

Magyarországi földrengések hipocentrumának és fészekmechanizmusának meghatározása teljes hullámforma inverzióval

WÉBER ZOLTÁN¹

OTKA nyilvántartási szám: F 029076

Z. WÉBER: Full waveform inversion of Hungarian earthquake data for hypocenter coordinates and focal mechanism

During the time period of 1999–2002, the problems associated with the waveform inversion of weak local earthquakes in the Pannonian region were investigated with the pecuniary assistance of the Hungarian Scientific Research Fund (OTKA). The main stress was laid on the determination of the hypocentral coordinates and focal mechanism (moment tensor) of the seismic events.

The depth dependent one-dimensional velocity model of the earth crust, needed by any waveform inversion procedure, has been estimated by the inversion of traveltimes data produced by controlled source deep seismic experiments. The P-wave velocities in the uppermost mantle beneath the Pannonian basin have been further refined by tomographically imaging the traveltimes of first Pn arrivals of regional earthquakes.

An algorithm for the inversion of short-period waveforms of weak local earthquakes has been worked out and implemented in order to retrieve the source mechanism, source time function, and hypocentral coordinates. For the statistical validation of the results the bootstrapping technique was used. The estimated uncertainties in the resulting moment tensor components can be plotted on the focal sphere in such a way, that the significance of the double-couple, CLVD, and volumetric parts of the source can be assessed. The source parameters for the inverted events have been arranged in a suitable data base.

1. Bevezetés

A szeizmológia egyik legfontosabb feladata a kipattant földrengések hipocentrumának és fészekmechanizmusának minél pontosabb meghatározása, valamint az így kapott eredmények felhasználása a recens kéregmozgások irányának és mértékének megállapításában. Kutatásaim célja a hazánkban kipattant és digitális technikával regisztrált földrengések fészekparamétereinek (hipocentrumának és momentumtenzorának) meghatározása, az eredmények adatbázisban való rendszerezése és értelmezése volt. Ezzel egyidejűleg pontosítani kívántam a hazánk területére jellemző egydimenziós sebességmodellt is.

Hazánk területe közepes szeizmikus aktivitást mutat és a többnyire kis energiájú rengések digitális regisztrálására csupán mintegy egy évtizede van lehetőség. A lakosság által nem is érzékelt gyenge rengéseket gyakran csak néhány állomás rögzíti. Ezért a tervezett feladat elvégzéséhez olyan módszert alkalmaztam, amely a rendelkezésre álló adatokból a lehető legtöbb információt képes kinyerni. Választásom a teljes hullámforma inverzió módszerére esett. Ez az eljárás az inverziós feladat megoldásához a műszerek által regisztrált összes adatot, azaz a teljes hullámformát felhasználja. Az eljárás lényege az, hogy az ismeretlen fizikai paraméterek (fészekmechanizmus, hipocentrum) értékeit addig változtatjuk, míg a számított szintetikus szeizmogram nem mutat valamilyen értelemben vett jó egyezést a mért szeizmogrammal. Az eljárás igen számításgigényes, azonban a ma már rendelkezésünkre álló számítástechnikai eszközök lehetővé teszik alkalmazását.

A vizsgált földrengések fészekparamétereit tartalmazó átfogó adatbázis elsősorban a hazánk tektonikájával, szeizmicitásával, a recens kéregmozgások és feszültségirányok kutatásával foglalkozó földtudományi szakemberek számára nyújthat komoly segítséget. Ismerve a földrengés hipocentrumát, megállapítható, hogy az melyik ismert vagy kevésbé ismert törésvonallal van kapcsolatban, a fészekmechanizmus pedig az érintkező közetelemek mozgásirányáról és a mozgás mértékéről árulkodik. A hazánkban leggyakrabban előforduló fészekmechanizmus, az átlagos fészekmélység és a jellemző sebességmodell ismerete arra is lehetőséget ad, hogy szintetikus szeizmogramok számításával megbecsülhessük, milyen hatása lehet egy földrengésnek valamely szűkebb régióban. Minél több rengés fészekmechanizmusáról vannak adataink, annál megbízhatóbb következtetéseket vonhatunk le belőlük.

