли целевых значений, была использована управляемая, многослойная, прямопоточная, полносвязанная сеть искусственных нейронов [Хайкин, 2006]. Для ее обучения методом обратной передачи ошибки [Tarassenko, 1998] минимизировалась среднеквадратическая ошибка:

$$E(w) = \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^N [f(w_{i,j} y_{i,p} + \vartheta_j) - t_{j,p}]^2, \quad (1)$$

где $t_{j,p}$ — желаемый отклик j -го нейрона выходного слоя на возбуждение p -м вектором обучающей выборки, $y_{i,p}$ — выход того же нейрона при величине весов текущей итерации, $f(*)$ — нелинейная функция активации, $w_{i,j}$ — вес соединения i -го нейрона с j -м, N — ко-

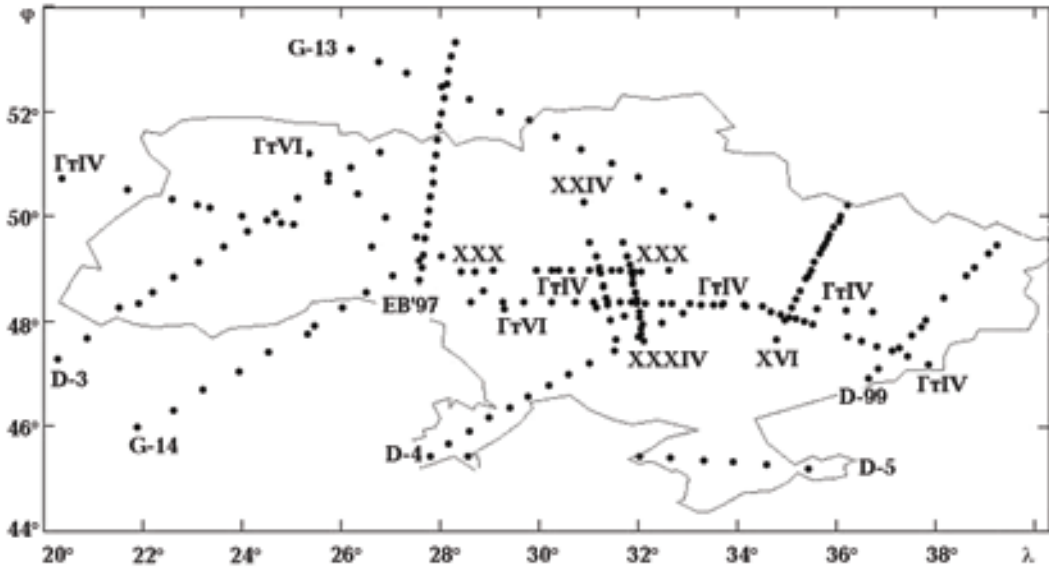


Рис. 1. Сеть покрытия источниками сейсмических сигналов территории Украины. Международные профили: ЕВРОБРИДЖ 97 (ЕВ'97), DOBRE 99 (D-99), DOBRE 3—5 (D-3, D-4, D-5), GEORIFT 13, 14 (G-13, G-14); геотраверсы ИГФ: ГrIV (Рава-Русская—Хмельницкий—Голованевск—Днепропетровск—Кировоград—Красноармейск; Днепропетровск—Таганрог, 1966—1973), фрагмент геотраверса ГrVI (Балтийское—Черное море, 1981); профили ГСЗ, проведенные ИГФ: XVI (Синельниково—Чугуев—Волчанск, 1971), XXIV (Николаев—Канев, 1977), XXX (Маньковка—Павлыш, 1979), XXXIV (Черкассы—Новый Бут, 1980).

