

Az Északi-középhegységben és Szlovákia déli területein kipattant földrengések és robbantások összehasonlító elemzése

KISZELY M., GYŐRI E.

MTA CSFK GGI Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium, 1112 Budapest, Meredek utca 18.
E-mail: kiszely.marta@csfk.mta.hu; gyori.erzsebet@csfk.mta.hu

A földrengéskutatásban rendkívül fontos a mesterséges szeizmikus események elkülönítése a tektonikai folyamatokból származóktól. Jelen dolgozat a Mátra második legmagasabb csúcsán elhelyezett, piszkéstetői szeizmológiai állomáson (PSZ) detektált bányarobbantások és az Északi-középhegység és Szlovákia déli területén kipattant földrengések jellemző paramétereit elemzi. A PSZ állomás 8 bánya robbantásait regisztrálja rendszeresen, a terület szeizmikus aktivitása pedig a 2013. év elején jelentősen megemelkedett az $M_L4,8$ hevesi és az $M_L4,2$ érsekvadkerti rengések és az azokat követő számos utórengés miatt. A dolgozatban a szeizmikus események időbeli eloszlását, hullámforma- és spektrális tulajdonságait elemeztük.

Kiszely, M. Győri, E.: Comparative analysis of earthquakes and explosions occurred in the Northern Mountains, Hungary and the southern part of Slovakia

It is very important to separate the tectonic earthquakes from artificial seismic events in seismology. The present study analyzes the characteristics of earthquakes and blasts of quarries occurred in Northern Mountain, Hungary and Slovakia that were detected in the seismological station Piskéstető (PSZ). The PSZ station detects regularly the nearby microearthquakes and blasts originated from 8 different quarries. The natural seismic activity is significantly increased at the beginning of year 2013, when an $M_L4.8$ earthquake shocked the region of Heves, and $M_L4.2$ occurred at Érsekvadkert. These mainshocks were followed by many aftershocks. We analyzed the temporal distribution, the waveform and spectral properties of these seismic events.

Beérkezett: 2014. január 8.; *elfogadva:* 2014. március 1.

Bevezetés

Történelmileg a különböző atomcsendegyezmények ellenőrzése miatt építették ki az 1960-as években a Nemzetközi Standardizált Mérőállomás Hálózatot (Worldwide Standardized Seismograph Network, WWSSN), amelyet egységesített műszerekkel szereltek fel. Ekkor kezdődött a különböző elkülönítési módszerek kidolgozása, amelyek lehetővé tették a nukleáris robbantások kiszűrését a földrengések közül. Az atomrobbantások kivitelezési technikájának finomodása miatt – mivel szerették volna azokat eltitkolni – már egyre kisebb méretű szeizmikus jeleket kellett elemezni, ami a mérőállomások számának gyarapodását és azok érzékenységeinek növelését eredményezte. A nemzeti hálózatok kiépülésével pedig már nemcsak az atomrobbantások és a nagyobb földrengések, hanem a kisebb ipari és bányarob-

bantások is a földrengésektől származó jelek közé kerültek, azok kiszűrése is szükségessé vált.

Magyarország területén is bővült a jó minőségű állomások száma (jelenleg, 2013 novemberében 12 állomás működik az MTA CSFK GGI keretében), így a detektált események között egyre több az olyan mikrorengés, amely már belesik a bányarobbantások mérettartományába. Több olyan terület is van hazánkban, ahol robbantásos bányaművelés és természetes szeizmikus aktivitás egyszerre van jelen. Ezek pl. a Vértes területe, a Börzsöny és a Mátra környéke. A robbantások helyét és idejét azonban sokszor nem ismerjük, vagy a bányakapitányságoktól kapott információkhoz csak hetek múlva lehet hozzájutni. Ezért robbantások is bekerülhetnek a katalógusba földrengésként, ami téves tektonikai következtetéseket, a földrengés-veszélyeztettség téves megítélését vonhatja maga után.

Hazánkban is szükségessé vált a robbantások és a mikrorengések jellemzőinek elemzése, hogy a kapott eredmények segítséget nyújtsanak a továbbiakban a mesterséges szeizmikus események kiszűrésére. Ez nagyon fontos például Budapest szeizmikus kockázatának elemzésénél is.

Jelen dolgozatban az elemzésre kiválasztott terület a Mát-ra környéke volt, ugyanis a Mát-ra tágabb környezete állandó szeizmikus aktivitást mutat. 2013-ban az $M_L 4,8$ hevesi és az $M_L 4,2$ érsekivádkerti, kisebb károkat okozó rengések és azok számos utórengése miatt megemelkedett a katalógusba került szeizmikus események száma (Gráczer et al. 2012, 2013). A Piszkestetőn (a Mát-ra második legmagasabb csúcsán) működő (PSZ) szeizmológiai állomás rendszeresen detektálja – a távolabbi nagyobb rengések mellett – a környék mikrorengéseit, valamint a Mátrában és a Szlovákia déli részén működő kőbányák robbantásait.

Elemzésünk során az időpont-, hullámformaadatok és spektrumjellegzetességek alapján elemeztük a PSZ állomás által detektált bányarobbantásokat és közeli földrengéseket. Összesen 204 eseményt vizsgáltunk, amelynek a fele volt robbantás, fele földrengés. Azt vártuk, hogy az egy bányából származó robbantások szeizmogramjai hasonlóak lesznek, mivel a szeizmikus hullámok által átszelt út a forrás és állomás között ugyanaz, és sikerül az ugyanabból a bányából származó robbantásokat azonosítani. A spektrumok elemzésével pedig a bányarobbantások esetében alkalmazott késleltetett robbantási módszer kimutathatóságát kerestük.

A cikkben először a bányarobbantások leggyakrabban használt elkülönítési módszereit mutatjuk be, majd az elemzésben érintett bányákat ismertetjük. A felhasznált robbantások és földrengések paramétereit két táblázatban foglaljuk össze. Végül a listában közölt hazai robbantások és földrengések esetére kapott eredményeket ismertetjük

Az elkülönítés módszerei

A megfigyelések szerint az ugyanabban a bányában végzett robbantások szeizmogramjai nagyon hasonlítanak egymásra, illetve a robbantások szeizmogramjain felismerhetőek olyan ismertető jegyek, amelyek arról árulkodnak, hogy nem földrengésből származtak. Ilyen például az, hogy az S hullámok kevésbé dominálnak, R_g hullámok jelennek meg a regisztrátumon, az első beérkezés iránya pedig kompressziós. Ha egy szeizmikus esemény hasonlít valamely ismert bánya korábbi robbantásához, akkor ez is támpontot ad azonosítására. Az Egyesült Államok Geológiai Szolgálat (USGS) ezek alapján egy döntési protokollt állított fel a földrengések és a robbantások gyors kiszűrésére.

Javaslatuk 5 alappilléren nyugszik:

1. *Helyszín:* sok esetben köthető egy működő bányához egy ahhoz közeli esemény, főleg akkor, ha hasonló méretű események ott rendszeresen előfordulnak.
2. *Időpont:* a bányák általában hétköznap, hasonló napszakban, munkaórákban végeznek robbantásokat. A kerek óra időpont is árulkodó lehet.

3. *Hullámforma:* ugyanabban a bányában végzett robbantásoknak ugyanazon állomáson detektált hullámformái nagyon hasonlóak lesznek. Mivel egy robbantás felszíni esemény, jellemző az erős felszíni R_g hullám, és a robbantás izotróp jellege miatt nem alakul ki vagy nem túl erős az S nyíró hullám. A spektrumban pedig megjelenik a késleltetett robbantási technika nyoma.
4. *Hatás:* az eseményt nem jelzi „érezhetőnek” a lakosság, pedig a számított magnitúdó alapján olyan földrengés történt, amelyet a közeli településeken érezhettek volna, és jelteni szoktak, de nem tették.
5. *Bányák bejelentése:* sok esetben rendelkezésre áll a bányakapitányságoktól kapott független robbantási információ.

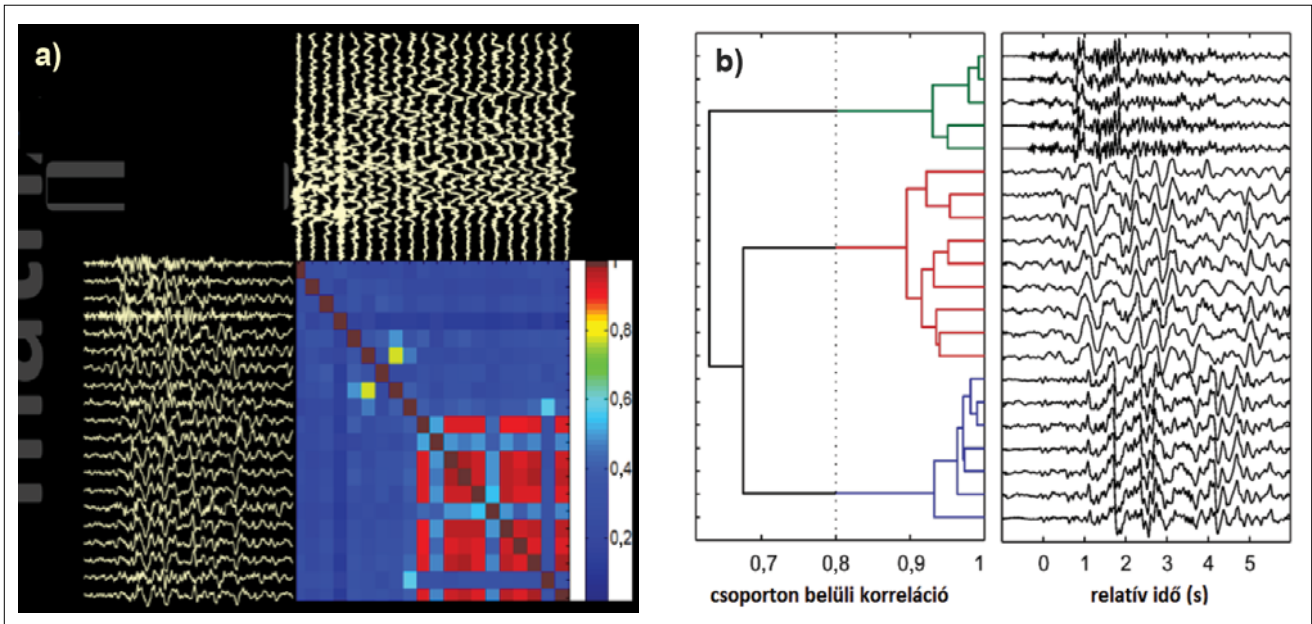
A lista alapján egy szeizmikus esemény besorolását leggyorsabban a helye alapján lehetne eldönteni. Ha az epicentrum egy működő bánya területére esett, akkor valószínűleg robbantás történt. Sok helyen azonban a bányaművelés tektonikailag aktív területre esik, ráadásul az epicentrum meghatározása akár 10 km-es hibával is terhelt, így nem egyértelmű a besorolás. A beérkezett jelek időpontja is kevés önmagában az esemény osztályozására, mert földrengések keletkezhetnek természetesen a bányaművelés aktív óráiban is.

Ugyanannak a bányának a robbantásai nagyon hasonló szeizmikus hullámokat keltenek. Általános megfigyelés az is, hogy egy nagyobb rengést követő utórengések is rengésrajokat, „klasztereket” alkotnak (Massa et al. 2006, Hage, Joswig 2009), ami egymáshoz nagyon hasonlító események csoportját jelenti (Aster, Scott 1993). Jellemzők még a páros események, „dublettek”, amelyek szinte teljesen egyformák, és gyakran másodperces vagy órás késéssel követik egymást. Baisch és munkatársai (2008) szintetikus szeizmogramok elemzésével bebizonyították, hogy a közel egyforma hullámformájú rengések hipocentrumai nagyon közel helyezkednek el egymáshoz képest, gyakorlatilag 100–200 m-re. Ezt a távolságot a szeizmogram jellemző hullámhosszának a negyedére becsülték, ez az ún. „ $\lambda/4$ ” kritérium. A hullámforma nagyfokú hasonlóságát a közeli epicentrumon kívül a nagyon hasonló fészekmechanizmus okozza (Deichmann, Garcia-Fernandez 1992).

Két hullámforma közötti hasonlóság a c_{xy} keresztkorrelációs együtthatóval jellemezhető:

$$c_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^N W_x(t_i)W_y(t_i + \tau_{xy})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N W_x(t_i)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N W_y(t_i + \tau_{xy})^2}},$$

ahol W_x és W_y a két szeizmogram elemei az idő függvényében, maximum N mintával eltolva, τ_{xy} a maximális c_{xy} értékéhez tartozó eltolási idő. A kritikus c_{xy} korrelációs együttható értékét – amely fölött hasonlóknak tekintenek két hullámformát – általában 0,6–0,95 között szokták megadni. Az alsó érték egy gyenge, 1-hez közeli erős hasonlóságot jelent.