A kutatási eredmények között feltétlenül meg kell említenem a tényleges adatfeldolgozást megelőző módszertani kutatás végtermékét, a számítógépes programcsomagot is. Egy inverziós módszer kidolgozása, megvalósítása és használatba állítása általában számos elméleti megfontolást és kutatást igényel, melynek eredményeire mindig kíváncsi a szakmai közönség.

Az alábbiakban röviden összefoglalom a kutatási időszak alatt elért új eredményeket. Az egyes témakörök részletes tárgyalását a hivatkozott publikációkban találja meg az érdeklődő olvasó.

2. Sebességeloszlás a Pannon-medencében

A kutatás során az inverzióhoz használt sebességmodellt ismertnek tételezem fel. Annak érdekében, hogy az általam felállított és az inverzió során alkalmazott sebességmodell minél megbízhatóbb legyen, mesterséges szeizmikus forrá-

¹ MTA GGKI Szeizmológiai Observatórium, H-1112 Budapest, Meredek u. 18.

sok által kibocsátott rugalmas hullámok menetidőit dolgoztam fel. A hazánkban végzett CELEBRATION-2000 elnevezésű mélyszeizmikus mérések során alkalmazott források jeleit a szeizmológiai hálózat is regisztrálta. Az így kapott menetidőadatok alapján klasszikus módszerekkel fel tudtam állítani egy olyan átlagos egydimenziós sebességmodellt, amely a földkéregben négy réteget tartalmaz. Az egydimenziós sebességmeghatározáson kívül tomográfias vizsgálatokat is végeztem, melynek célja a Moho felület alatti térrészre, azaz a legfelső köpenyre jellemző longitudinális hullámterjedési sebesség horizontális eloszlásának meghatározása volt.

A Pn hullámok olyan refraktált P hullámok, amelyek útjuk nagy részét közvetlenül a földkéreg és a köpenyt elválasztó Moho határfelület alatt, a legfelső köpenyben teszik meg. A Pn beérkezési idők tomografikus inverziójával tehát a hullámsebesség laterális eloszlását becsülhetjük meg a földköpeny legfelső részében. A Pn sebesség laterális eloszlása függ a köpeny hőmérsékletétől, az anyagösszetételtől és a nyomásviszonyoktól. A Pn sebesség eloszlásának megismerése tehát fontos információkat nyújt a kéregfejlődést befolyásoló tektonikai deformációk megismeréséhez.

Annak érdekében, hogy jobban megismerjük, megérthessük a Pannon-medence kialakulását, regionális földrendések Pn menetidőinek tomografikus inverziójával meghatároztam a legfelső köpenyben érvényes Pn sebességek eloszlását [WÉBER 2002].

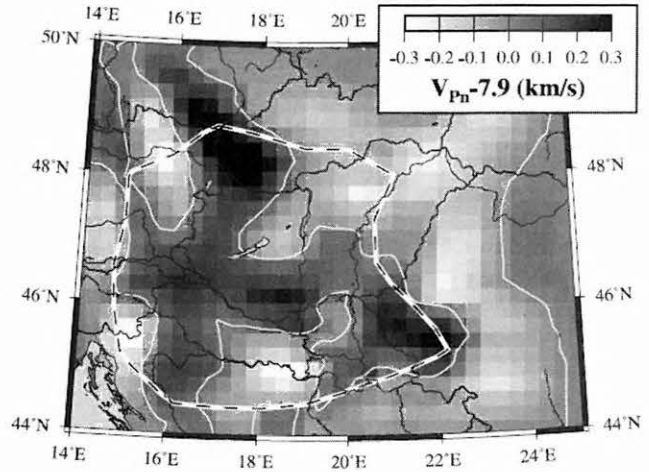
A Pn menetidőket az International Seismological Centre (ISC) adatai, valamint az MTA Szeizmológiai Observatóriumában elérhető adatok alapján gyűjtöttem ki. Szigorú feltételeken alapuló válogatás után mintegy 4216 menetidőt tartottam meg a további feldolgozás céljára (52 állomás, 393 földrengés). A vizsgált terület a 44–50. szélességi és a 14–25. hosszúsági fokok között terül el, amelyet a tomografikus inverzió végrehajtása céljából 50 km x 50 km-es cellákra osztottam fel. A cellák — és így az ismeretlen sebességértékek száma — 238-nak adódott. Az inverzió végrehajtásához olyan homogén kezdeti modellt definiáltam, amelyben a terjedési sebesség megegyezik az átlagos Pn sebességgel. Ez az átlagos sebesség — a mérési adatokra illesztett egyenes menetidőgörbe meredekségéből számolva — 7,9 km/s-nak adódott. A tomografikus egyenletrendszer megoldása a Pn sebességek átlagostól való eltérését adja meg.