личество нейронов выходного слоя, ϑ — величина сдвига. Для обучающей выборки компилировались компоненты векторов (ее элементов):

$$\mathbf{x}_{i,p} = (x_1, x_2, \dots, x_n, t_p), \quad n = \overline{1, 8}, \quad (2)$$

где $x_1 \dots x_6$ — φ, λ, h — координаты и превышение над уровнем моря источника и сейсмоприемника, x_7 — обратный азимут, x_8 — эпицентральное расстояние.

Координаты источника и приемника выбирались из материалов международных сейсмических исследований, проводившихся в 1966—2014 гг. под руководством Института геофизики НАН Украины, сохранившихся протоколов топографических работ и схем профилей ГСЗ, снимались с сейсмограмм. Оценки расстояния сейсмоприемник—источник и обратного азимута получались в результате решения обратной задачи геодезии для сферической Земли [Кулагин, Максимова, 2013].

Для определения превышения над уровнем моря произвольной точки региона (обычно вдоль трассы моделируемого годографа) была создана нейросетевая модель, использующая для обучения множество двухкомпонентных (φ, λ) векторов и целевых значений в виде превышений, полученных с помощью программы Google Earth

(<http://earth.google.com>) в точках, показанных на рис. 2.

После редактирования и проведения циклов обучения нейронных сетей различной ар-

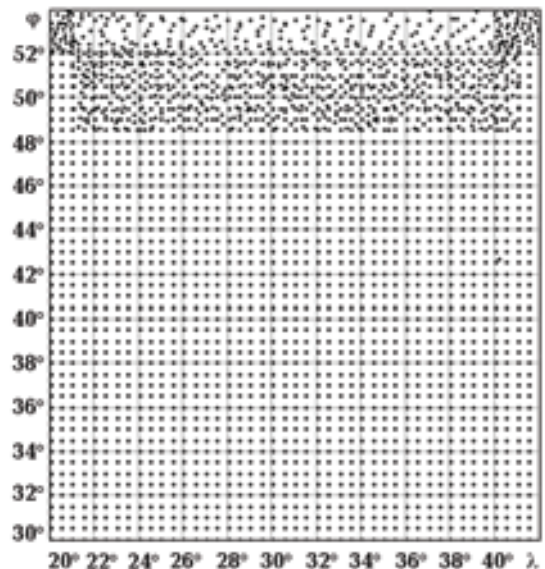


Рис. 2. Схема расположения точек с известными значениями широты и долготы, в которых снимались значения превышений над уровнем моря.

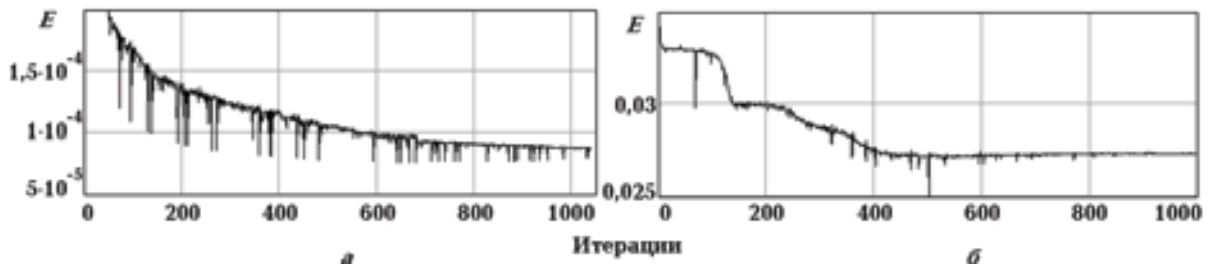


Рис. 3. Зависимость величины функции потерь E от числа итераций. Обучение нейросетевых моделей: a — поля времен вступления продольных волн, b — поля превышений над уровнем моря. Показан результат каждой 10-й итерации.