1. ábra | A hullámforma-korreláció elemzése eredményének kétféle grafikus megjelenítése: a) kereszt-korrelációs mátrix és b) a dendrogram
Figure 1 | Two graphical representations of the results of waveform correlation analysis: a) the cross-correlation matrix and b) the dendrogram

Közeli kis eseményeknél az N mintaelemek száma a beérkező hullám időtartamának (általában 6–30 s) és a mintavételi időnek a függvénye.

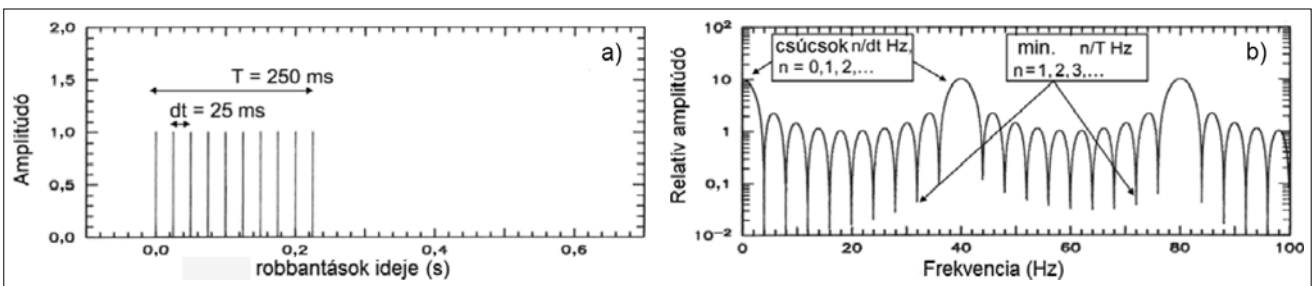
Ha sok esemény egymáshoz képesti hasonlóságát vizsgáljuk, az eredmény egy kereszt-korrelációs mátrix (1a. ábra), ahol a főátlóban azok a kereszt-korrelációs együtthatók láthatók, amikor önmagával hasonlítottuk össze az eseményt, így értékük 1.

Az események közötti hasonlóság mint „távolság” alapján a hullámformák rokonsági ágakba, csoportokba rendezhetők, ezt *dendrogramnak* nevezünk (1b. ábra). A csoportokba rendezett események száma és a csoportok összetétele változik a kritikus korrelációs együttható értékének változtatásával. Pechmann és Kanamori (1982) kimutatták, hogy vannak „erős párok”, amelyeknek a forrásai szinte egybeesnek, és „gyenge párok”, ahol bár a fészekmechanizmus nagyon hasonló, távolabb esnek a fészkek egymástól. Ekkor a szeizmogramok főleg a nagyfrekvenciás tartományban különböznek. Ha két esemény hullámformája eltér, az nem-

csak azzal magyarázható, hogy epicentrumaik távol vannak egymástól, hanem azok eltérő fészekmechanizmusával is.

A hazai kőbányák a késleltetett robbantási módszert (*ripple-firing*) alkalmazzák, amelynél négyzetláncos szerkezetben, néhány milliszekundumos időkülönbséggel (*delay*) egymás után robbantják fel a felszín alatt 1-2 m-re lefűrt tölteteket. Az ilyen technikájú robbantások forrás-idő függvénye az egyedi robbantások lineáris szuperpozíciója lesz. Az egyes robbantások keltette hullámok között konstruktív, illetve destruktív interferencia alakul ki, így a spektrumban bizonyos frekvenciákon megnő, másokon lecsökken az energia, a spektrum „csipkézett” lesz.

A spektrummoduláció matematikai hátterét Gitterman és munkatársai (1993) vezették le. A spektrum szerkezetét három fő paraméter határozza meg: az egy sorban elhelyezett töltetek közötti és a sorok közötti késleltetési idők, valamint az összes töltet felrobbantásának teljes időtartama (2a. ábra). A robbantások spektrumának vizsgálata így lehetőséget ad a földrendésektől való elkülönítésükre.



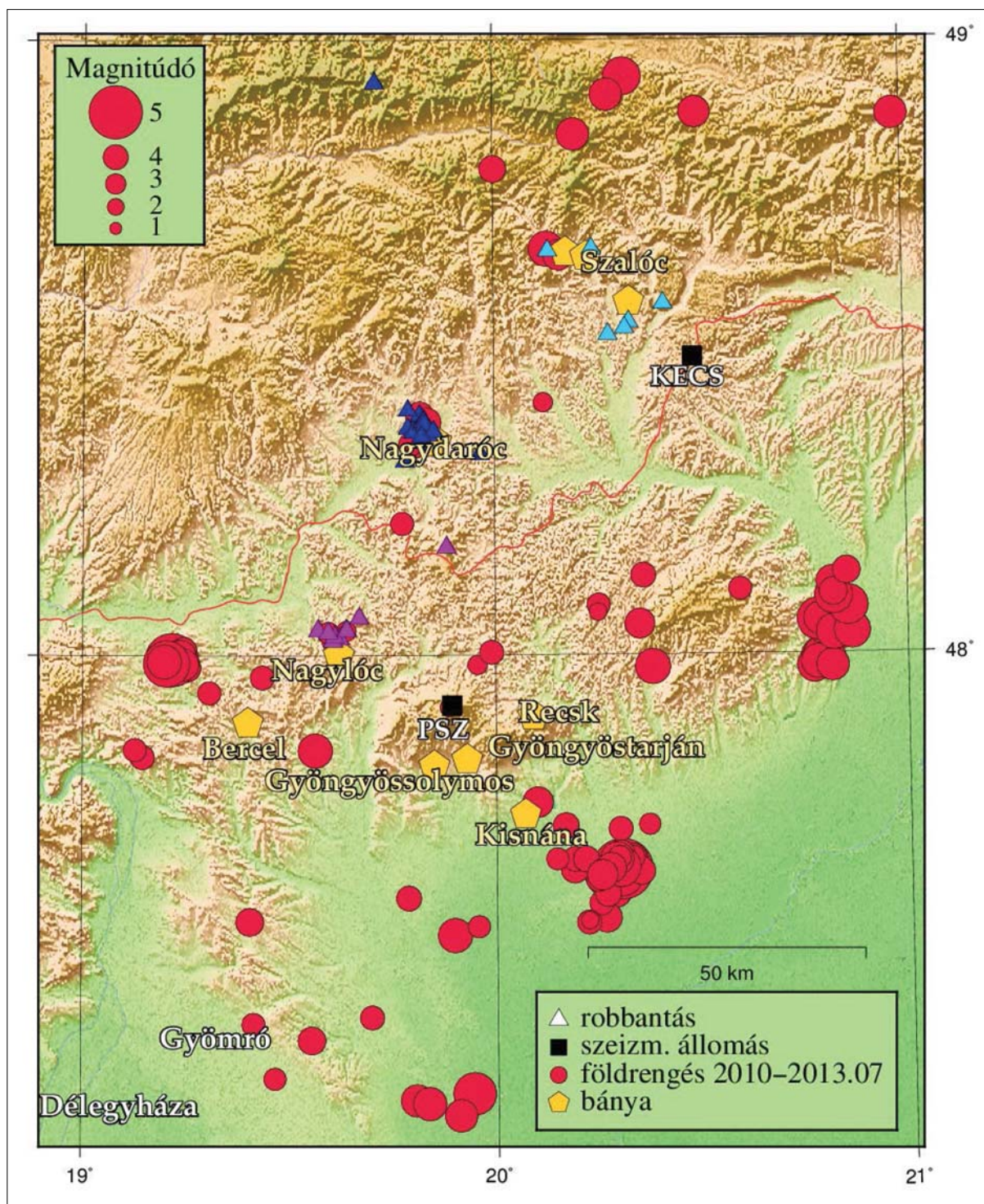
2. ábra | A csipkézett spektrum keletkezése egysoros késleltetett robbantás esetén: a) töltetek felrobbantásának teljes időtartama és a késleltetési idők, b) a spektrumcsúcsok és -minimumok (Chapman et al. 1992 nyomán)

Figure 2 | The origin of spectral scalloping in case of single row explosions: a) the full time of charges and the delay time, b) the spectral minima and maxima (Chapman et al. 1992)

A spektrumok elemzése a késleltetett robbantási technika nyomának a kimutatását célozta.

A *bináris spektrum* révén a megemelt energiájú sávok időbeli függetlenségét elemezhetjük. A cél az időtől független spektrummodulációk felerősítése és a véletlenszerű összetevők kiejtése. Földrengésekre ez az időtől független moduláció nem jellemző. A módszert szeizmológiai célra

Hedlin és munkatársai (1989) fejlesztették ki. Carr és Garbin (1998) az 1990 és 1992 között az Egyesült Államok Wyoming területén történt földrengések és késleltetett robbantások bináris spektrumát elemezte. Az állomások mintavételi ideje lehetővé tette (100 Hz), hogy 50 Hz-ig kövessék a spektrumokat. A robbantások 50%-ában sikerült a spektrumban a sávokat kimutatni, 22%-ban kialakultak sávok, de



3. ábra | A 2010–2013.07 között regisztrált földrengések és bányarobbantások epicentrumai, és az érintett bányák elhelyezkedése
Figure 3 | The epicenter map of earthquakes registered between 2010–2013.07 and the quarry blasts and the location of affected mines

azok nem voltak stabilak, míg a többi esetben nem vezetett sikerre a módszer.

A földrengések és a robbantások fészekmechanizmusukban is különböznek egymástól.

A robbantások izotrop hullámforrásoknak tekinthetők, amikor minden irányban szinte azonos erősségű kompressziós, azaz nyomáshullámok indulnak el. A tektonikus eredetű földrengések esetében viszont főként nyírási deformációk jönnek létre, a felszabaduló energia nagyobb része S hullámok formájában terjed tovább. A detektált hullámok amplitúdója pedig függ a törési sík és az azon történő elmozdulás irányától. Ez a magyarázata annak, hogy a P/S amplitúdóarány nagyobb lesz robbantások esetén. Így ez egy általánosan használt paraméter a földrengések és robbantások elkülönítésére (pl. Kim et al. 1998, Koch, Fäch 2002).

Az P/S amplitúdóarány értéke területenként változhat, függ a vizsgált frekvenciasávtól, a felhasznált fázisoktól (P_g, P_n, S_g, S_n, L_g) és a terjedési úttól. Bizonyos körülmények között azonban a P/S amplitúdóarány robbantások esetében kisebb is lehet a földrengésekénél. Az arányok számítására az 1980-as években még csak az 1 Hz körüli, szűk sávú hullámformaadatokot használták fel. Baumgardt és Young (1990), valamint Kim és munkatársai (1993) nagyobb, 5 Hz-ig terjedő frekvenciákra is kiterjesztették számításukat. Tapasztalataik szerint ebben a sávban jobb elkülönülést kaptak, mint alacsonyabb frekvenciák esetében.

Robbantásokra és a sekély fészekmélységű földrengésekre jellemző az R_g hullám kialakulása. Ez egy felületi hullámtípus, amely a térhullámokkal ellentétben éles beérkezés nélküli, hosszan kiterjedő hullámvonulatot alkot. Az R_g rövid periódusú Rayleigh-hullámokból áll, spektruma általában 0,66–2 Hz között maximális. Jelölésében a „g” a kéreg gránitos részére utal, ahol terjedése történik. Átlagsebessége kb. 3 km/s, és a 100–200 km-nél közelebbi szeizmogramok domináns fázisa lehet.

A dolgozatban az események időbeli eloszlásán, a hullámformák hasonlóságán és a spektrumok jellegzetességén alapuló elkülönítési módszerek alkalmazhatóságát vizsgáljuk.

A vizsgált bányarobbantások

A PSZ szeizmológiai állomás 8 magyarországi és dél-szlovákiai kőbányarobbantásait detektálja rendszeresen. Elhelyezkedésük a 3. ábrán látható.

Ezek sorrendben:

1. Berceli Nógrádkövesd andezitbánya
2. Gyöngyössolymosi Cserkő andezitbánya
3. Gyöngyöstarjáni Füledugó andezitbánya
4. Kislánai andezitbánya
5. Nagylóci Zsunyi-hegy andezitbánya
6. Recski Csákánykő andezitbánya
7. Szlovákiai nagydaróci bánya
8. Szlovákiai szalóci bányák

A bányák robbantásait, illetve hogy mely bányák érintettek, több hónapos munka révén sikerült kideríteni. A robbantási időpontokat a budapesti és miskolci bányakapitányságok segítségével sikerült megkapnunk. A kapitányságok általában napra pontosan, néhány bánya esetében óra/perc pontossággal őrzik az időpontokat. Néhány bánya esetében – ahol ritkábban robbantanak – igyekeztünk évekre visszamenőleg megtudni a robbantási időpontokat, hogy minél több eseményt sikerüljön egy-egy adott bányához kapcsolni.