A tomografikus egyenletrendszer felállításához a HEARN [1984] és HEARN, NI [1994] által ismertetett eljárást alkalmaztam, míg az egyenletrendszert az SVD csonkítás módszerével oldottam meg [XU 1998]. Mint ismeretes, a tomográfias mátrix SVD felbontását és általánosított inverzét ismerve könnyen meghatározható a kapott eredmény felbontása és így megbízhatósága. A 1. ábrán bemutatott Pn sebességanomália-térképen a megbízhatónak ítélt terület külső határát vastag fehér görbe jelöli.

Az események és az állomások erősen inhomogén eloszlása miatt a sugarak eloszlása is igen inhomogén. Ezért a megoldás felbontása a vizsgált terület nagy részén nem elégséges. Mindazonáltal a megbízható eredményeket tartalmazó területen jellegzetes anomáliák figyelhetők meg.

Az átlagos kompressziós hullámsebesség a Pannon-medence alatti legfelső köpenyben 7,9 km/s, ami jóval alacsonyabb a 8,1 km/s-os kontinentális átlagnál. Ez elsősorban a Moho mélységében tapasztalható magas hőmérsékletnek

tulajdonítható. Az Északi-középhegység alatt, ahol a közepe miocénben aktív vulkáni tevékenység folyt, még alacsonyabb (7,6–7,7 km/s) sebességértékek adódtak. Pozitív sebességanomáliákat láthatunk Magyarország nyugati-déli nyugati határai mentén, valamint a Pannon-medence és a Déli-Kárpátok találkozásánál, ahol a sebesség eléri a 8,1 km/s-ot. Az Alföld alatt átlagos (7,9 km/s) sebességeket találhatunk.



1. ábra. A Pn sebességanomáliák eloszlása a Pannon-medencében. Az anomália értékeket a 7,9 km/s átlagos sebességhez kell viszonyítani. A vékony fehér kontúrvonal a zérus sebességanomáliát jelöli. A vastag fehér görbe a megbízható eredményeket tartalmazó terület külső határát jelöli ki

Fig. 1. Pn velocity in the Pannonian basin and its surrounding regions relative to an average velocity of 7.9 km/s. The thin white contour line denotes zero velocity anomaly. The resolution can be considered as satisfactory only inside the region surrounded by the white closed curve superimposed on the image

3. Hullámforma inverzió

A hullámforma inverzió lényege abban áll, hogy egy alkalmasan megválasztott algoritmust követve megkeressük az ismeretlen fizikai paraméterek (fészekmechanizmus, hipocentrum) azon értékeit, melyek mellett a számított szintetikus szeizmogram valamilyen értelemben a lehető legjobban közelíti a mért szeizmogramot. Mivel a paraméterek és a hullámformák között általában nemlineáris függvénykapcsolat áll fenn, olyan iterációs eljárást kell követnünk, amely minden egyes iterációs lépés alkalmával megold egy direkt feladatot (modellezést) és egy lineáris egyenletrendszert.

