

dc\_995\_15

MTA Doktori Értekezés Tézisei

**NAGYPONTOSSÁGÚ FÖLDRENGÉS HELYMEGHATÁROZÁS**

**Bondár István**

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Geodéziai és Geofizikai Intézet

Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium

Budapest

2015

## 1 Bevezetés

A szeizmikus események - földrengések és robbantások - pontos helymeghatározása alapvető fontosságú nemcsak a földtudományi alap kutatások (a Föld belső szerkezetére a földrengésekből következtethetünk) hanem megbízható földrengés veszélyeztetettség és kockázat tanulmányok számára is. A földrengések helymeghatározásának és bizonytalanság becslésének hosszú története van, de az elmúlt húsz év során az egyre megbízhatóbb helymeghatározásokat szolgáló módszerek kifejlesztésére irányuló kutatásokat a Comprehensive Test-Ban-Treaty (CTBT) hatékony monitorozása motiválta.

A Group of Scientific Experts felismervén, hogy a ritka, teleszeizmikus International Monitoring System (IMS) szeizmológiai állomáshálózata nem kielégítő pontossággal határozza meg az események helyét, elindította az IMS lokáció kalibrációját. Ez magába foglalta egy olyan referencia esemény adatbázis létrehozását, ami alkalmas a kifejlesztendő sebességmodellek és menetidő korrekciók tesztelésére és kiértékelésére, valamint új helymeghatározó algoritmusok kidolgozását, amik elérik a CTBT verifikációjához szükséges helymeghatározási pontosságot. Ez a folyamat még ma is tart, és büszke vagyok arra, hogy a kezdetektől fogva aktív részese lehettem, lehetek az IMS hálózat kalibrációjának. Ebben a dolgozatban azokat az eredményeket foglalom össze, amik még az IMS hálózat kalibrációján is túlmutatnak és globális jelentőséggel bírnak.

## 2 Tudományos eredmények összefoglalása

1. Ground truth események szükségesek a különböző helymeghatározó algoritmusok, menetidő korrekciók és a Föld háromdimenziós modelljeinek fejlesztésére, ellenőrzésére és kiértékelésére. Létrehoztam a ground truth adatbázist, amit 2009-ben a International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior (IASPEI) adaptált mint a IASPEI Reference Event Listát. A Bondár et al. (2004a) és Bondár és McLaughlin (2009a) GT5 események azonosítására kifejlesztett szelekciós kritériumok széles körben elfogadottá váltak és nagyban hozzájárultak a ground truth adatbázis létrehozásához és minőség biztosításához. A IASPEI Reference Event List felügyeletét és minőség biztosítását a IASPEI Working Group on Reference Events for Improved Locations keresztül továbbra is gyakorlom.

2. Kifejlesztettem a hibrid, multi-esemény meghatározó HDC-RCA módszert (Bondár et al., 2008) ami esetenként GT5 pontosságú hipocentrumokat szolgáltat. A HDC-RCA algoritmus előbb a teleszeizmikus adatok segítségével meghatározza az események precíz, egymáshoz képesti relatív pozícióját, majd pedig lokális adatokkal és egy helyi sebességmodell segítségével meghatározza az abszolút helymeghatározás torzításának a becslését, és ezzel korrigálja az események hipocentrumát, hogy pontos helymeghatározásokat kapjon. Ezzel a módszerrel világszerte több mint kétezer GT5 földrengést lehetett azonosítani (Bondár et al. 2008; Bondár és McLaughlin 2009a).
3. Kimutattam, hogy a nem kielégítően modellezett háromdimenziós sebesség heterogenitásokon áthaladó egymáshoz közeli hullámok korrelált menetidő becslési hibákat okoznak, aminek figyelmen kívül hagyása a helymeghatározás szisztematikus torzításához és a megoldás bizonytalanságának alulbecsléséhez vezet. Ennek a feloldására fejlesztettem ki egy olyan algoritmust (Bondár és McLaughlin, 2009b), ami a teljes kovariancia mátrix *a priori* becslésén keresztül veszi figyelembe a korrelált modell hiba szerkezetet.
4. A Bondár és McLaughlin (2009b) algoritmust fejlesztettem tovább (Bondár és Storchak, 2011) az International Seismological Centre (ISC) céljaira. Demonstráltam, hogy a Bondár és Storchak (2011) földrengés helymeghatározó algoritmus a Föld szeizmicitásának részletesebb képét adja, pontosabb helymeghatározásokkal és megbízható bizonytalanság becslésekkel.
5. Az ISC-GEM globális katalógus (Storchak et al., 2013, 2015; Bondár et al., 2015; Di Giacomo et al., 2015a, 2015b), ami az elmúlt 110 év közepes és nagy földrengéseit tartalmazza, az EHB és ISC helymeghatározó algoritmusok kétlépcsős alkalmazásával jött létre.
6. Továbbfejlesztettem az ISC lokátort. Az új verzió, iLoc lehetővé teszi az új International Seismic Format (ISF2) fileok olvasását és írását, valamint SeisComp3 adatbázisával való kommunikációt. Ez lehetővé tette az iLoc a Magyar Nemzeti Szeizmológiai Szolgálat eljárásaiba való integrálását is.