A bányák és az elemzésbe bevont robbantások adatait, a koordinátákat, a bányáknak a PSZ állomástól való távolságát az 1. táblázat tartalmazza. A B jel a sorszám előtt az angol 'blast', robbantás szóra utal. A táblázatban csak abban az esetben adtuk meg a hipocentrumot, ha sikerült azokat a fázisok beérkezési időiből meghatározni. A többi esetben kizárólag a bányakapitányság listája alapján történt a besorolás. A robbantások mérete (lokális magnitúdó) M_L 0,6–2,4 közötti tartományra terjedt ki, fészekmélységük 30 esetben 0 km-nek, 6 esetben 10 km-nek, illetve egyszer 20 km-nek adódott.

A robbantások során felhasznált robbanóanyag tömege 1–5 tonna között változott.

A gyöngyössolymosi, gyöngyöstarjáni, kislánai és berceli bánya robbantásait csak a PSZ állomás regisztrálta, így nem lehetett az epicentrumot meghatározni, mivel ahhoz legalább 3 állomás beérkezési időpontjaira lett volna szükség. Tisztázva eredetüket, az összehasonlító elemzésbe viszont be tudtuk vonni őket. A gyöngyöstarjáni robbantások közül a B17 kiemelten szerepel az 1. táblázatban, mivel korábban – a földrengésekhez hasonló jellege miatt – földrengésként szerepelt a katalógusban. Később a bánya robbantási listája alapján a robbantásokhoz került.

A Szlovákia területén működő nagydaróci és szalóci bányák esetében az ottani jelentések robbantásnak jelölték az 1. táblázatban felsorolt eseményeket. Mivel több állomás is detektálta ezeket, helyüket a beérkezett fázisok ideje alapján számítottuk. Ahogy ez a 3. ábrán is látható, a kapott koordináták nem egyeztek meg pontosan a bányákéval, de kisebb-nagyobb szórással azok környezetére estek.

A 2011 végén bezárt nagylóci bánya közelébe eső 9 esemény közül 4-et igazolt vissza a bányát működtető társaság, de jelezték, hogy nem teljes és pontos a listájuk. A többi 5 esemény eredete kérdéses. Lehet, hogy robbantások voltak ezek is, amelyek kimaradtak a bánya listájából, az analízis során ennek az eldöntése is célunk volt.

A recski bánya robbantásainak detektálására csak 2013 során derült fény. Ekkor több robbantásos jellegű eseményt is regisztráltunk a PSZ állomáson, amelyek nem szerepeltek a már felsorolt bányák listáján. Ezek között egy rendkívül nagy is volt, amit visszaigazolt a recski bánya robbantómestere. A B96 sorszámú esemény korábban is robbantásként szerepelt a katalógusban, de nem sikerült egyik bányához sem kötni azt. A B98 esemény pedig tévesen földrengésként szerepelt a havi jelentésben. 2013-ban a recski robbantómester listája révén sikerült azokat beazonosítani.

1. táblázat | A bányarobbantások adatai. Ahol hiányoznak a hipocentrum koordináták, ott csak a Bányakapitányság jelentése alapján történt a besorolás

Bányák	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Megjegyzés
Gyöngyössolymos $\varphi = 47,836^\circ$; $\lambda = 19,934^\circ$ 10 km-re PSZ-től	B1	2012.05.10	06:10:00			–	–	
	B2	2012.07.02	07:02:00			–	–	
	B3	2012.08.14	07:56:00			–	–	
	B4	2012.09.06	07:00:00			–	–	
	B5	2012.11.29	08:30:00			–	–	
	B6	2013.04.08	08:00:00			–	–	
	B7	2013.05.16	07:35:00			–	–	
	B8	2013.06.17	06:20:00			–	–	
	B9	2013.06.21	07:30:00			–	–	
	B10	2013.06.28	08:00:00			–	–	
	B11	2013.07.01	07:20:00			–	–	
	B12	2013.07.09	06:40:00			–	–	
Gyöngyöstarján $\varphi = 47,822^\circ$; $\lambda = 19,857^\circ$ 11 km-re PSZ-től	B13	2007.01.20	12:04:00			–	–	
	B14	2007.06.20	10:22:00			–	–	
	B15	2007.10.18	10:26:00			–	–	
	B16	2007.10.20	11:57:00			–	–	
	B17	2008.04.01	10:09:41	47,94	19,80	20	1,5	Mátraverebély
	B18	2011.04.14	08:56:00			–	–	
	B19	2012.06.04	09:49:00			–	–	
	B20	2012.06.08	10:36:00			–	–	
	B21	2013.02.28	11:37:00			–	–	
Kisnána $\varphi = 47,741^\circ$; $\lambda = 20,070^\circ$ 20 km-re PSZ-től	B22	2007.10.20	10:16:00			–	–	
	B23	2011.05.18	14:49:00			–	–	
	B24	2011.05.30	10:25:00			–	–	
	B25	2011.06.15	12:18:00			–	–	
	B26	2011.07.23	10:21:00			–	–	
	B27	2011.08.11	11:50:00			–	–	
	B28	2011.08.19	09:43:00			–	–	
	B29	2011.08.26	09:30:00			–	–	
	B30	2011.09.01	12:15:00			–	–	
	B31	2011.10.20	11:30:00			–	–	
	B32	2011.11.25	10:44:00			–	–	
	B33	2012.02.27	15:02:00			–	–	
	B34	2012.05.10	12:03:00			–	–	
	B35	2012.05.17	12:44:00			–	–	
	B36	2012.05.25	10:15:00			–	–	
	B37	2012.06.11	12:34:00			–	–	
	B38	2012.06.21	12:14:00			–	–	
B39	2012.07.12	10:05:00			–	–		
B40	2012.07.17	09:32:00			–	–		
B41	2012.07.30	10:38:00			–	–		
B42	2013.02.25	15:40:00			–	–		
B43	2013.03.13	09:40:00			–	–		

1. táblázat | (folyt.)

Bányák	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Megjegyzés
Kisnána $\varphi = 47,741^\circ$; $\lambda = 20,070^\circ$ 20 km-re PSZ-től	B44	2013.03.26	13:37:00			–	–	
	B45	2013.04.10	11:21:00			–	–	
	B46	2013.05.14	13:30:00			–	–	
	B47	2013.05.27	14:37:00			–	–	
	B48	2013.06.05	11:55:00			–	–	
	B49	2013.06.13	08:00:00			–	–	
	B50	2013.06.22	10:20:00			–	–	
Bercel $\varphi = 47,893^\circ$; $\lambda = 19,406^\circ$ 37 km-re PSZ-től	B51	2012.05.17	10:35:00			–	–	
	B52	2012.05.24	09:30:00			–	–	
	B53	2012.06.29	09:15:00			–	–	
	B54	2012.07.16	09:36:00			–	–	
	B55	2012.08.02	10:23:00			–	–	
	B56	2012.09.20	11:00:00			–	–	
	B57	2013.06.05	10:20:00			–	–	
	B58	2013.07.15	10:18:00			–	–	
Nagydaróc $\varphi=48,346^\circ$; $\lambda=19,858^\circ$ 49km-re PSZ-től	B59	2010.04.19	10:36:22	48,37	19,83	0	2,0	
	B60	2010.04.30	12:43:07	48,32	19,78	0	1,7	
	B61	2010.07.02	08:10:24	48,33	19,97	0	1,4	
	B62	2010.08.31	09:15:00	48,36	19,81	0	1,8	
	B63	2010.10.04	09:37:59	48,37	19,79	0	1,9	
	B64	2010.11.15	09:38:48	48,36	19,80	0	1,7	
	B65	2011.03.03	08:49:15	48,39	19,82	7	1,7	
	B66	2011.03.17	10:50:27	48,38	19,82	0	1,8	
	B67	2011.05.20	13:22:23	48,35	19,82	0	2	
	B68	2011.06.03	07:48:31	48,36	19,84	0	1,5	
	B69	2011.06.16	08:32:26	48,38	19,82	0	2,0	
	B70	2011.06.21	07:51:48	48,40	19,80	0	1,1	
	B71	2011.07.06	09:38:28	48,93	20,71	7	1,9	
	B72	2011.08.03	07:58:45	48,38	19,83	0	1,9	
	B73	2011.10.12	08:48:43	48,37	19,83	0	2,2	
	B74	2011.12.09	12:48:11	48,36	19,85	0	2,3	
	B75	2012.02.01	10:00:49	48,36	19,82	0	2,0	
	B76	2012.07.13	08:17:00	48,34	19,85	–	–	
	B77	2012.10.11	07:55:00	–	–	–	–	
B78	2013.06.03	12:30:33	48,375	19,83	0,0	1,8	Nagydaróc reng	
B79	2013.06.22	10:09:00	–	–	–	–		
Szalóc $\varphi=48,573^\circ$; $\lambda=20,331^\circ$ 83km-re PSZ-től	B80	2010.11.05	10:05:03	48,52	20,28	0	1,6	
	B81	2011.04.14	10:41:26	48,54	20,33	0	1,7	
	B82	2011.08.04	08:52:52	48,57	20,42	0	1,5	
	B83	2012.02.11	12:29:15	48,66	20,13	1	2,4	
	B84	2012.05.18	12:20:32	48,53	20,32	0	1,6	
	B85	2012.06.30	09:57:30	48,659	20,24	0	1,5	
B86	2013.06.03	09:00:30	48,620	20,56	0	1,5	zajos	

1. táblázat | (folyt.)

Bányák	N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Megjegyzés
Nagylóc környéki események $\varphi = 48,005^\circ$; $\lambda = 19,627^\circ$ 22 km-re PSZ-től	B87	2011.02.14	10:28:38	48,03	19,62	0	1,1	Nagylóc robb.
	B88	2011.03.05	14:31:44	48,02	19,60	10	1,1	Nagylóc
	B89	2011.03.21	10:27:28	48,03	19,61	0	0,9	Nagylóc
	B90	2011.04.22	17:07:35	48,06	19,67	0	1,7	Sóshartyán
	B91	2011.06.09	08:53:29	48,04	19,57	0	0,6	Nagylóc
	B92	2011.09.26	11:30:13	48,04	19,64	0	1,9	Sóshartyán robb.
	B93	2011.12.04	09:19:33	48,18	19,88	0	1,2	Salgóbánya robb.
	B94	2011.12.28	09:20:30	48,04	19,60	10	1,0	Nagylóc robb.
	B95	2011.12.29	09:07:06	48,04	19,64	8	0,9	Sóshartyán
	Recsk $\varphi = 47,90^\circ$; $\lambda = 20,09^\circ$ 15 km-re PSZ-től	B96	2011.11.25	12:18:10	47,980	19,91	0,0	1,1
B97		2013.05.27	08:00:00	–	–	–	–	szónikus jel
B98		2013.06.06	10:21:15	47,986	19,99	0,0	1,6	Mátraballa
B99		2013.07.12	05:40:00	–	–	–	–	
B100		2013.07.18	06:00:00	–	–	–	–	

A vizsgált földrengések

Az elemzést a 3. ábrán látható területen 2010.01.01 és 2013.07.31 között kipattant és epicentrumadattal rendelkező összes földrengéssel végeztük (Gráczter et al. 2012, 2013, Tóth et al. 2011, 2012, 2013). Összesen 104 földrengés került a listára, melyek paramétereit a 2. táblázatban közöljük. A sorszám előtti EQ jel az angol 'earthquake', földrengés szóra utal. A rengések távolsága a PSZ állomástól 7 és 117 km között, méretük pedig M_L 0,7–4,8 között változott. A robbantások előző fejezetben megadott M_L 0,6–2,4 mérettartományába több mint 80 földrengés esett. Közülük

9 érezhető volt, és ezekből 3 kisebb károkat okozott az epicentrum közvetlen közelében. EMS skála (European Macroseismic Scale) szerinti besorolásuk a 2. táblázatban, a helységnevé mellett látható. Néhány, a földrengések között felsorolt esemény esetén (EQ97, EQ101-102) hiányoznak az epicentrumadatok, mivel ezeket kevés állomás detektálta. Hullámformáik viszont nagyon hasonlítottak a korábbi eseményekhez, ezért bevettük őket az elemzésbe, remélve, hogy sikerül bizonyítani, hogy valamelyik utóregés csoporthoz tartoznak. Az EQ25 eseményről a korrelációs vizsgálat során derült ki, hogy robbantás, s ezt kiemelten jelöltük a 2. táblázatban.