Amennyiben a rengés hipocentrumának koordinátái és a földkéregre jellemző sebességmodell ismertek, a momentumtenzor meghatározását célul tűző teljes hullámforma inverzió lineáris feladattá egyszerűsödik. Mivel a földrengés által generált hullámformát (source time function, rövidítve STF) sem ismerjük, a momentumtenzor hat független komponensét egy-egy időszornak tekinthetjük. Az időtől függő momentumtenzor elemeire egy olyan lineáris egyenletrendszert kapunk, amelynek mátrixát lényegében a hipocentrum és a sebességmodell ismeretében számított Green-függvények alkotják [STUMP, JOHNSON 1977; AKI, RICHARDS 1980; SIPKIN 1982; KOCH 1991a,b]. Az egyenletrendszernek azt a megoldását keressük, amely mellett a

számított és mért szeizmogramok közötti négyzetes eltérés minimális. Ilyen megoldáshoz jutunk pl. a csonkított szinguláris dekompozíció (TSVD) alkalmazásával [pl. AKI, RICHARDS 1980; XU 1998]. Ezt a módszert alkalmazva nemcsak az ismeretlenek legkisebb négyzetes értelemben vett legjobb értékét kapjuk meg, hanem azok hibáját is megbecsülhetjük. A csonkítás mértékének változtatásával befolyásolhatjuk az elérhető felbontást és modellhibát.

Amikor lokális földrengések hullámformáit kell feldolgoznunk, a szintetikus szeizmogramokat (Green-függvényeket) kis epicentrális távolságok mellett és viszonylag magas frekvenciákig kell kiszámolnunk, ami végeredményben azt jelenti, hogy a Green-függvények erősen függenek a hipocentrum koordinátáitól. Lokális rengések hullámforma inverziója során tehát nem tekinthetünk el attól, hogy a hipocentrumot is ismeretlennek tekintjük. Ez pedig az inverziós probléma nemlinearitását eredményezi.

Az alkalmazott eljárás során a hipocentrum koordinátáit egy háromdimenziós rácsháló pontjaiban keressük (grid search): a rácsháló minden egyes pontjára mint hipocentrumra elvégezzük a lineáris inverziót, majd a legjobb illeszkedést produkáló megoldást tekintjük végső eredménynek [WÉBER 2004].

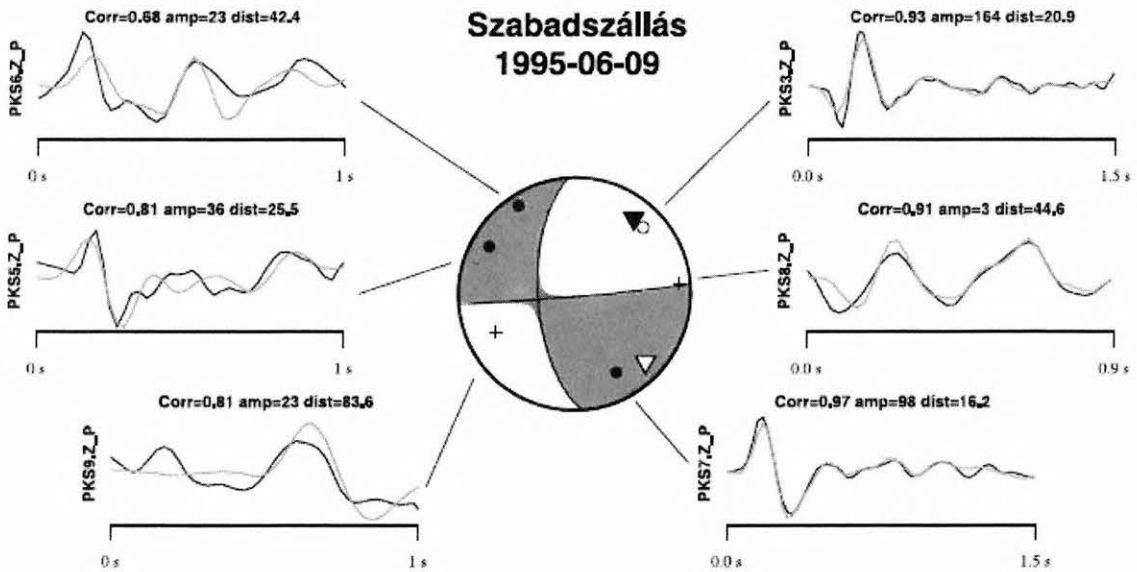
A geofizikai inverzió egyik kulcsfontosságú része a kapott eredmények megbízhatóságának becslése. Esetünkben a mérési adatok hibája és a pontatlan sebességmodell alkalmazásából eredő hibák nem, vagy csak nehezen becsülhetők, valamint ezen hibáknak az eredmények hibájára gyakorolt hatását nemlineáris függvénykapcsolat írja le. Az inverziós megoldás megbízhatóságát így csupán statisztikai módszerekkel becsülhetjük meg.