### 3 Az eredmények hasznosítása

A IASPEI Reference Event List folyamatosan bővül új GT0-5 eseményekkel és mára elengedhetetlen szerepet játszik nemcsak az IMS hálózat lokáció kalibrációjában, hanem regionális és globális sebességmodellek kiértékelésében is.

Az ISC Bulletin a Föld szeizmicitásának meghatározó összefoglalása, ami minden hozzáférhető mérési adatot magába foglal. A 2009 január 1 óta kipattant földrengések az új ISC algoritmussal (Bondár és Storchak, 2011) vannak meghatározva. Tekintve, hogy az ISC lokátor pontossága meghaladja az EHB (Engdahl et al., 1998) pontosságát, 2009 óta az éves EHB bulletin létrehozása szünetel. Jelenleg az ISC-nél előkészületek folynak a teljes ISC Bulletin újraszámolására az új lokátorral, ami az elkövetkező években fejeződik be.

Az ISC-GEM katalógus jelenleg a Föld műszeres adatokból meghatározott szeizmicitásának legpontosabb és leghosszabb rekordját képviseli és globális illetve regionális szintű földrengés veszélyeztetettség és kockázat tanulmányok kiindulópontjául szolgál.

Mind az ISC helymeghatározó algoritmus, mind az iLoc szoftver szabadon letölthető az ORFEUS szoftver archívumából.

#### 4 Az értekezés témakörében megjelent közlemények jegyzéke

- Bondár, I., E.R. Engdahl, A. Villasenor, J.Harris and D. Storchak, ISC-GEM: Global instrumental earthquake catalogue (1900-2009), II. Location and seismicity patterns, *Phys. Earth. Planet. Int.*, doi: 10.1016/j.pepi.2014.06.002, **239**, 2-15, 2015.
- Di Giacomo, D., I. Bondár, D.A. Storchak, E.R. Engdahl, P. Bormann and J.Harris, ISC-GEM: Global instrumental earthquake catalogue (1900-2009), III. Re-computed Ms and mb, proxy Mw, final magnitude composition and completeness assessment, *Phys. Earth. Planet. Int.*, doi: 10.1016/j.pepi.2014.06.003, **239**, 33-47, 2015.
- Storchak, D.A., Di Giacomo, D., E.R. Engdahl, J. Harris, I. Bondár, W.H.K. Lee, P. Bormann, and A. Villasenor, The ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009): Introduction, *Phys. Earth. Planet. Int.*, doi: 10.1016/j.pepi.2014.06.009, **239**, 48-63, 2015.
- Bondár, I., S.C. Myers and E.R. Engdahl, Earthquake location, M. Beer, I.A. Kougioumtzoglou, E. Patelli, I.S.K. Au (eds.) *Springer Encyclopedia of Earthquake Engineering*, doi:10.1007/978-3-642-36197-5\_184-1, Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, 2014.
- Di Giacomo, D., D.A. Storchak, N. Safranova, P. Ozgo, J. Harris, R. Verney and I. Bondár, A new ISC service: The bibliography of seismic events, *Seism. Res. Let.*, **85**, 354-360, 2014.
- Storchak, D.A. D. Di Giacomo, I. Bondár, I., E.R. Engdahl, J. Harris, W.H.K. Lee, A. Villasenor and P. Bormann, Public release of the ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009), *Seism. Res. Let.*, **84**, 810-815, 2013.