2. táblázat | A földrengések hipocentrum adatai és távolságuk a PSZ állomástól. Ahol hiányoznak a koordináták, ott a kevés adat miatt nem történt epicentrum meghatározás

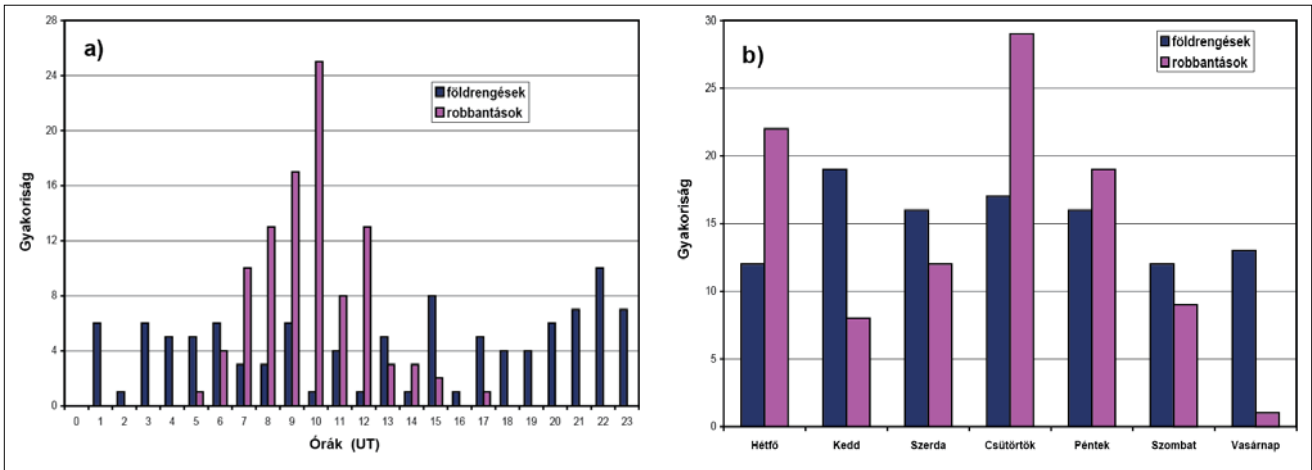
N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnevé	táv. (km)
EQ1	2010.05.25	06:55:26	47,286	19,943	15,0	3,1	Újszilvás (EMS5)	70,4
EQ2	2010.07.23	07:01:37	47,984	19,956	10,0	0,9	Mátramindszent	8,6
EQ3	2010.08.14	06:57:26	47,988	20,802	3,3	2,7	Miskolc (EMS3-4)	68,2
EQ4	2010.08.14	22:12:43	48,047	20,781	10,0	1,9	Miskolctapolca	67,6
EQ5	2010.08.17	05:32:43	47,994	20,783	10,0	2,4	Miskolc (EMS4)	68
EQ6	2010.08.19	01:29:05	48,055	20,782	10,0	3,0	Miskolc (EMS4-5)	68
EQ7	2010.08.19	14:48:07	48,041	20,796	1,8	2,4	Miskolc (EMS4-5)	68,7
EQ8	2010.08.19	17:45:32	48,054	20,786	10,0	2,1	Szirma	68,3
EQ9	2010.08.19	22:24:21	47,996	20,785	10,0	2,1	Bükkaranyos	67
EQ10	2010.08.20	11:39:26	47,979	20,772	10,0	2,3	Bükkaranyos	66
EQ11	2010.08.20	16:06:55	47,985	20,781	10,0	2,3	Bükkaranyos	67
EQ12	2010.08.20	19:17:32	48,027	20,847	2,6	1,6	Kistokaj	72
EQ13	2010.08.21	04:58:48	48,032	20,820	3,5	2,4	Kistokaj	70

2. táblázat (folyt.)

N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnév	táv. (km)
EQ14	2010.08.21	11:18:32	47,979	20,816	10,0	2,1	Kistokaj	70
EQ15	2010.09.26	05:02:15	48,049	20,350	7,0	1,8	Bélapátfalva	69
EQ16	2010.12.14	17:38:17	48,035	20,864	0,6	2,5	Sajópetri	53
EQ17	2010.12.14	21:29:03	48,075	20,855	1,3	2,8	Felsőzsolca EMS4-5	74
EQ18	2010.12.14	21:32:48	48,114	20,816	2,4	2,0	Felsőzsolca	72
EQ19	2010.12.14	23:07:23	48,092	20,821	1,6	2,6	Szirma	72
EQ20	2011.02.20	08:53:58	47,834	19,145	10,0	1,3	Szirma	57
EQ21	2011.03.12	05:47:01	47,566	19,404	10,0	1,7	Isaszeg	53,7
EQ22	2011.05.20	09:08:09	47,544	19,899	10,0	2,3	Jászdózsa EMS3	41,7
EQ23	2011.06.06	21:55:08	48,128	20,359	10,0	1,4	Bükkmogyorósd	41,8
EQ24	2011.06.18	03:47:34	47,604	19,788	10,0	1,4	Jászágó	35,8
EQ25	2011.07.26	05:52:26	47,915	19,887	5,0	0,8	Mátraszentimre	0,6
EQ26	2011.09.07	22:38:20	47,845	19,563	1,0	2,3	EMS4 Kisbágyon	26,1
EQ27	2011.10.28	09:25:54	47,978	19,990	2,0	1,3	Mátraterenye	11,9
EQ28	2011.11.03	03:29:28	47,399	19,413	7,0	1,2	Péteri	30,8
EQ29	2011.11.27	06:54:33	47,939	19,307	1,0	1,2	Kisecset	44
EQ30	2012.02.01	09:42:22	47,250	19,906	8,0	2,1	Újszilvás	74
EQ31	2012.03.20	01:21:22	47,980	20,380	4,0	2,4	Felsőtárkány	36,6
EQ32	2012.03.23	15:40:43	48,646	20,164	8,0	1,9	Szlovákia	83,3
EQ33	2012.05.31	21:35:42	48,944	20,315	0,0	2,6	Szlovákia	118
EQ34	2012.06.01	03:47:40	48,910	20,280	1,0	2,1	Szlovákia	114
EQ35	2012.06.14	08:13:46	48,075	20,250	8,0	1,2	Bekőlce	31,7
EQ36	2012.06.21	20:32:03	48,79	20,00	15,0	1,6	Szlovákia	97,5
EQ37	2012.07.08	18:46:26	47,410	19,698	10,0	1,3	Nagykátá	70,4
EQ38	2012.07.16	09:36:37	47,964	19,435	14,0	1,3	Terény	8,6
EQ39	2012.07.17	15:12:26	48,068	20,249	10,0	0,7	Egercsehi	68,2
EQ40	2012.07.19	09:22:43	48,881	20,497	7,0	2,0	Szlovákia	67,6
EQ41	2012.08.09	04:35:43	47,373	19,553	14,0	1,7	Gomba	68
EQ42	2012.10.29	08:34:05	47,760	20,100	10,0	1,9	Detk	23
EQ43	2013.02.05	22:34:31	47,275	19,805	6,0	2,1	Tápiószőlős	72
EQ44	2013.02.09	01:13:12	47,311	19,465	10,0	1,1	Monorierdő	75
EQ45	2013.02.11	06:08:21	47,270	19,835	6,0	2,2	Tápiószőlős	72
EQ46	2013.02.16	17:18:42	47,643	20,269	10,0	3,6	Heves (EMS4-5)	42
EQ47	2013.02.17	13:21:48	47,647	20,300	1,0	2,5	Tenk	43
EQ48	2013.03.19	15:09:26	48,342	19,806	9,0	1,6	Szlovákia	47
EQ49	2013.03.20	23:48:46	48,097	20,82	10,0	1,7	Szirma	71
EQ50	2013.03.21	11:17:04	48,342	19,795	10,0	1,2	Szlovákia	47
EQ51	2013.04.22	22:28:47	47,650	20,302	10,0	4,8	Heves (EMS6)	44
EQ52	2013.04.22	22:33:48	47,650	20,187	10,0	1,7	Boconád	37
EQ53	2013.04.22	22:37:12	47,667	20,188	17,0	1,4	Tarnaszádány	45
EQ54	2013.04.22	23:01:43	47,617	20,285	10,0	2,1	Heves	45
EQ55	2013.04.22	23:24:24	47,673	20,304	5,0	2,2	Heves	44
EQ56	2013.04.23	03:30:41	47,667	20,309	10,0	1,6	Erdőtelek	42
EQ57	2013.04.23	04:23:49	47,667	20,214	10,0	1,5	Boconád	37
EQ58	2013.04.23	13:31:04	47,667	20,291	14,0	1,8	Erdőtelek	37

2. táblázat (folyt.)

N	Dátum	Idő (UT)	φ	λ	h (km)	M_L	Helységnev	táv. (km)
EQ59	2013.04.24	01:09:25	47,667	20,333	10,0	1,4	Tenk	40
EQ60	2013.04.24	01:40:07	47,667	20,146	10,0	1,1	Tanaméra	34
EQ61	2013.04.24	03:39:37	47,636	20,304	3,0	2,5	Heves	78
EQ62	2013.04.24	10:05:14	48,846	20,198	2,0	2,1	Szlovákia	26,1
EQ63	2013.04.24	15:53:58	47,667	20,318	10,0	1,9	Erdőtelek	26,1
EQ64	2013.04.24	21:02:37	47,595	20,250	6,0	1,3	Heves	40
EQ65	2013.04.24	22:39:36	47,571	20,264	10,0	1,8	Heves	48
EQ66	2013.04.24	23:02:15	47,558	19,956	0,0	1,1	Jászdózsa	40
EQ67	2013.04.25	13:42:31	47,667	20,324	10,0	1,8	Tenk	43
EQ68	2013.04.26	09:14:19	47,667	20,323	10,0	2,0	Tenk	42
EQ69	2013.04.26	18:57:23	47,610	20,267	6,0	1,5	Heves	44
EQ70	2013.04.27	04:58:50	47,564	20,221	4,0	1,3	Jászszeptandrás	46
EQ71	2013.04.28	07:01:37	47,721	20,167	10,0	1,5	Nagyút	30
EQ72	2013.04.29	13:58:04	47,667	20,304	10,0	2,0	Erdőtelek	42
EQ73	2013.05.02	20:06:53	47,723	20,369	1,0	1,0	Füzesabony	42
EQ74	2013.05.03	17:52:38	47,67	20,317	10,0	1,3	Erdőtelek	42
EQ75	2013.05.05	20:58:49	47,716	20,299	4,0	1,3	Kál	38
EQ76	2013.05.05	23:15:31	47,649	20,251	4,0	1,0	Boconád	40
EQ77	2013.05.08	20:49:15	47,647	20,347	13,0	1,7	Tenk	45
EQ78	2013.05.09	01:42:19	47,669	20,327	10,0	1,2	Tenk	43
EQ79	2013.05.12	07:47:23	47,567	20,222	1,0	0,7	Jászszeptandrás	46
EQ80	2013.05.12	21:10:47	47,639	20,248	6,0	1,1	Heves	41
EQ81	2013.05.17	04:23:21	47,675	20,298	16,0	1,7	Erdőtelek	41
EQ82	2013.05.18	20:34:20	47,654	20,296	10,0	2,9	Erdőtelek (EMS4-5)	42
EQ83	2013.05.18	22:25:17	48,123	20,852	8,0	1,7	Onga	75
EQ84	2013.05.24	18:54:54	47,663	20,286	0,0	1,8	Erdőtelek (EMS4)	41
EQ85	2013.06.03	21:23:06	47,667	20,289	1,0	2,2	Erdőtelek	41
EQ86	2013.06.05	18:45:46	47,993	19,216	4,0	4,1	Érsekvadk. (EMS5-6)	51
EQ87	2013.06.05	20:46:37	47,980	19,252	6,0	1,7	Szente	48
EQ88	2013.06.05	22:00:56	47,992	19,228	2,0	1,5	Érsekvadkert	51
EQ89	2013.06.11	05:31:25	47,995	19,226	5,0	2,3	Érsekvadk. (EMS4-5)	51
EQ90	2013.06.14	06:35:53	48,009	19,224	10,0	1,5	Csesztve	49
EQ91	2013.06.16	15:10:26	48,00	19,236	5,0	2,0	Csesztve	50
EQ92	2013.06.19	11:22:40	48,213	19,775	4,0	1,2	Szlovákia	34
EQ93	2013.06.22	15:32:37	47,846	19,125	10,0	1,2	Szendehegy	58
EQ94	2013.06.23	03:47:21	47,989	19,208	2,0	2,3	Érsekvadkert	52
EQ95	2013.06.23	15:47:52	47,985	19,242	5,0	2,1	Csesztve	49
EQ96	2013.06.24	23:06:40	47,669	20,295	0,0	1,2	Erdőtelek	41
EQ97	2013.07.02	13:49:04	–	–	–	–	Szlovákia	47
EQ98	2013.07.02	17:44:03	47,652	20,274	1,0	1,9	Erdőtelek	41
EQ99	2013.07.02	19:07:32	47,987	19,204	4,0	3,4	Érsekvadkert (EMS5)	41
EQ100	2013.07.02	19:47:00	47,990	19,198	5,0	2,3	Érsekvadkert	41
EQ101	2013.07.04	02:26:52	–	–	–	–	Heves	
EQ102	2013.07.04	15:22:00	–	–	–	–	Heves	
EQ103	2013.07.05	19:34:58	47,633	20,243	1,0	1,3	Heves	41
EQ104	2013.07.11	06:10:21	47,641	20,254	1,0	1,9	Tenk (EMS3)	41