Az általam alkalmazott bootstrap inverzió lényege, hogy a rendelkezésünkre álló mérési adatokból új mérési adatsorokat hozunk létre, majd ezeken újra elvégezzük az inverziót [TICHELAAER, RUFF 1989]. Egy-egy bootstrap adatsort úgy állítunk elő, hogy N adatot véletlenszerűen kiválasztunk az

eredeti N mérési adatból oly módon, hogy egyes eredeti adatok többször is előfordulhatnak az új adatsorban. Bizonyítható, hogy néhány száz bootstrap inverzió során kapott eredmények tapasztalati eloszlása jól közelíti a valódi eloszlást, és így ezzel a módszerrel megfelelő képet kaphatunk a megoldás megbízhatóságáról [EFRON, TIBSHIRANI 1986]. Ez az eljárás tetemes számítógépes futási időt igényel, de cserében a becsült konfidenciaintervallumok alapján megállapíthatjuk például, hogy az inverzió során kapott momentumtenzor izotróp és/vagy CLVD komponensei szignifikánsak-e, vagy nagyságuk a hibahatáron belül vannak [WÉBER 2004]. A momentumtenzor sajátengelyeinek, azaz a P és T tengelyek irányának megbízhatóságát ismernünk kell akkor is, amikor meg kívánjuk becsülni egy adott térségben uralkodó feszültségtér fő irányait.

Az előzőekben ismertetett inverziós eljárás illusztrálása érdekében az alábbiakban bemutatok egy konkrét alkalmazási példát. A feldolgozásra kiválasztott esemény hazánk középső részén, Szabadszállás körzetében pattant ki. A számítások elvégzése előtt szükség volt a hullámformák gondos válogatására és megfelelő előkészítésére. Az inverzió során az STF-et és a hipocentrumot is ismeretlennek vettem és azt is megengedtem, hogy a momentumtenzor a legáltalánosabb alakját vegye fel. (Az alkalmazott eljárás lehetővé tesz olyan kikötést, miszerint a momentumtenzor nem tartalmazhat izotróp összetevőt. Ilyenkor a momentumtenzornak csupán öt független komponense létezik.)

A 2. ábra a Szabadszállás mellett 1995. június 9-én kipattant földrengés mért hullámformáit (fekete görbe) valamint az inverzióval kapott fészekparaméterek mellett számított szintetikus szeizmogramokat (szürke görbe) hasonlítja össze. A hullámformák feletti számok rendre a következő jelentéssel bírnak: normalizált korreláció, maximális amplitúdó nanométerben és az epicentrális távolság km-ben. Az ábra közepén az esemény fészekmechanizmusa látható klasszikus „strandlabda” ábrázolásban.

