

A medencealjzat jelentősége az ásványi nyersanyagok kutatásában – Athabasca-medence, Kanada

Szemelvények a kanadai ásványi nyersanyag kutatásából I.

HAJNAL Z.¹, TAKÁCS E.^{2,®}, PANDIT B.¹, GYÖRFI I.³, NÉMETH B.⁴

¹Dept. of Geological Sciences, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada

²Magyar Földtani és Geofizikai Intézet, Budapest, Hungary

³Claren Energy Corporation, Singapore

⁴BHP Billiton, Saskatoon, Canada

®E-mail: takacs.erno@mfgi.hu

A kanadai pajzson elhelyezkedő Athabasca-medencében a szeizmikus reflexiós módszert az utóbbi 20 évben használják uránkutatási célból a már ismert érclepek tágabb földtani környezetének szerkezeti vizsgálatára. A medence keleti részén a telepek olyan kéregléptékű, mélybe hatoló nyírási zónákkal vannak összefüggésben, amelyek a Trans-Hudson orogén során képződtek és később felújultak a medencekitöltő homokkőüledékek lerakódása közben, illetve azt követően. Az Athabasca homokkő-formációk és az alattuk lévő medencealjzat szeizmikus (közöttani) tulajdonságait fúrásokban történt *in situ* mérésekből és a magmintákból határozták meg. A homokköveken belüli reflektivitás általában csekély. A kialakuló szeizmikus jelek elsősorban a repedéssűrűség és a porozitás változásaival, valamint a szilikátosodás fokával hozhatók kapcsolata. A kutatás elsődleges célpontjait az aljzati unkonformitást (diszkordanciafelület) és a regolitot (málladéktakaró) már viszonylag nagy területen feltérképezték, ezek változó, azonban többnyire jól megkülönböztethető reflexiókkal jellemezhetők. Az ismert ércesedési zónák környezetében végrehajtott 3D szeizmikus mérések az ásványosodással összefüggő helyi tektonikai szerkezeteket tárták fel, és új kutatási célterületeket jelöltek ki a korábbiaknál hatékonyabb fúrási programokat eredményezve. A szeizmikus adatokból szerkesztett tektonikai és kőzetminőség-térképek jelentős szerepet játszhatnak a bányászati tervezés előkészítésekor is.

Hajnal, Z., Takács, E., Pandit, B., Györfi, I., Németh, B.: The importance of basement in mineral exploration – Athabasca Basin, Canada. Selected studies from the Canadian mineral exploration I.

Seismic-reflection techniques have been applied in several studies over the last 20 years as a uranium-exploration tool within the Athabasca Basin of the Canadian Shield and have been utilized to provide the larger structural context for known uranium deposits within the basin. At the crustal scale, deposits within the eastern Athabasca Basin are shown to be associated with deep-seated shear zones originated during Trans-Hudson orogeny and have subsequently been reactivated during and subsequent to deposition of the basin-fill sandstones. Seismic properties of the Athabasca sandstones and underlying basement have been determined through *in situ* borehole measurements and core samples. Reflectivity within the sandstones is generally weak. Seismically recognizable signatures are primarily associated with variations in fracture density, porosity, and degree of silicification. The basement unconformity and regolith, the prime targets of exploration, are widely imaged as they are characterized by variable but generally distinct reflectivity. Three-dimensional (3-D) seismic imaging near existing ore zones can define the local structural controls on the mineralization and point the way to new targets, thus leading to more efficient exploration drilling programs. Furthermore, seismically generated structural maps of the unconformity and rock competence properties may play a significant role at the outset of mine planning.

Beérkezett: 2017. május 7.; elfogadva: 2017. június 8.