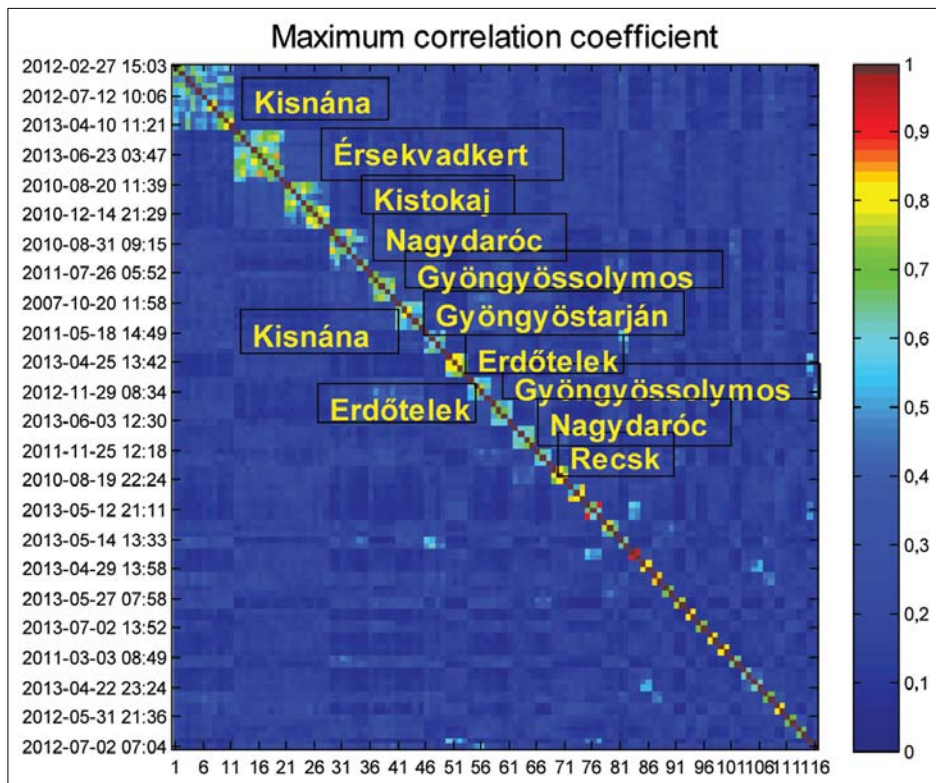


4. ábra A robbantások és földregések napi és heti eloszlása
Figure 4 The diurnal and weekly distribution of blasts and earthquakes

A robbantások és földregések elkülönítése a keletkezési idők alapján

A 4. ábra a 204 esemény napi és heti eloszlását mutatja. Megfigyelhető, hogy mind a 8 bánya működése belesik a Typical binary spectra of a) blast and b) earthquake 5–15 h (UT) közötti időablakba, egyetlen esemény volt 17 óra után. A robbantások közül 90 munkanapra esett, 10 pedig hétfégre. Érdekes még a hétfői és csütörtöki csúcs, amely talán a bányaművelés ritmusából adódik. Ezzel szemben a földregések eloszlása sokkal egyenletesebb, nincs kiemelkedő nap vagy napszak. Emiatt, ha hétköznap, munkaidőben észlelt szeizmikus eseményről van szó, gyanítható, hogy az esetleg robbantás. A 2010.01 és 2012.12 közötti 3 év alatt 68 robbantást és 42 rengést tartalmazott a lista. A regisztrált események többsége a területen tehát robbantás volt. (Természetesen több olyan földregés is keletkezhetett, amelynek paramétereit nem sikerült meghatározni, így ezek nincsenek benne a listában.)

művelés ritmusából adódik. Ezzel szemben a földregések eloszlása sokkal egyenletesebb, nincs kiemelkedő nap vagy napszak. Emiatt, ha hétköznap, munkaidőben észlelt szeizmikus eseményről van szó, gyanítható, hogy az esetleg robbantás. A 2010.01 és 2012.12 közötti 3 év alatt 68 robbantást és 42 rengést tartalmazott a lista. A regisztrált események többsége a területen tehát robbantás volt. (Természetesen több olyan földregés is keletkezhetett, amelynek paramétereit nem sikerült meghatározni, így ezek nincsenek benne a listában.)



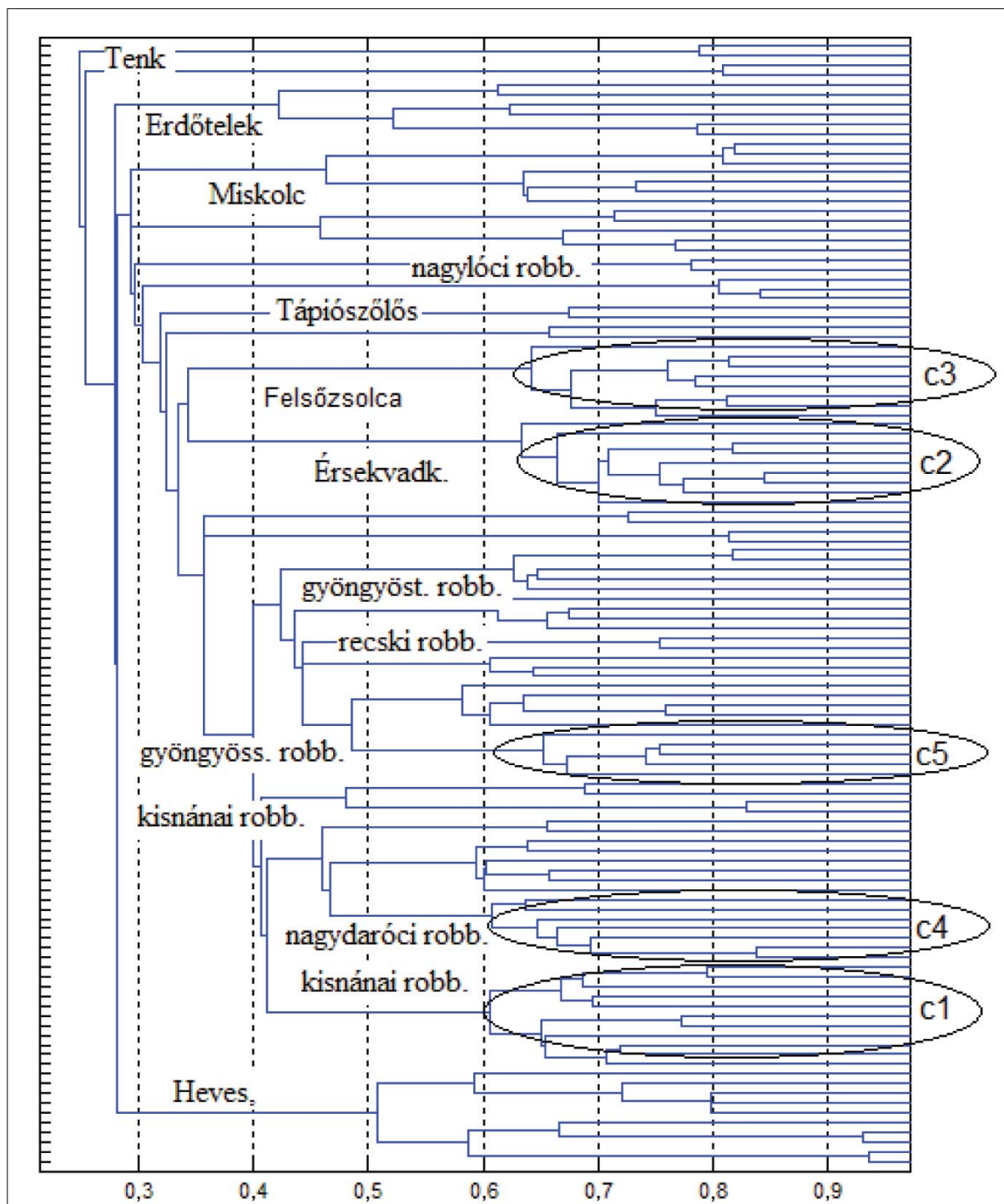
5. ábra A robbantások és földregések rendezett korrelációs mátrixa, a nagyobb klaszterek forrásának a feltüntetésével
Figure 5 The arranged correlation matrix of blasts and earthquakes, the origin of biggest clusters were indicated

A robbantások és földrengések elkülönítése a hullámformák alapján

A hullámformák összehasonlítását a keresztkorrelációs együtthatók számításával végeztük, amihez az ilyen célra kifejlesztett GISMO, MATLAB programcsomagot használtunk. Az elemzéshez a horizontális csatornákat választottuk, mert ezeken a később beérkező S hullámok na-

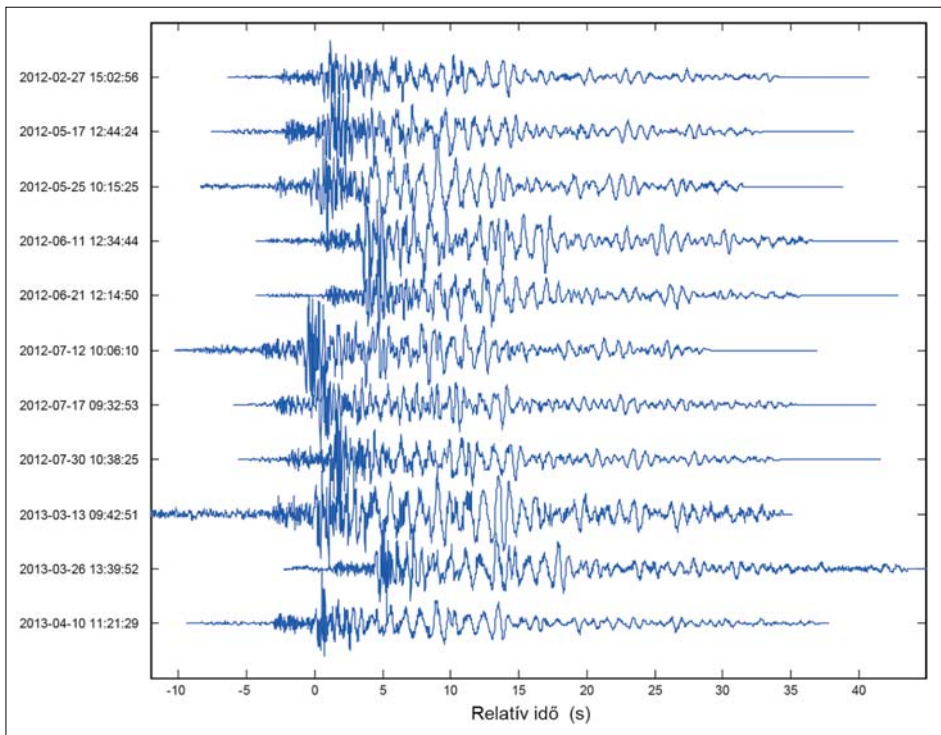
gyobb amplitúdóval jelentkeztek, ezért használhatóbbak voltak.