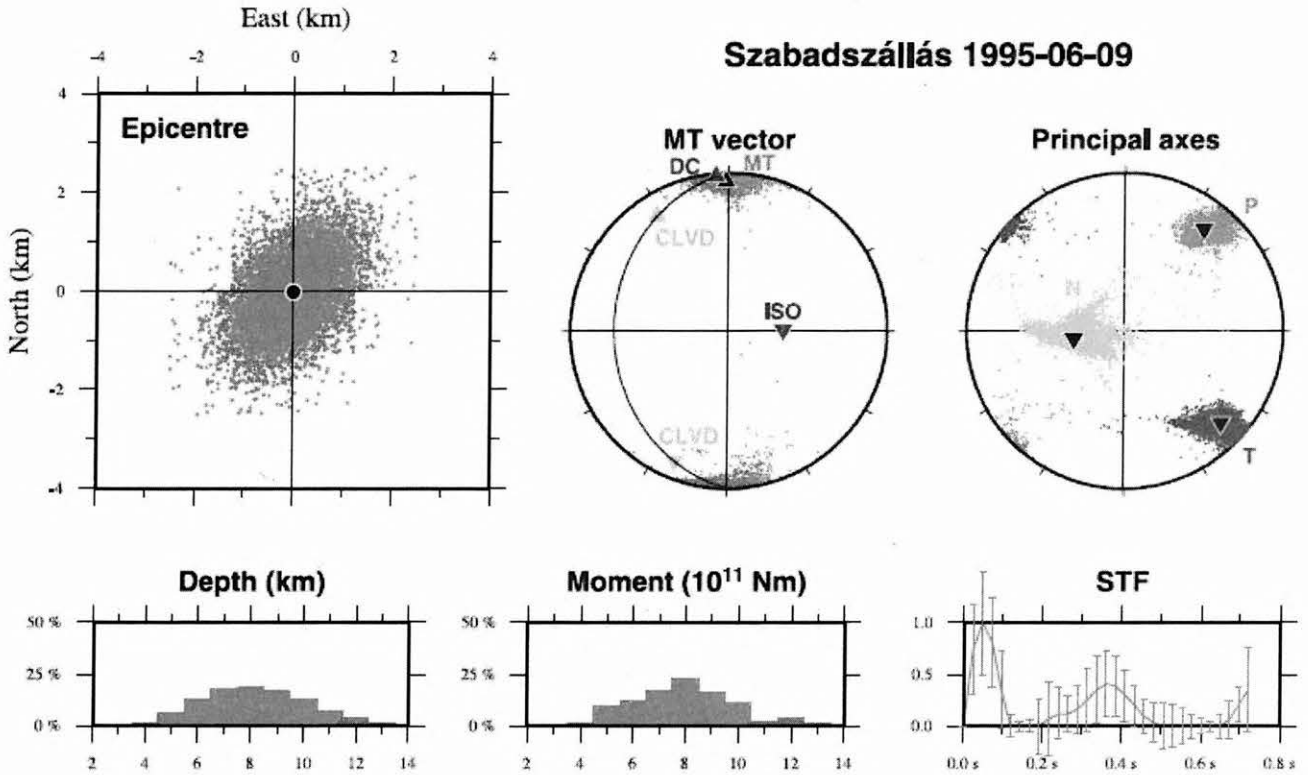


2. ábra. Az 1995. június 9-én, Szabadszállás környékén kipattant földrengés hullámformái és legvalószínűbb fészekmechanizmusa. Az észlelt szeizmogramok (fekete görbék) egy 1–5 Hz-es sávszűrőn estek át az inverzió előtt. A szintetikus szeizmogramokat (szürke görbék) az inverzióval kapott forrásparaméterek alapján számítottuk

Fig. 2. Waveform comparison and best focal mechanism for the local event that occurred on June 9, 1995 in Szabadszállás, Hungary. The observed seismograms (black lines) are band-pass filtered with cut-off frequencies of 1 and 5 Hz. The synthetic waveforms (gray lines) are computed using the inverted source parameters