хитектуры было организовано обучающее множество, содержащее 4587 восьмимерных векторов (см. формулу (2)), и выбрана семислойная архитектура нейросети с послойным количеством весов — 8 : 30 : 25 : 15 : 10 : 5 : 1. Для всех скрытых слоев в качестве функции активации использовался гиперболический тангенс, а для выходного слоя — единичная функция. Нейро-модель была сформирована в результате 1040 итерационных циклов обучения при уменьшении коэффициента скорости обучения от $5 \cdot 10^{-3}$ до $6 \cdot 10^{-6}$. Поведение функций потерь в процессе обучения показано на рис. 3.

В качестве экзаменационной процедуры для оценки работоспособности нейросетевой модели из обучающего множества исключались наблюдения вдоль отдельного профиля. Сеть обучалась на усеченном таким образом множестве, и моделируемый вдоль исключенной трассы годограф сравнивался с наблюдаемым. Результаты

некоторых таких сравнений показаны на рис. 4.

Созданная нейросетевая модель поля времен первых вступления самых быстрых фаз продольных волн позволяет моделировать годографы этих фаз для произвольных координат источников и приемников, перекрываемых этой моделью в регионе.

На наш взгляд, совпадение наблюдаемых и моделируемых данных на сетях, для которых при обучении эти наблюдаемые данные не использовались, удовлетворительно, учитывая высокий уровень вносимого и генерируемого шума при манипулировании первичными данными.

В качестве примера одного из источников такого шума на рис. 5 приведена фактическая осцилляция в градусах прямого азимута вдоль профиля наблюдений, который представляется как прямолинейный.

Обобщающие способности нейросетевых моделей в предлагаемом осуществлении могут быть

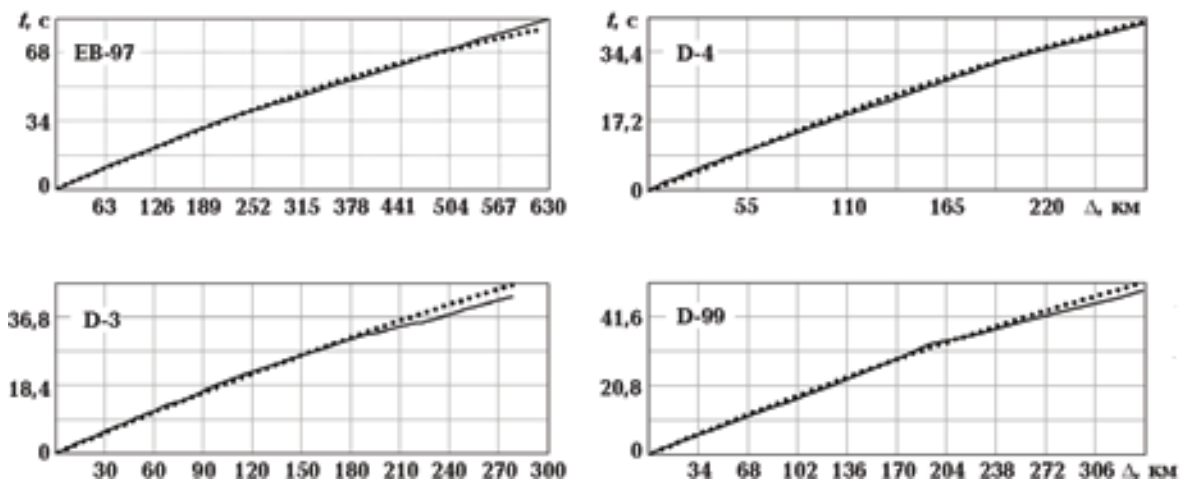


Рис. 4. Наблюдаемый (сплошная линия) и смоделированный (точечная линия) годографы первых вступлений сейсмических волн вдоль трасс DOBRE-3, -4, -99 и Евробридж-97 (см. рис. 1).