Először meghatároztuk azt az időablakot, amelyen belül összehasonlítottuk a szeizmogramokat. Az SHN (É–D) csatornákból egy-egy 25 másodperces hullámformát használtunk fel, amely a teljes esemény regisztrátumát, az S és R_g hullámvonalat nagy részét is tartalmazta. Ezután a szeizmogramokat 0,5–20 Hz közötti Butterworth-sáv-



6. ábra | A legalább egy másikkal hasonlóságot mutató ($c_{xy} > 0,6$) események dendrogramja. A jelentősebb klasztereket feliratoztuk

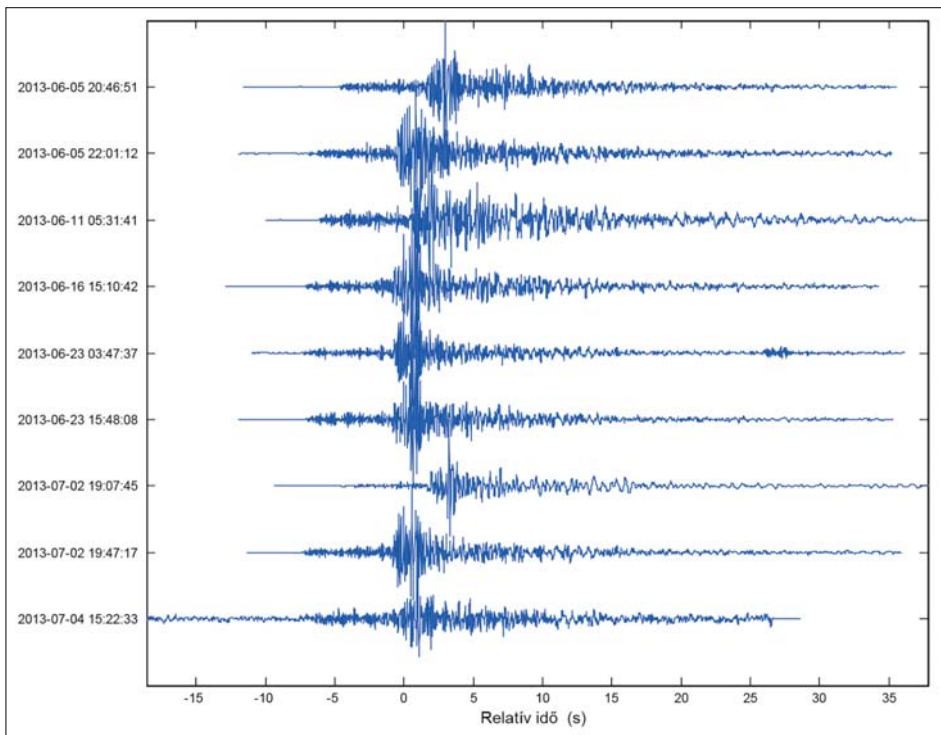
Figure 6 | The dendrogram of similar events above the critical correlation coefficient ($c_{xy} > 0.6$). The main cluster are labeled



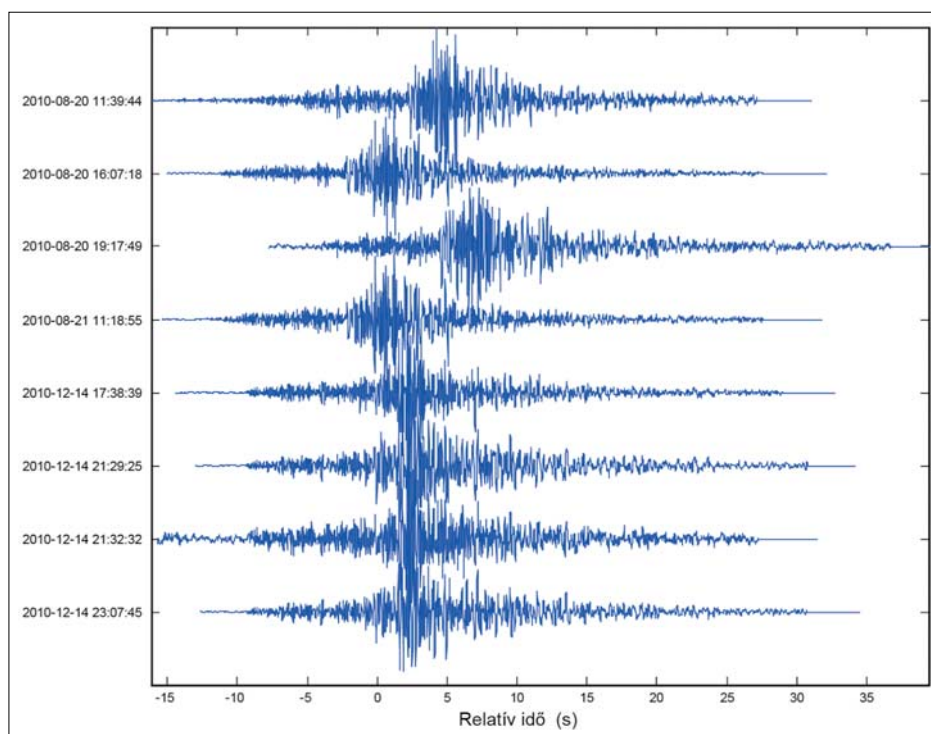
7. ábra | A legnagyobb (11 elemű) klaszter eseményei a kishánai bánya robbantásaiból származtak
Figure 7 | The events of the largest cluster (consisting of 11 elements) originated from the blasts of the Kishána mine

szűrővel megszűrtük, hogy a zavaró kis periódusú jeleket eltávolítsuk. Két esemény közötti korrelációs együttható meghatározásához eltoltuk egymáshoz képest a szeizmo-

grampárokat, megkerestük a két esemény közötti korrelációs együttható maximális értékét, és ezt minden lehetséges párra elvégeztük.



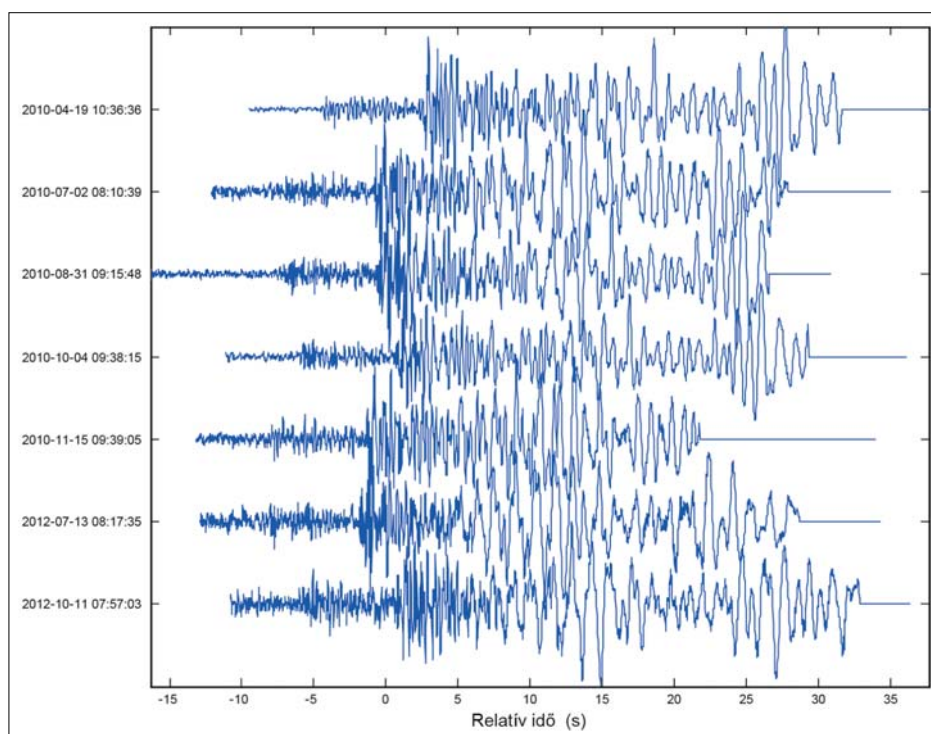
8. ábra | A második legnagyobb (9 elemű) klaszter elemei az Érsekvadkert térségében kipattant földrendésekhez tartoztak
Figure 8 | The second largest cluster (consisting of 9 events), were belonged to earthquakes of area Érsekvadkert



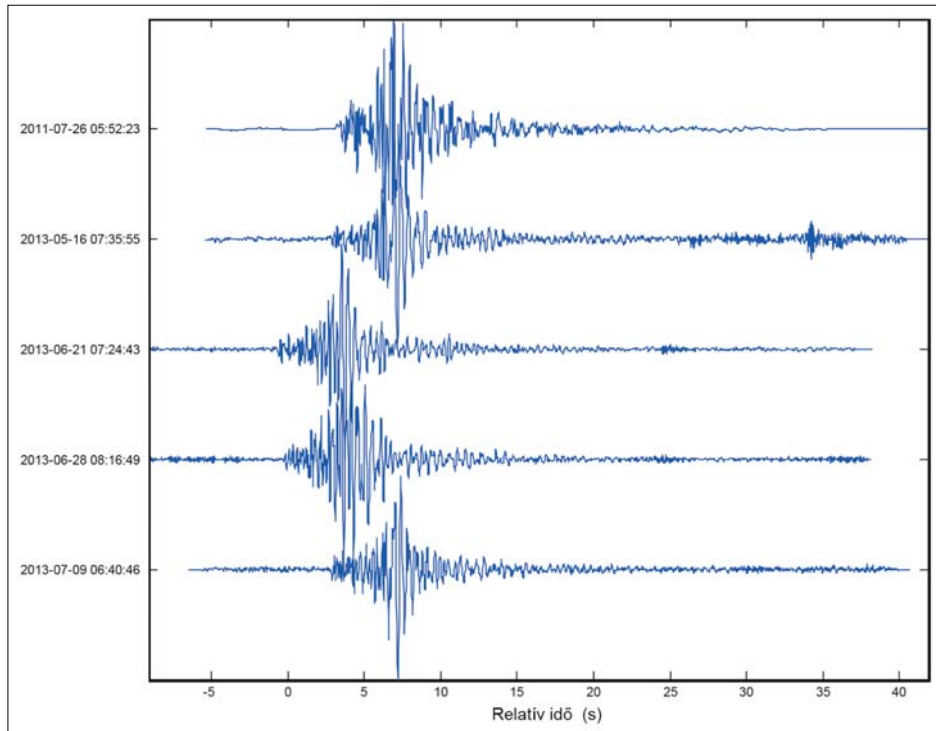
9. ábra | A harmadik legnagyobb (8 elemű) klaszter elemei a Felsőszolca–Bükkaranyos térség rengései voltak
Figure 9 | The third largest cluster consisting of 8 events, were belonged to earthquakes of area Felsőszolca–Bükkaranyos

A kritikus korrelációs együttható értékét, amely fölött hasonlóknak tekintettünk két eseményt, $c_{xy} = 0,6$ -nak választottuk, ami nem túl szigorú feltétel. Ennek alapján összesen

114 esemény mutatott a kritikus értéknél ($c_{xy} = 0,6$) nagyobb hasonlóságot valamely másik eseménnyel. Az elemzés vég-eredményét a rendezett korrelációs mátrix (5. ábra), a ha-



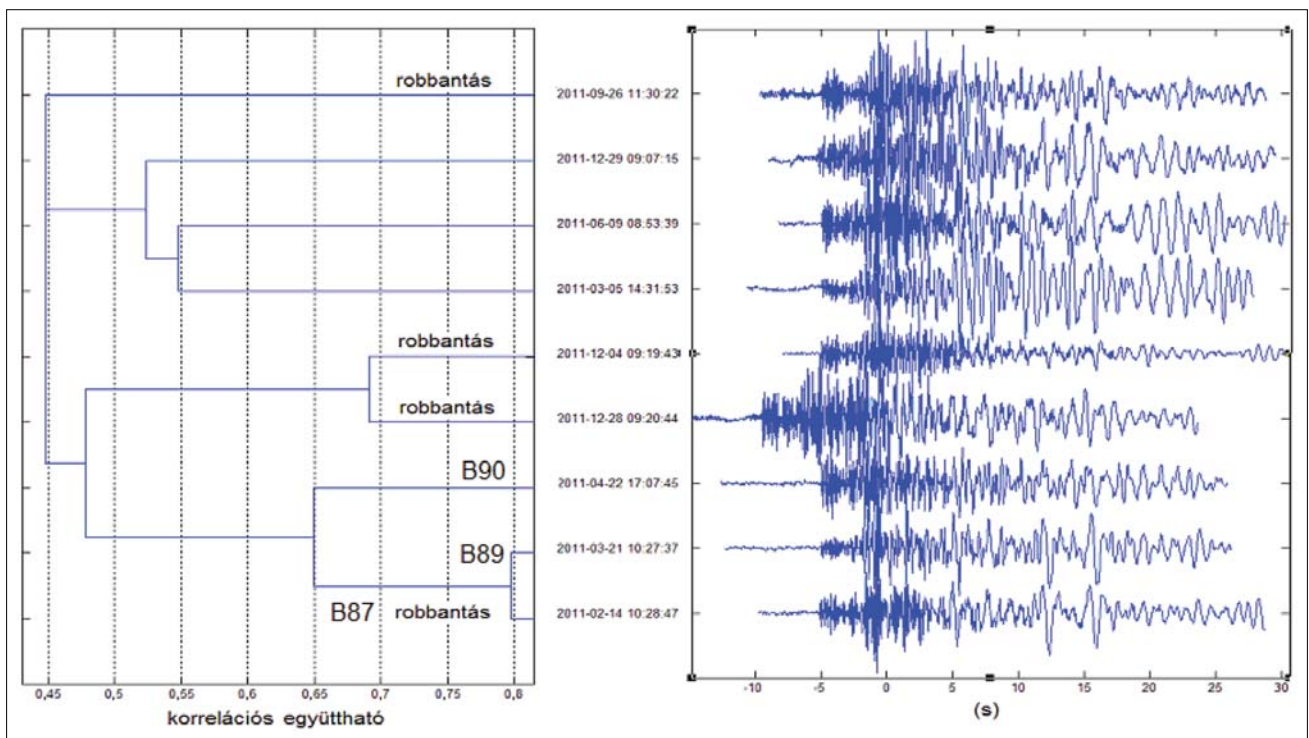
10. ábra | A 7 elemű klaszter eseményei *nagydaróci* robbantások voltak
Figure 10 | This cluster consisting of 7 events, were belonged to blasts of *Nagydaróc*