- Bondár, I., Identification and collection of ground truth events, Bormann, P. (Ed.), *New Manual of Seismological Observatory Practice (NMSOP-2)*, 10.2312/GFZ.NMSOP-2\_IS\_8.6, IASPEI, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam; <http://nmsop.gfz-potsdam.de>; doi: 10.2312/GFZ.NMSOP-2, 2012.
- Storchak, D.A., D. Di Giacomo, I. Bondár, J. Harris, E.R. Engdahl, W.H.K. Lee, A. Villasenor, P. Bormann and G. Ferrari, ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900-2009), *International Seismological Centre*, Final Report, 2012.
- Engdahl, E.R. and I. Bondár, Seismological networks, H. Gupta (Ed.), *Encyclopedia of Solid Earth Geophysics, Encyclopedia of Earth Sciences Series*, Part 16, 1324-1334, doi 10.1007/978-90-481-8702-7, Springer Science + Business Media B.V., 2011.
- Bondár, I., and D. Storchak, Improved location procedures at the International Seismological Centre, *Geophys. J. Int.*, **186**, 1220-1244, doi:10.1111/j.1365-246X.2011.05107.x, 2011.
- Bennett, T.J., V. Oancea, B.W. Barker, Y-L. Kung, M. Bahavar, B.C. Kohl, J.R. Murphy and I.K. Bondár, The Nuclear Explosion Database (NEDB): A new database and web site for accessing nuclear explosion source information and waveforms, *Seism. Res. Let.*, **81**, 12-25, 2010.
- Bondár, I. and K. McLaughlin, A new ground truth data set for seismic studies, *Seism. Res. Let.*, **80**, 465-472, 2009.
- Bondár, I. and K. McLaughlin, Seismic location bias and uncertainty in the presence of correlated and non-Gaussian travel-time errors, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **99**, 172-193, 2009.
- Bondár, I., E. Bergman, E.R. Engdahl, B. Kohl, Y-L. Kung, and K. McLaughlin, A hybrid multiple event location technique to obtain ground truth event locations, *Geophys. J. Int.*, **175**, 185-201, doi: 10.1111/j.1365-246X.2008.03867.x, 2008.
- Bondár, I., K. McLaughlin and H. Israelsson, Improved event location uncertainty estimates, *Science Applications International Corp.*, Final Report, AFRL-RV-HA-TR-2008-1074, 2008.
- Bondár, I., B. Kohl, E. Bergman, K. McLaughlin, H. Israelsson, Y-L. Kung and E.R. Engdahl, Global ground truth data set with waveform and improved arrival data, *Science Applications International Corp.*, Final Report, AFRL-RV-HA-TR-2007-1101, 2007.
- Bondár, I., B. Kohl, E. Bergman, K. McLaughlin, H. Israelsson, Y-L. Kung and E.R. Engdahl, Global ground truth data set with waveform and improved arrival data, *29th Monitoring Research Review*, 375-384, Denver, CO, September 25-27, 2007.
- Bondár, I., K. McLaughlin and H. Israelsson, Improved event location uncertainty estimates, *29th Monitoring Research Review*, 385-394, Denver, CO, September 25-27, 2007.
- Bondár, I., B. Kohl, E. Bergman, K. McLaughlin, H. Israelsson, Y-L. Kung, J. Given and E.R. Engdahl, Global ground truth data set with waveform and improved arrival data, *28th Seismic Research Review*, Orlando, FL, September 19-21, 2006.