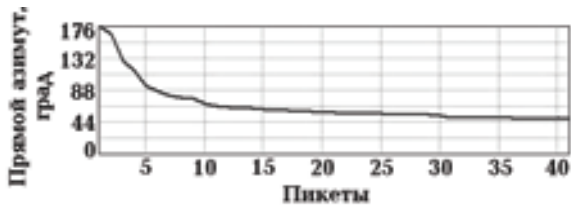


Рис. 5. Профиль D-3. Значение прямого азимута от источника ($\varphi = 48,3^\circ$, $\lambda = 22,1^\circ$) до каждого из 41 пикета в южном направлении на расстоянии 278 км.

использованы для получения различных физических и структурных оценок геологической среды, таких как скоростные характеристики среды, координаты источников сейсмических

На рис. 6 показан результат проигрывания на нейросетевой модели, представленной сеточной областью с шагом 1° , простейшего сценария поведения на территории Украины поля времен вступления сейсмических волн. В левой колонке верхнего ряда приведены результаты моделирования поля времен вступления сигнала для западной точки возбуждения, во втором ряду — поле времен вступления при излучении восточного источника. В нижнем ряду показаны невязки времен вступления продольных волн, возбужденных во взаимных точках этими источниками. В правой колонке по той же схеме выполнено построение временных полей для субширотного расположения точек возбуждения.

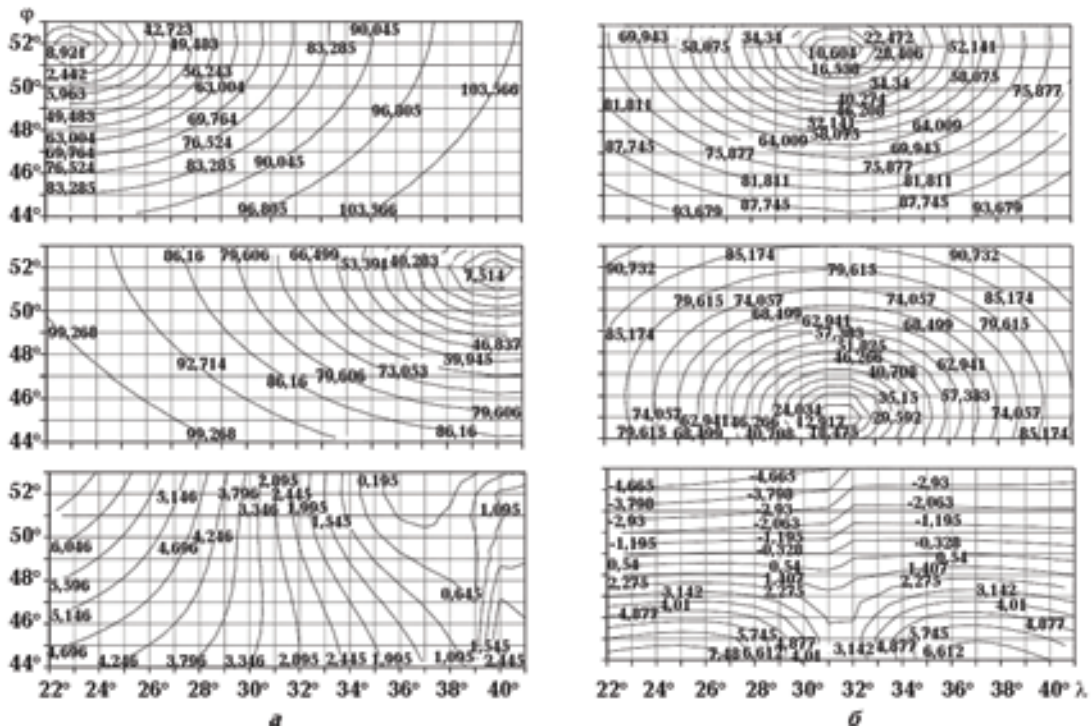


Рис. 6. Прогноз времен вступлений сейсмического сигнала, возбужденного во взаимных точках $\varphi = 52^\circ$, $\lambda = 23^\circ$ и $\varphi = 52^\circ$, $\lambda = 40^\circ$ (а), $\varphi = 52^\circ$, $\lambda = 31,5^\circ$ и $\varphi = 45^\circ$, $\lambda = 31,5^\circ$ (б).