A 3. ábra a számított fészekmechanizmus különböző paramétereinek eloszlását szemlélteti histogramok és pontfelhők segítségével. A jobb felső ábra a bootstrap inverzió során kapott számos momentumtenzor sajátengelyeinek fokális gömbön való elhelyezkedését mutatja. Jól látható, hogy a P tengely, amely jó közelítéssel a kompressziós feszültség irányát adja meg, ÉK–DNY orientációjú. A momentumtenzor sajátvektorainak sajátértékek szerinti súlyozott összege egy vektort eredményez, amely szintén jól jellemzi a fészekmechanizmust. Ezeket a vektorokat ábrázolja a felső sor középső ábrája, amely a tiszta double-

couple (DC), CLVD és izotróp (ISO) komponensek helyzetét is jelöli [RIEDEL, JORDAN 1989]. MT jelöli a legvalószínűbb megoldást. A megrajzolt főkörre eső MT vektorok nem tartalmaznak izotróp összetevőt. Ez az ábrázolási mód lehetőséget ad arra, hogy az MT vektorokat jelképező pontfelhő helyzete alapján következtetéseket vonjunk le arra vonatkozóan, hogy a megoldásban szereplő CLVD és/vagy izotróp összetevők szignifikáns elemei-e a megoldásnak. Esetünkben sem az izotróp, sem a CLVD komponens nem szignifikáns.



3. ábra. Az 1995. június 9-i esemény forrásparamétereinek eloszlása. Az epicentrum bizonytalanságát ábrázoló pontfelhő origója egybeesik az *a priori* epicentrummal. A forrásfüggvényen (STF) ábrázolt hiba a 95%-os konfidencia szintnek felel meg. A momentumtenzor (MT) eloszlásának illusztrálásához RIEDESEL, JORDAN [1989] módszerét alkalmaztuk

Fig. 3. Histograms and scatter density plots of the source parameters obtained for the 1995 June 9 event. The origin of the epicentral scatter plot coincides with the *a priori* epicentre. The error bars shown on the plot of the source time function (STF) are constructed for the 95% confidence level. For displaying the distribution of the moment tensor (MT) solutions, the method of RIEDESEL, JORDAN [1989] is employed

4. A kutatási téma további lehetséges irányai

A kutatás folytatásának legfontosabb iránya a fészekmechanizmust is leíró adatokkal kiegészített földrengés adatbázis minél teljesebb kiépítése. Ezzel kapcsolatban fontosnak tartom azt is, hogy ez az adatbázis mihamarabb könnyen elérhető legyen a nagyközönség, de főleg a szakmai közönség számára. Az ennek érdekében létrehozandó internetes honlap készítése jelenleg folyamatban van.

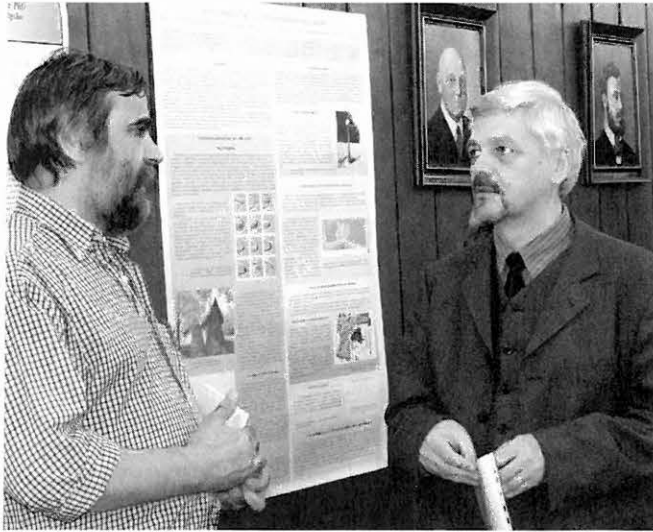
Egy-egy kutatási terület tektonikájának megismeréséhez nélkülözhetetlen a feszültségtér fő irányának ismerete. Kellő számú esemény momentumtenzorának — pontosabban azok sajátvektorainak (P -, T - és N -tengelyeinek) —

ismeretében, erre a célra külön kidolgozott inverziós eljárással, a feszültségtér iránya megbecsülhető [GEPHART, FORSYTH 1984; ANGELIER 1990]. Elegendő számú esemény fészekmechanizmusának ismerete tehát lehetőséget teremt arra, hogy az ország egyes területein meghatározzuk az uralkodó feszültségirányokat.