- Bondár, I., K. McLaughlin and H. Israelsson, Improved event location uncertainty estimates, *28th Seismic Research Review*, Orlando, FL, September 19-21, 2006.
- Bondár, I., B. Kohl, E. Bergman, K. McLaughlin, H. Israelsson, Y-L. Kung, P. Piraino and E.R. Engdahl, Global ground truth data set with waveform and improved arrival data, *27th Seismic Research Review*, Palm Springs, CA, September 20-22, 2005.
- Bondár, I., K. McLaughlin and H. Israelsson, Improved event location uncertainty estimates, *27th Seismic Research Review*, Palm Springs, CA, September 20-22, 2005.
- Kohl, B., T. Bennett, I. Bondár, B. Barker, W.Nagy, C. Reasoner, H. Israelsson and P. Piraino, Development of a network data set for evaluating detection and network processing performance, *27th Seismic Research Review*, Palm Springs, CA, September 20-22, 2005.
- Bondár, I., E.R. Engdahl, X. Yang, H.A.A. Ghalib, A. Hofstetter, V. Kirichenko, R. Wagner, I. Gupta, G. Ekström, E. Bergman, H. Israelsson and K. McLaughlin, Collection of a reference event set for regional and teleseismic location calibration, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 1528-1545, 2004.
- Yang, X., I. Bondár, J. Bhattacharyya, M. Ritzwoller, N. Shapiro, M. Antolik, G. Ekström, H. Israelsson and K. McLaughlin, Validation of regional and teleseismic travel-time models by relocating GT events, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **94**, 897-919, 2004.
- Bondár, I, S.C. Myers, E.R. Engdahl and E.A. Bergman, Epicenter accuracy based on seismic network criteria, *Geophys. J. Int.*, **156**, 483-496, doi 10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x, 2004.
- Kohl, B., T.J. Bennett, I.K. Bondár, B.W. Barker, W.C. Nagy, C. Reasoner, J.A. Hanson, Development of a network data set for evaluating detection and network processing performance, *26th Seismic Research Review*, Orlando, FL, September 21-23, 2004.
- Bondár, I., McLaughlin, K., Yang, X., and Bhattacharyya, J., Assessing Location Improvements without Ground Truth Data, *Seism. Res. Let.*, **73**, 1, 2002.
- McLaughlin, K., I. Bondár, X. Yang, J. Bhattacharyya, H. Israelsson, R. North, V. Kirichenko, E.R. Engdahl, M. Ritzwoller, A. Levshin, N. Shapiro, M. Antolik, A. Dziewonski, G. Ekström, H. Ghalib, I. Gupta, R. Wagner, W. Chan, W. Rivers, A. Hofstetter, A. Shapira, and G. Laske, Seismic Location Calibration in the Mediterranean, North Africa, Middle East and Western Eurasia, *24th Seismic Research Review*, Ponte Vedra Beach, FL, September 17-19, 2002.
- Yang, X., I. Bondár, K. McLaughlin, R.G. North and W. Nagy, Path-dependent travel-time corrections for the International Monitoring System in North America, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **91**, 1831-1850, 2001.
- Bondár, I., X. Yang, R.G. North and C. Romney, Location Calibration Data for CTBT Monitoring at the Prototype International Data Center, *Pure appl. Geophys.*, **158**, 1-2, 19-34, 2001.