11. ábra | A gyöngyössolymosi bányarobbanás klasztere. Az EQ25 sorszámú mátraszentimrei földrengés (2011.07.26) hullámformája e robbantásokkal alkotott közös klasztert

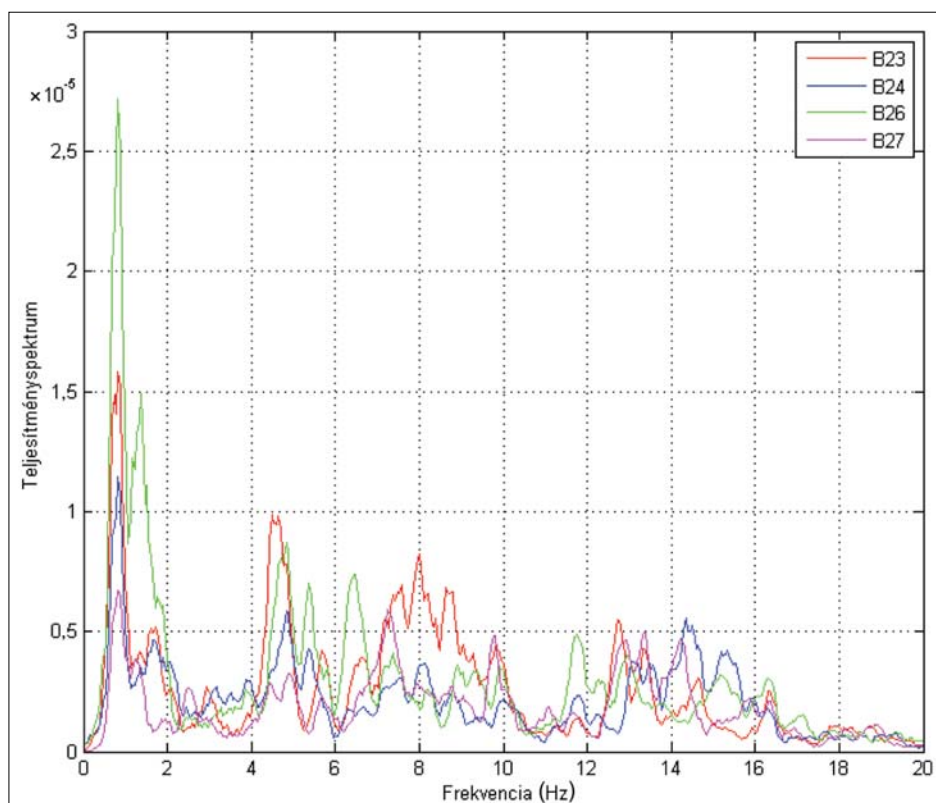
Figure 11 | The cluster of explosions of quarry Gyöngyössolymos. The waveform of EQ25 earthquake occurred in Mátraszentimre (2011.07.26) formed common cluster with these blasts

sonlóság alapján „rokonsági” ágakba csoportosított események dendrogramja (6. ábra) mutatja. Az ábrákon összesen | 116 esemény szerepel. A legnagyobb hasonlóság alapján négy nagyobb klaszter alakult ki, egy-egy 11, 9, 8 és 7 ele-

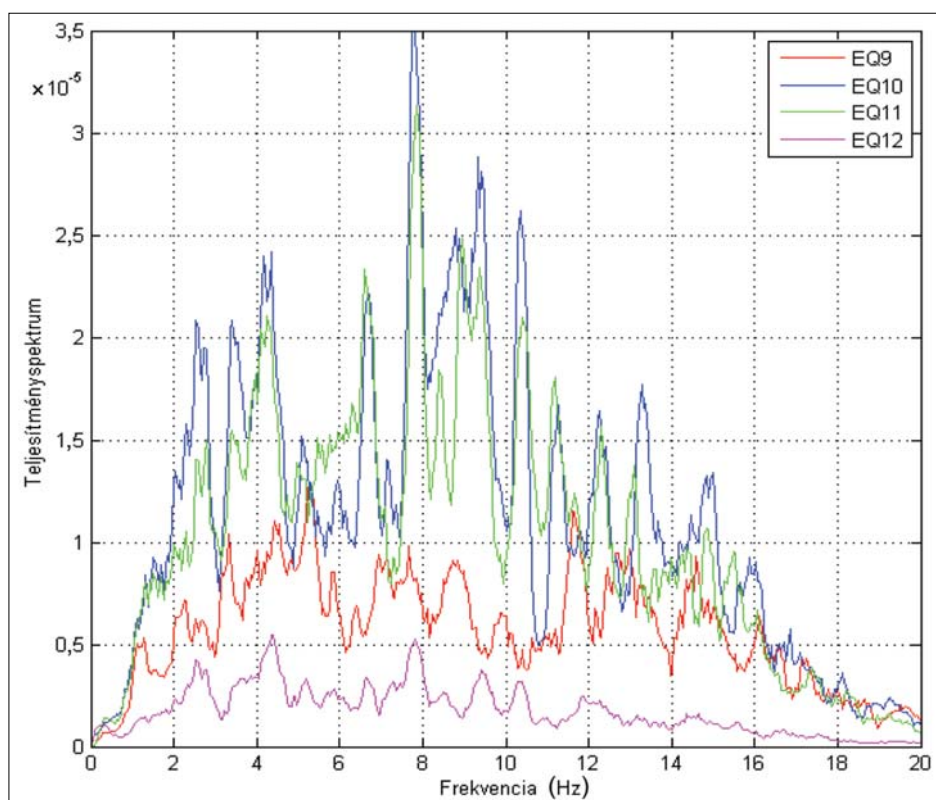


12. ábra | A nagylóci bánya robbantásai esetén egy 3 elemű klaszterbe került a kérdéses B89-B90 esemény 1 igazolt robbantással

Figure 12 | In the case of mine Nagylóc, the question B89 and B90 events formed a three element cluster with the proven B90 explosion



13. ábra | Néhány *kiszánai* robbantás spektruma
Figure 13 | Some blasting spectra of *Kiszána*



14. ábra | Néhány földrengés spektruma
Figure 14 | Some earthquake spectra

mű, valamint két 5 elemű és öt 4 elemű. Ezen kívül öt db 3 elemű és további tizenhat 2 elemű dubletet kaptunk még.

Az 5 legnagyobb klaszter a 6–11. ábrán látható. A 11. ábra a gyöngyössolymosi robbantások legnagyobb, 5 elemű klaszterét mutatja, ami azért érdekes, mert egy korábban földregésnek tekintett esemény (EQ25: 2011.07.26. Mátra-szentimre) több, 2013-as igazolt robbantáshoz hasonlít leginkább. Ez az esemény tehát tévesen került a földregések közé. A recski bányarobbanások 3 elemű klasztere pedig azért tanulságos, mert a B96 sorszámu, 2011.11.25-én végrehajtott, korábban egyik bányához sem köthető robbantás itt két, 2013-as igazolt bányarobbanással került egy csoportba.

Az egyes bányák esetében a robbantások nem mindig alkottak egyetlen csoportot. Például a *kisnánai* robbantások a legnagyobb klaszter (7. ábra) mellett 4 további kisebb csoportba rendeződtek. A *nagydaróci* bánya robbantásai 3, a *gyöngyössolymosi*, *berceli*, *gyöngyöstarjáni* és *recski* robbantások 2-2 klasztert hoztak létre. A *nagylóci* bánya robbantásai közül egy 3 és egy 2 elemű csoport jött létre. A 9 nagylóci esemény hasonlósági dendrogramját és szeizmogramjait a 12. ábra mutatja. Az események közül azonban csak 4-et igazolt vissza a bánya, ezeket felirattal jelöltük. Az előbbi azért fontos, mert két kérdéses eredetű esemény (B89-B90) egy igazolt robbantással (B87) mutatott nagy hasonlóságot. Ezért ezek az események robbantásnak tekinthetők. A *szalóci* bányavidék robbantásai nem alkottak egy klasztert sem, tehát egyik robbantás sem hasonlított a másikra.

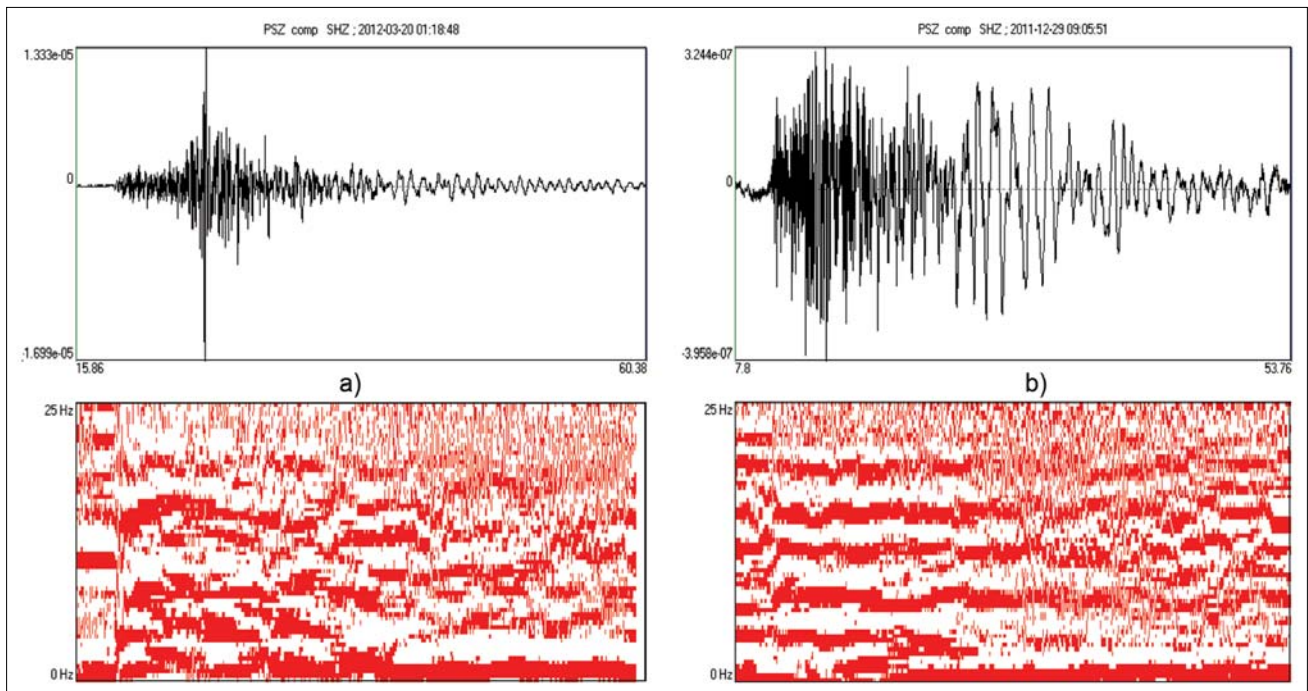
A földregések 17 hasonlósági csoportba rendeződtek, de a robbantásokkal egy esetben sem keveredtek.

Az 1. és 2. táblázatban felsorolt 204 esemény közül a $c_{xy} = 0,6$ feltétel szerint 114 esemény volt hasonló valamely

másik eseményhez, ebből 54 volt földregés és 60 robbantás, ami a regések 52, a robbantások 60%-ának felelt meg. A 28 *kisnánai* robbantás szeizmogramjai közül 21 került bele 5 különböző klaszterbe. A kritikus korrelációs együtttható értékét $c_{xy} = 0,5$ -re csökkentve még mindig nem keveredtek a robbantások a földregésekkel. Ekkor a robbantások 84, a regések 60%-a került bele különböző csoportokba. A $c_{xy} = 0,6$ esetén kialakult klaszterek részben bővültek, részben összeolvadtak. A *kisnánai* 28 robbantás 4 csoportjába most 24 esemény került bele, majdnem az összes robbantás. A földregések esetében érdekes, hogy ugyanarról a szűk területről több klaszter is kialakult, ezek talán mélységükben vagy fészekmechanizmusukban térhettek el egymástól.