Bevezetés

A multidiszciplináris LITHOPROBE földtudományi kutatási projekt célja az észak-amerikai kontinens északi fele földtani fejlődéstörténetének átfogó megértése volt (Clowes 2010). A kanadai geológia egy mozaikszerű, összetett „kirakós játék”, amely négy milliárd év kontinentális fejlődését, lepusztulását és újrendeződését reprezentálja (1. ábra). A mozaik jelenkori geológiai elrendeződését kialakító folyamatokat a litoszféra rejtett indikátoraiából kellett meghatározni. A kőzetjellemzők felszíni eloszlásának ismeretén kívül, a legalapvetőbb kérdések megválaszolásához a harmadik és a negyedik dimenzió (a mélység és idő) megismerésére is szükség volt. Ezért a program gyakorlati megvalósításához a földtudományi diszciplínák teljes eszköztárának bevetésére, valamint jól képzett szakemberek alkalmazására volt szükség.

A program feltárta, hogy a sikeres ásványi nyersanyag- és energiaforrások kutatásához elengedhetetlen a kontinentális kéreg és néhány esetben a teljes litoszféra felépítésének és fejlődésének megértése. A regionális földtani és tektonikai felépítésen és folyamatokon kívül, azok kapcsolatainak és hatásainak a vizsgálata a lelőhelyek kialakulására vonatkozólag lényeges része volt a projektnek. A regionális mélyszeizmikus szelvények egymástól jelentősen különböző földtani kialakulású területeket harántoltak. Amikor a kutatás bányaterület vagy aktív ásványi nyersanyag-termelés területére ért, mindig kerestük az ipar közvetlen támogatását és együttműködését.

A program sikerének és hatékonyságának bemutatása céljából példákat mutatunk be arra az átfogó LITHOPROBE, intézményi és ipari együttműködésre, amely a Trans-Hudson Orogen (THO) területére terjedt ki (1a ábra). Ez a paleoproterozoós ütközési zóna és az Athabasca-medence – amelyek a kontinentális kéregképződmény nyugati szegélyén helyezkednek el – számos igen magas urántartalmú telepnek ad helyet. A LITHOPROBE projekt regionális mélyszeizmikus reflexiós szelvényei és a McArthur River bányaterületen később hozzájuk kapcsolódó lokális szeizmikus kutatások leképezték a földkérget a Moho mélységéig. Az eredményül kapott integrált 3D képek felfedték az érctelep és a tektonikus konvergencia következtében kialakult földtani-szerkezeti rendszer közötti kapcsolatot. A térképezett komplex vetőrendszerek azt mutatják, hogy a folyadékáramláshoz és az azzal kapcsolatos ércdúsuláshoz szükséges migrációs útvonalat a korábbi repedezett zónák tektonikai felújulása és extenziója szolgáltatja. A nagy felbontású 2D és pszeudo-3D reflexiós eredmények rámutattak arra, hogy a fő inverz vetőhöz (P2) transzkurrens vetők kapcsolódnak, és az érctelepek ilyen találkozási pontoknál helyezkednek el. A mélyfúrás-geofizikai adatok (a teljes hullámképes szónikus mérésekből kapott P- és S-hullámsebességek, a sűrűség és a porozitás, valamint a geoelektromos ellenállásslévények) analízise szerint az ércesedési zónához kapcsolódó földtani-szerkezeti keret leképezésén kívül a másik elsődleges indikátor, azaz a hozzájuk kapcsolódó megváltozott kőzetfizi-

kai tulajdonságú zóna (alteration halo) is kimutatható a szeizmikus adatok attribútumanalízisével (Takács et al. 2015).