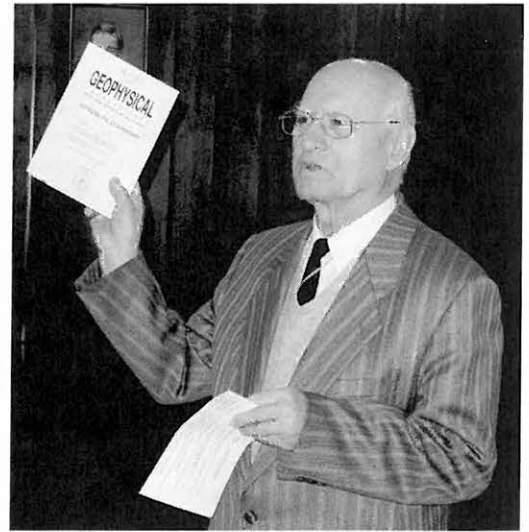
Ahhoz azonban, hogy a fenti célokat elérjük, elkerülhetetlennek tartom a további szoftverfejlesztést is. A projekt befejezése óta történtek már lépések ebben az irányban [WÉBER 2005, 2006], de ennek tárgyalása már egy másik OTKA-kutatás keretébe tartozik.

HIVATKOZÁSOK

- AKI K., RICHARDS P. 1980: Quantitative Seismology: Theory and Methods. Freeman, San Francisco
- ANGELIER J. 1990: Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress — III. A new rapid direct inversion method by analytical means. *Geophys. J. Int.* **103**, 363–376
- EFRON B., TIBSHIRANI R. 1986: Bootstrap methods for standard errors, confidence intervals, and other measurements of statistical accuracy. *Stat. Sci.* **1**, 54–77
- GEPHART J. W., FORSYTH D. W. 1984: An improved method for determining the regional stress tensor using earthquake focal mechanism data: application to the San Fernando earthquake sequence. *J. Geophys. Res.* **89** (B11), 9305–9320
- HEARN T. M. 1984: Pn travel times in Southern California. *J. Geophys. Res.* **89**, 1843–1855
- HEARN T. M., NI J. F. 1994: Pn velocities beneath continental collision zones: the Turkish–Iranian Plateau. *Geophys. J. Int.* **117**, 273–283
- KOCH K. 1991a: Moment tensor inversion of local earthquake data — I. Investigation of the method and its numerical stability with model calculations. *Geophys. J. Int.* **106**, 305–319
- KOCH K. 1991b: Moment tensor inversion of local earthquake data — II. Application to aftershocks of the May 1980 Mammoth Lakes earthquakes. *Geophys. J. Int.* **106**, 321–332
- RIEDEL M. A., JORDAN T. H. 1989: Display and assessment of seismic moment tensors. *Bulletin of the Seismological Society of America* **79**, 85–100
- SIPKIN S. A. 1982: Estimation of earthquake source parameters by the inversion of waveform data: synthetic waveforms. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **30**, 242–259
- STUMP B. W., JOHNSON L. R. 1977: The determination of source properties by the linear inversion of seismograms. *Bulletin of the Seismological Society of America* **67**, 1489–1502
- TICHELAAAR B. W., RUFF L. J. 1989: How good are our best models? Jackknifing, bootstrapping, and earthquake depth. *EOS Trans. AGU* **70**, 593
- WÉBER Z. 2002: Imaging Pn velocities beneath the Pannonian basin. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* **129**, 283–300
- WÉBER Z. 2004: Bootstrap inversion of local earthquake data in the Pannonian basin. *Geophysical Transactions* **44**, 221–239
- WÉBER Z. 2005: Probabilistic waveform inversion for focal parameters of local earthquakes. *Acta Geod. Geoph. Hung.* **40**, 229–239
- WÉBER Z. 2006: Probabilistic local waveform inversion for moment tensor and hypocentral location. *Geophys. J. Int.* **165**, 607–621
- XU P. 1998: Truncated SVD methods for discrete linear ill-posed problems. *Geophys. J. Int.* **135**, 505–514



TÖRÖS Endre és SZARKA László



ÁDÁM Antal