A robbantások és földregések spektrumainak jellegzetességei

A vizsgált bányákban a robbantásokat a késleltetett robbantási technikával hajtották végre. Ezzel a módszerrel el lehet érni a köztömbök kellő szétzúzását, és csökkenteni a zajt valamint a környező települések megrázottságát, zavarását. E technika lenyomata a spektrumban annak csipkézettsége lesz. A 13. ábrán néhány *kisnánai* bányarobbanás, a 14. ábrán a *bükkaranyosi*, 2010-es évben kipattant néhány földregés simított spektruma látható. Megfigyelhető mindkét esetben az egyes csoportokhoz tartozó spektrumok hasonlósága és a robbantásoknál a jellemző csipkézettség. A robbantások esetében figyelembe véve az összes bányát, a legnagyobb maximum az első csúcsonál, alacsony frekvencián, 4 Hz alatt volt tapasztalható. A földregéseknél a legna-



15. ábra | Földregés a) és robbantás b) tipikus bináris spektruma

Figure 15 | Typical binary spectra of a) blast and b) earthquake

gyobb spektrumteljesítmény ennél magasabb frekvenciához tartozott. Ez a tapasztalat megegyezik pl. Wüster (1993) Németország és Csehország határán (Vogthland) kipattant M_L 1–3 mikroregések és kémiai robbantások spektrumainak elemzésével. Azt találta, hogy a földregések esetében az S hullámok spektruma magasabb frekvenciákra terjedt ki, és az 1–10 Hz közötti tartományban a teljesítménye lassabban csökkent, mint a robbantásoké.

A bináris spektrogramok elemzésével az időtől független spektrummodulációk meglétét követtük nyomon. A spektrumot két különböző hosszúságú ablakban futó átlagot számoló szűrővel alakítottuk át binárisá. Ha a rövid átlag értéke nagyobb volt, mint a hosszabbé, a spektrum '1', ha kisebb, '0' értéket kapott. A rövid átlagot 1,17 Hz, a hosszút pedig 3,5 Hz széles frekvenciaablakból számítottuk. A bináris spektrogram számításával piros/fehér színekkel kódolva a spektrum csipkézettiségeinek időbeli stabilitását követtük nyomon (15. ábra). A vizsgált földregésekre ez az időtől független moduláció nem volt jellemző, míg 100 robbantás közül csak 7 esetben nem alakult ki.

Következtetések

A szeizmicitásról alkotott kép kialakítása és a tektonikai értelmezés szempontjából hazánkban is nagyon fontos, hogy el tudjuk különíteni a mikroregéseket és a kémiai bányarobbantásokat. A dolgozatban a Mátra hegység második legmagasabb csúcsán elhelyezett pizskéstetői (PSZ) állomáson detektált 8 különböző bányarobbantásainak és a terület földregéseinek az időbeli eloszlását, hullámformájuk hasonlóságát és spektrumuk jellemzőit vizsgáltuk.

A legkézenfekvőbb elkülönítő módszer az esemény helyét és idejét használja fel. Mivel az epicentrumok meghatározási pontossága több vizsgált robbantás esetében az 5–10 km-t is meghaladta, csak az epicentrum alapján nem lehetett kiválogatni őket.

A bányák esetében ki tudtunk jelölni egy időablakot, amelyen belül általában a robbantások történtek. De ebben az időablakban történtek földregések is. A hétköznapi-hétvége felosztás sem ad egyértelmű minősítést, mert a rengések 76%-a is hétköznapra esett.

A hullámformák hasonlóságának elemzésétől azt vártuk, hogy az ugyanabból a bányából származó események nagyon hasonlóak lesznek egymáshoz. De annak ellenére, hogy egy adott bánya és regisztráló állomás esetében a robbantás szeizmikus hullámjai mindig ugyanazokon a közetregtegeken hatolnak át, nem minden azonos bányából származó robbantás bizonyult egymáshoz hasonlóknak. A robbantások végrehajtása során használt eltérő mennyiségű robbanóanyag és töltetelrendezés ugyanis olyan egyedi hullámformákat hozott létre, ami miatt keresztkorrelációjuk kicsi lett. Mind a robbantások, mind a földregések több klaszterbe rendeződtek, de a robbantások nem keveredtek össze a földregésekkel. A különböző bányák robbantásai különböző klaszter(ek)e)t alkottak, ezért ha létrehozuk az egyes bányákhoz tartozó hullámforma-adatbázist (folyamatosan bő-

vítve azt), lehetővé válik a robbantások 100%-os kiszűrése. Ezek megerősítéséhez azonban nagyon fontosak a bányakapitányságoktól kapott információk is.

A csoportok elemei eltérő magnitúdójú eseményeket tartalmaztak, de a hullámformák hasonlóságára ez nem volt nagy hatással. Például a második legnagyobb klaszter legkisebb és legnagyobb eleme M_L 1,6, illetve M_L 3,4 méretű földregés volt. A recski, nagylóci és gyöngyössolyosi robbantások klaszterei esetében korábban földregésnek vagy ismeretlen eredetűnek tekintett robbantást sikerült azonosítani a hullámformák hasonlósága segítségével.

A miskolci, hevesi és érsekivádkerti utóregések is hasonlósági csoportokba rendeződtek. Ezeknek a rengéseknek az epicentrumai nagyon közel (3–4 km) estek egymáshoz, időben pedig maximum néhány hónap különbséggel pattantak ki. Az utóregéseket tartalmazó klaszterek elemeiről elmondhatjuk, hogy hasonló epicentrumú és fészekmechanizmusú eseményekből állnak, ami a tektonikus feszültségek kioldódásának folyamatáról adhat információt.

Olyan földregés is bekerült a második legnagyobb klaszterbe, amelynek hipocentrumát a kevés regisztráló állomás miatt nem sikerült meghatározni (EQ101: 2013.07.04 15:22). Elméleti megfontolások alapján ennek az eseménynek epicentruma és fészekmechanizmusa hasonló a többi, vele egy klaszterbe került ismert földregéséhez. Hasonló példa volt még 2012-ben a Vértes hegységben található Gánton, ahol történt egy M_L 2,7 rengés, amelyet nagyon sok kisebb utóregés követett. Ezeket csak egyetlen állomás regisztrálta, epicentrumaikra így csak a hullámformák hasonlósága révén lehetett következtetéseket levonni (Kiszely 2013).

A spektrumok elemzése is figyelemre méltó eredményt adott, mivel a legtöbb robbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő csipkézettesség. A csipkézettesség kb. az 1–10 Hz közötti spektrum tartományra volt leginkább jellemző. Az egyes frekvenciák teljesítményének megemelkedése a nagyobb frekvenciák felé haladva újra jelentkezett, de egyre kisebb amplitúdóval. Robbantások esetén a teljesítményspektrumok amplitúdója az első „csipke” miatt az 1–4 Hz közötti sávban volt a legmagasabb. Néhány földregés esetén is meg lehetett figyelni egyes frekvenciák megemelkedett teljesítményét, de a spektrum szélesebb frekvenciatartományra terjedt ki, mint a robbantások esetében. A magasabb frekvenciák felé haladva gyorsabban csökkent a robbantások teljesítményspektruma, mint a földregések esetében.

A legtöbb bányarobbantás spektrumán megfigyelhető volt a késleltetett robbantási technika miatt fellépő, időtől független moduláció (100 robbantás közül mindössze 7 esetben nem alakult ki). A bináris spektrogramon az időtől független moduláció az esemény végéig követhető volt, míg a földregések bináris spektrogramjára nem voltak jellemzőek a „sávok” szakaszok.

Összefoglalásként megállapítható, hogy az aktív vetők kijelölésekor a katalógusban szereplő mikroregések természetes eredetét ellenőrizni kell, mert ebben a mérettartományban már bányarobbantások is nagy számban előfordul-

nak hazánkban. A robbantások és földrendések elkülönítésére a hullámformák hasonlóságának elemzése jó eredményt adott. A klaszterekbe rendezett események szétváltak egymástól bányák szerint, és különböző rengésrajok szerint is. Vizsgálataink szerint a késleltetett robbantási módszer következtében kialakuló spektrum csipkézettsége és a spektrogramon nyomon követhető időtől független moduláció jelenléte jó elkülönítő paraméternek bizonyult. Fontos felvenni a kapcsolatot a területen az érintett bányakapitány-ságokkal a robbantási időpontok megismerése céljából, és egy több évet átfogó, az egyes bányákra vonatkozó robbantási hullámformamintát összeállítani.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnénk megköszönni a GeoRisk Földrengés Mérnöki Irodának, hogy a 2013-as eseményekre a havi földrendések tájékoztatóit felhasználhattuk az epicentrumok paramétereinek forrásaként. A cikk a 105399. sz. OTKA pályázat keretében végzett kutatás része.

A tanulmány szerzői

Kiszely Márta, Győri Erzsébet

Hivatkozások

Baisch S., Ceranna L., Harjes H-P., 2008: Earthquake cluster: What can we learn from waveform similarity? *BSSA* 98/6, 2806–2814
 Baumgardt D. R., Young G. B., 1990: Regional seismic waveform discrimination and case-based event identification using regional arrays. *BSSA* 80/6, 1874–1892
 Carr B. D., Carbin H. D., 1998: Discrimination ripple-fired explosions with high-frequency (>16 Hz) data. *BSSA* 88/4, 963–972
 Chapman M. C., Bollinger G. A., Sibol M. S., 1992: Modeling delay-fired explosion spectra at regional distances. *BSSA* 82/6, 2430–2447
 Gitterman Y., Van Eck T., 1993: High-frequency spectra of regional phases from earthquakes and chemical explosions. *BSSA* 83/4, 1184–1212

Deichmann N., Garcia-Fernandez M., 1996: Rupture geometry from high-precision relative hypocenter locations of microearthquake clusters. *Geophys. J. Inst.* 110, 501–517
 Grácz Z., Czifra T., Kiszely M., Mónus P., Zsíros T., 2012: Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2011, Budapest, MTA CSFK GGI, 2012, p. 357
 Grácz Z., Czifra T., Győri E., Kiszely M., Mónus P., Süle B., Szanyi Gy., Tóth L., Varga P., Wesztergom V., Wéber Z., Zsíros T., 2013: Magyar nemzeti szeizmológiai bulletin 2012, Budapest, MTA CSFK GGI, 2012, p. 258
 Hage M., Joswig M., 2009: Mapping local microseismicity using short-term tripartite small array installations – Case study: Coy region (SE Spain), *Tectonophysics* 471, 225–231
 Hedlin M. A. H., Minster J. B., Orcutt J., 1989: The time–frequency characteristics of quarry blasts and calibration explosion recorded in Kazakhstan, USSR. *Geophys. J. Int.* 99, 102–121
 Kim W. Y., Simpson D. W., Richard P. G., 1993: Discrimination of regional earthquakes and explosions in eastern United States using high-frequency data. *Geophys. Res.*
 Kiszely M., 2012: A hullámforma korreláció használata mikrorengések elemzésére – 2012. április 6., Vértes. *Geomatikai Közlemények* XV, 119–127; *Lett.*, 20, 1507–1510
 Koch K., Fáh D., 2002: Identification of earthquakes and explosions using amplitude ratios: The Voghtland area revisited. *Pure Appl. Geophys.* 159, 735–757
 Massa M., Eva E., Spallarossa D., Eva C., 2006: Detection of earthquake clusters on the basis of waveform similarity: An application in the Monferrato region (Piedmont, Italy). *Journal of Seismology* 10, 1–22
 Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T., 2011: Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2010. MTA GGKI és GeoRisk Kft., Budapest, 140 o., HU ISSN 1589-8326
 Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T., 2012: Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2011. GeoRisk Kft., Budapest, 160 o., HU ISSN 1589-8326
 Tóth L., Mónus P., Zsíros T., Kiszely M., Czifra T., 2013: Magyarországi Földrendések Évkönyve, Hungarian Earthquake Bulletin, 2012. GeoRisk Kft., Budapest, 88 o., HU ISSN 1589-8326
 Wüster J., 1993: Discrimination of chemical explosions and earthquakes in Central Europe – a case study. *BSSA* 83/4, 1184–1212
 USGS: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqarchives/mineblast/evidence.php> (2013)
 GISMO: <http://giest.alaska.edu/Seis/EQ/tools/matlab>