волн [Nelson et al., 1990], аномалии времен пробега сейсмических волн, обусловленные структурными неоднородностями геологической среды и/или сейсмической [Schoenberg, Sayers, 1995] анизотропией, и т. п.

Авторы настоящей статьи не считают себя достаточно компетентными в геолого-тектоническом осмыслении полученных результатов, но надеются, что последними могут заинтересоваться структурные аналитики.

Список литературы

- Граг М., Гринь Д., Гутерх А., Келлер Р., Ланг Р., Лингси С., Лысынчук Д., Лысынчук Е., Омельченко В., Старостенко В., Стовба С., Тибо Г., Толкунов А., Яник Т. DOBRE-99: структура земной коры Донбасса вдоль профиля Мариуполь—Беловодск. *Физика Земли*. 2003. № 6. С. 33—43.
- Ильченко Т. В. Результаты исследований методом ГСЗ вдоль геотрансекта ЕВРОБРИДЖ-97. *Геофиз. журн.* 2002. Т. 24. № 3. С. 67—76.
- Кулагин В. П., Максимова М. Сходимость обратных задач в геодезии. *Науки о Земле*. 2013. № 2-3. С. 47—50.
- Литосфера Центральной и Восточной Европы. Геотраверсы IV, VI, VIII. Отв. ред. А. В. Чекунов. Киев: Наук. думка, 1988. 172 с.
- Лысынчук Д., Лысынчук Е., Омельченко В. Моделирование волновых полей при интерпретации данных ГСЗ на примере профиля DOBRE-99. *Сборник научных трудов НГАУ*. 2002. Т. 4. № 13. С. 84—87.
- Сологуб В. Б. Литосфера Украины. Киев: Наук. думка, 1986. 86 с.
- Сологуб В. Б., Чекунов А. В. Глубинное строение и эволюция земной коры. В кн.: *Проблемы физики Земли на Украине*. Киев: Наук. думка, 1975. С. 118—153.
- Старостенко В. И., Омельченко В. Д., Лысынчук Д. В., Легостаева О. В., Гринь Д. М., Коломицъ К. В. Дослідження глибинної будови земної кори та верхньої мантії за профілем ГСЗ Дебрецен—Мукачеве—Рівне (проект PANCAKE-08). *Геоінформатика*. 2009. № 2. С. 25—29.
- Старостенко В., Омельченко В., Лысынчук Д., Легостаева О., Гринь Д., Коломицъ К. Геофізичне вивчення глибинної будови земної кори та верхньої мантії деяких головних геологічних структур від Східно-Європейського кратону до Адріатичного моря. *Українсько-Македонський науковий збірник*. 2011. Вип. 5. С. 365—371.
- Хайкин С. Нейронные сети: полный курс. Москва: Издательский дом "Вильямс", 2006. 103 с.
- Чекунов А. В. Структура земной коры и тектоника юга Европейской части СССР. Киев: Наук. думка, 1972. С. 52—92.
- Janik T., Środa P., Czuba W., Lysynchuk D., Kolomiyets K., 2014. The GEORIFT 2013 wide-angle seismic profile, preliminary results GEORIFT 2013 Working Group. *16th SEISMIX International Symposium*. Barcelona 2014. Book of abstracts. P. 24.
- Nelson G. D., Vidale J. E., 1990. Earthquake Locations by 3D Finite-Difference Travel Times. *Bull. Seism. Soc. Amer.* 80(2), 359—410.
- Schoenberg M., Sayers S. M., 1995. Seismic Anisotropy of Fractured Rocks. *Geophysics* 60(1), 204—211.
- Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Środa P., Grad M., Kováč I., Stephenson R., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I. M., Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegediüs E., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A., 2013a. Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and the East European Craton. *Tectonophysics* 608, 1049—1072.
- Starostenko V., Janik T., Lysynchuk D., Środa P., Czuba W., Kolomiyets K., Aleksandrowski P., Gintov O., Omelchenko V., Komminaho K., Guterch A., Tiira T., Gryn D., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A., 2013b. Mesozoic (?) Lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophys. J. Int.* 195(2), 740—766.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Tolkunov A., Czuba W., Środa P., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V., Grad M., Guterch A., Kolomiyets K., Thybo H., Dannowski A., Flueh E. R., Legostaeva O., 2012. Velocity model of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE'99 transect. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins "Seismix 2012"*. Beijing 2012. Book of abstracts. P. 85.
- Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A., 2015. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.* 201(1), 406—428.
- Tarassenko L., 1998. A guide to Neural Computing Application. New York-Toronto: J. Wily & Sons Inc., 160 p.
- Thybo H., Janik T., Omelchenko V. D., Grad M., Garetzky R. G., Belinsky A. A., Karatayev G. I., Zlotzki G., Knudsen M. E., Sand R., Yliniemi J., Tiira T., Luosto U., Komminaho K., Giese R., Guterch A., Lund C.-E., Kharitonov O. M., Ilchenko T., Lysynchuk D. V., Skobolev V. M., Doody J. J., 2003. Upper lithospheric seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian Shield along the EUROBRIDGE'97 profile. *Tectonophysics* 371, 41—79.