- Yang, X., I. Bondár, K. McLaughlin and R.G. North, Source Specific Station Corrections for regional phases at Fennoscandian stations, *Pure appl. Geophys*, **158**, 1-2, 35-57, 2001.
- McLaughlin, K., X. Yang, I. Bondár, J. Bhattacharyya, H. Israelsson, R. North, V. Kirichenko, Y. Kraev, E. R. Engdahl, M. Ritzwoller, A. Levshin, N. Shapiro, M. Barmin, M. Antolik, A. Dziewonski, G. Ekström, I. Gupta, R. Wagner, W. Chan, D.W. Rivers, A. Hofstetter, A. Shapira, M.G. Laske, and N. Cotte, Seismic Location Calibration in the Mediterranean, North Africa, Middle East, and Western Eurasia, *23rd Seismic Research Symposium*, Jackson Hole, WY, October 1-5, 2001.
- Bondár, I. and R.G. North, Development of Calibration Techniques for Potential use by the CTBT International Monitoring System, *Phys. Earth Planet. Int.*, **13**, 11-24, 1999.
- Bondár, I., R.G. North, and G. Beall, Teleseismic slowness-azimuth station corrections for the International Monitoring System seismic network, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **89**, 989-1003, 1999.
- Bondár, I., X. Yang, J. Wang, M. Bahavar, H. Israelsson, and K. McLaughlin, Tuning and calibration activities at the PIDC, *20th Seismic Research Symposium*, September 21-23, Santa Fe, NM, USA, 1-10, 1998.
- North, R.G., Bondár, I. and Ryaboy, V., New Regional Travel-Time Tables for the Baltic Shield Inferred from DSS Observations for Calibration of the International Monitoring System, *19th Annual Research Symposium on Monitoring a Comprehensive Test Ban Treaty*, September 23-25, Orlando, USA 115-124, 1997.

## 5 Közlemények egyéb témakörökből

- Woodward, R., H. Israelsson, I. Bondár, K. McLaughlin, R. Bowman and H. Bass, Understanding wind-generated infrasound noise, *27th Seismic Research Review*, Palm Springs, CA, September 20-22, 2005.
- Zivcic, M., I. Bondár and G.F. Panza, Upper Crustal Velocity Structure in Slovenia, *Pure Appl. Geophys.*, **157**, 131-146, 2000.
- Dufumier, H., Michelini, A., Du, Z., Bondár, I., Sileny, J., Mao, W., Kravanja, S. and Panza, G.F., Regional Structure Modeling and Source Inversion for the 1992 Roermond Earthquake, *J. Seismology*, **1**, 321-340, 1997.
- Bondár, I., Bus, Z., Zivcic, M., Costa, G. and Levshin, A., Rayleigh Wave Group and Phase Velocity Measurements in the Pannonian Basin, *Seismicity of the Carpatho-Balkan region, Proc. XV. Congress Carpatho-Balkan Geol. Assoc.*, Sept. 17-20, Athens, Greece, 73-86, 1997.
- Bondár, I., Hypocenter Determination of Local Earthquakes using Genetic Algorithm, *Acta Geod., Geophy. Montan. Hungarica*, **26**, 39-56, 1994.
- Bondár, I., Seismic Horizon Detection Using Image Processing Algorithms, *Geophysical Prospecting*, **40**, 785-800, 1992.

- Bondár, I., Prediction Ahead of the Bit Using VSP Corridor Trace, *Ann. Univ. Bud. Sect. Geophys. Meteo.*, **VIII**, 17-30, 1992.
- Bondár, I. and Tóth, L., The New Hungarian Open Seismological Station (Piszkés PSZ), (in Hungarian), *Magyar Geofizika*, **XXXIII**, 151-161, 1992.
- Bondár, I., Median Filtering in Geophysical Data Processing, *Ann. Univ. Bud. Sect. Geophys. Meteo.*, **VI-VII**, 3-14, 1991.
- Wéber, Z. and Bondár, I., Deriving Velocity Estimates from VSP Data: A Novel Approach Using Edge Detection, *Acta Geod., Geophys. Montan. Hungarica*, **26** 301-322, 1991.
- Bondár, I., Geofizikai munkahelyek felépítése, *Magyar Geofizika*, **XXVIII**, 46-51, 1987.
- Bácsa, I., I. Bondár and A. Meskó, Szeizmikus attribútumok számítása, *Magyar Geofizika*, **XXVIII**, 53-74, 1987.
- Bácsa, I. and I. Bondár, Stratigráfiai modellezés, *Magyar Geofizika*, **XXVIII**, 75-85, 1987.