Neural network model field of the first arrival of seismic waves in Ukraine

© M.A. Lazarenko, O.A. Gerasimenko, N.N. Ostapchuk, 2016

Application of DSS data of seismic studies in Ukraine to build models of neural network for time arrival field of seismic signals that allow to construct hodographs of longitudinal waves along arbitrarily oriented sections in regions that do not have seismic observations or to adjust velocity section applying one of the methods of hodograph inversion has been proposed. Comparison of the simulated time of longitudinal wave arrival with those ones that were registered in Ukraine has been made.

Key words: neural network simulation, time of longitudinal wave arrival, seismic research, hodograph.

References

- Grad M., Gryn D., Guterch A., Keller R., Lang R., Ling-si S., Lysynchuk D., Lysynchuk E., Omelchenko V., Starostenko V., Stovba S., Thybo H., Tolkunov A., Janik T., 2003. DOBRE-99: the structure of the Earth's crust along the profile of Mariupol Donbass—Belovodsk. *Fizika Zemli* (6), 33—43 (in Russian).
- Ichenko T.V., 2002. The results of research by the NHS along geotransekta EUROBRIDGE-97. *Geofizicheskii zhurnal* 24(3), 67—76 (in Russian).
- Kulagin V.P., Maksimova M., 2013. Convergence of inverse problems in geodesy. *Nauki o Zemle* (2-3), 47—50 (in Russian).
- Lithosphere of Central and Eastern Europe. Geotransverse IV, VI, VIII, 1988. Ed. A.V. Chekunov. Kiev: Naukova Dumka, 172 p. (in Russian).
- Lysynchuk D., Lysynchuk E., Omelchenko V., 2002. Modeling of wave fields in the interpretation of data on the example of the NHS Profile DOBRE-99. *Collection of scientific works NMAU* 4(13), 84—87 (in Russian).
- Sollogub V.B., 1986. Lithosphere Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 86 p. (in Russian).
- Sollogub V.B., Chekunov A.V., 1975. Deep structure and evolution of the Earth's crust. In: Problems of Earth Physics in Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 118—153 (in Russian).
- Starostenko V.I., Omelchenko V.D., Lysynchuk D.V., Legostaeva O.V., Gryn D.M., Kolomiets K.V., 2009. Study the deep structure of the crust and upper mantle in the profile NHS Debrecen—Mukacheve—Rivne (project PANCAKE-08). *Geoinformatika* (2), 25—29 (in Ukrainian).
- Starostenko V., Omelchenko V., Lysynchuk D., Legostaeva O., Gryn D., Kolomiets K., 2011. Geophysical study of the deep structure of the crust and upper mantle of some major geological structures of the East European Craton to the Adriatic Sea. *Ukrainsko-Makedonskiy naukoviy zbirnyk* (is. 5), 365—371 (in Ukrainian).
- Haykin S., 2006. Neural networks: the full course. Moscow: Publ. House "Williams", 1103 p. (in Russian).
- Chekunov A.V., 1972. Crustal structure and tectonics of the south of the European part of the USSR. Kiev: Naukova Dumka, 52—92 (in Russian).
- Janik T., Środa P., Czuba W., Lysynchuk D., Kolomiets K., 2014. The GEORIFT 2013 wide-angle seismic profile, preliminary results GEORIFT 2013 Working Group. *16th SEISMIX International Symposium*. Barcelona 2014. Book of abstracts. P. 24.
- Nelson G.D., Vidale J.E., 1990. Earthquake Locations by 3D Finite-Difference Travel Times. *Bull. Seism. Soc. Amer.* 80(2), 359—410.
- Schoenberg M., Sayers S.M., 1995. Seismic Anisotropy of Fractured Rocks. *Geophysics* 60(1), 204—211.
- Starostenko V., Janik T., Kolomiyets K., Czuba W., Środa P., Grad M., Kováč I., Stephenson R., Lysynchuk D., Thybo H., Artemieva I.M., Omelchenko V., Gintov O., Kutas R., Gryn D., Guterch A., Hegedüs E., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A., 2013a. Seismic velocity model of the crust and upper mantle along profile PANCAKE across the Carpathians between the Pannonian Basin and

- the East European Craton. *Tectonophysics* 608, 1049—1072.
- Starostenko V., Janik T., Lysynchuk D., Środa P., Czuba W., Kolomiyets K., Aleksandrowski P., Gintov O., Omelchenko V., Komminaho K., Guterch A., Tiira T., Gryn D., Legostaeva O., Thybo H., Tolkunov A., 2013b. Mesozoic (?) Lithosphere-scale buckling of the East European Craton in southern Ukraine: DOBRE-4 deep seismic profile. *Geophys. J. Int.* 195(2), 740—766.
- Starostenko V., Janik T., Stephenson R., Gryn D., Tolkunov A., Czuba W., Środa P., Sydorenko G., Lysynchuk D., Omelchenko V., Grad M., Guterch A., Kolomiyets K., Thybo H., Dannowski A., Flueh E.R., Legostaeva O., 2012. Velocity model of the crust and upper mantle at the southern margin of the East European Craton (Azov Sea-Crimea-Black Sea area), DOBRE-2 & DOBRE'99 transect. *The 15th International Symposium on Deep Seismic Profiling of the Continents and Their Margins "Seismix 2012"*. Beijing 2012. Book of abstracts. P. 85.
- Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., Volfman Y., Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A., 2015. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian Platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and the Crimean Peninsula. *Geophys. J. Int.* 201(1), 406—428.
- Tarassenko L., 1998. A guide to Neural Computing Application. New York-Toronto: J. Wiley & Sons Inc., 160 p.
- Thybo H., Janik T., Omelchenko V.D., Grad M., Garetzky R.G., Belinsky A.A., Karatayev G.I., Zlotzki G., Knudsen M.E., Sand R., Yliniemi J., Tiira T., Luosto U., Komminaho K., Giese R., Guterch A., Lund C.-E., Kharitonov O.M., Ilchenko T., Lysynchuk D.V., Skobolev V.M., Doody J.J., 2003. Upper lithospheric seismic velocity structure across the Pripyat Trough and the Ukrainian Shield along the EUROBRIDGE'97 profile. *Tectonophysics* 371, 41—79.