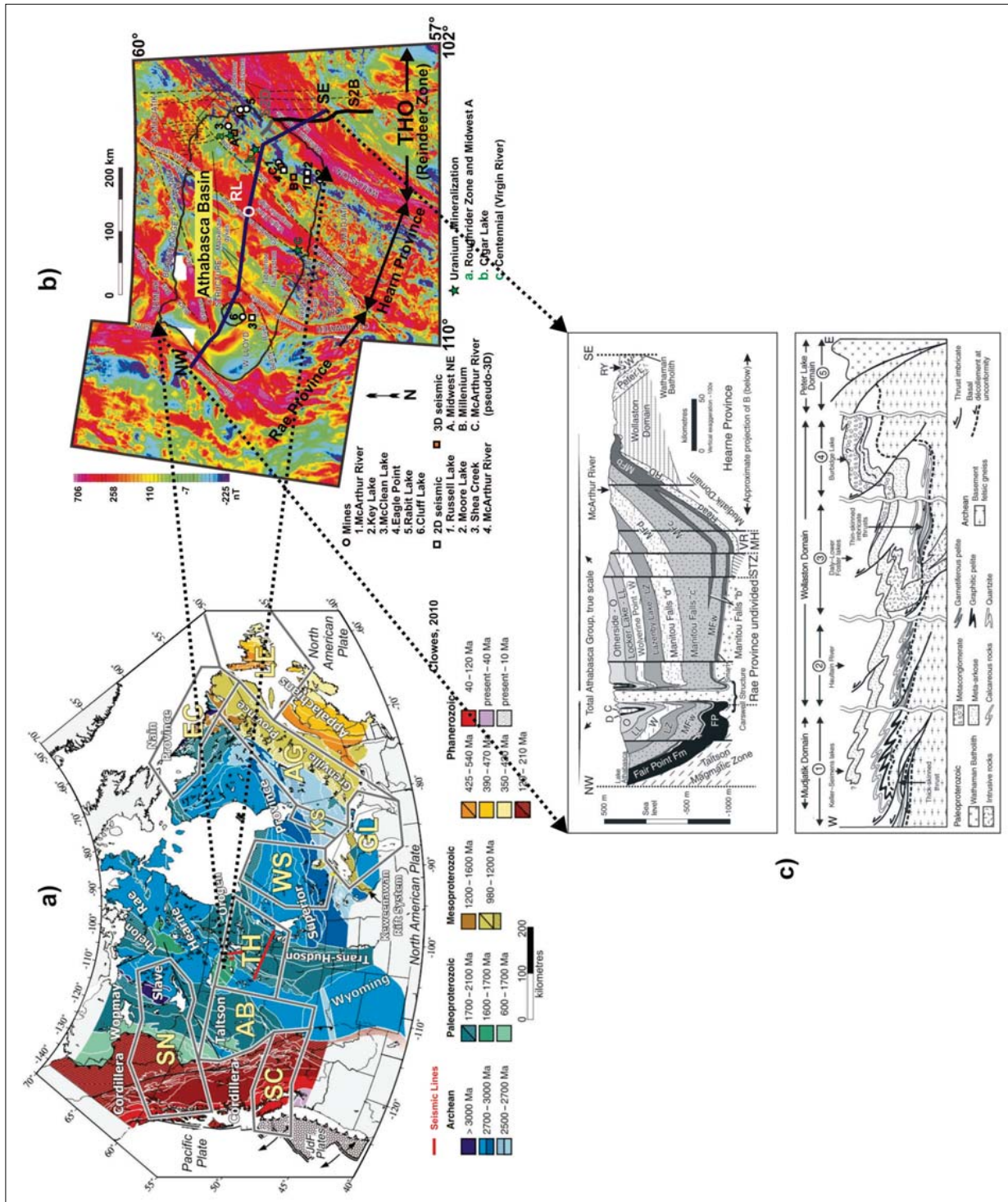
Földtani környezet

A paleoproterozoós Trans-Hudson Orogen (THO) egy olyan kontinentális méretű ütközési öv maradványa, amely számos archaikumi kratont alakított ki, és érintett különböző mértékben a Laurentia fejlődése során. Saskatchewan tartomány déli részétől észak Quebecig és a Baffin-szigetekig terjed. A LITHOPROBE projekt Trans-Hudson Orogen Transectje (THOT) a THO Manitoba–Saskatchewan szegmensének litoszférikus szerkezetét vizsgálta (Hajnal et al. 2005), amelyben az archaikumi Superior, Hearne és Sask kratonok helyezkednek el, valamint a közöttük lévő paleoproterozoós kőzetek. Az orogén öv belsejét a Reindeer Zone alkotja számos litotektonikus egységgel, amelyek többsége jelentős litoszférikus szeizmikus képpel bír, és így figyelemre méltó háromdimenziós képet nyújt a világ egyik legjelentősebb és legjobban megőrződött paleoproterozoós orogén övéről.

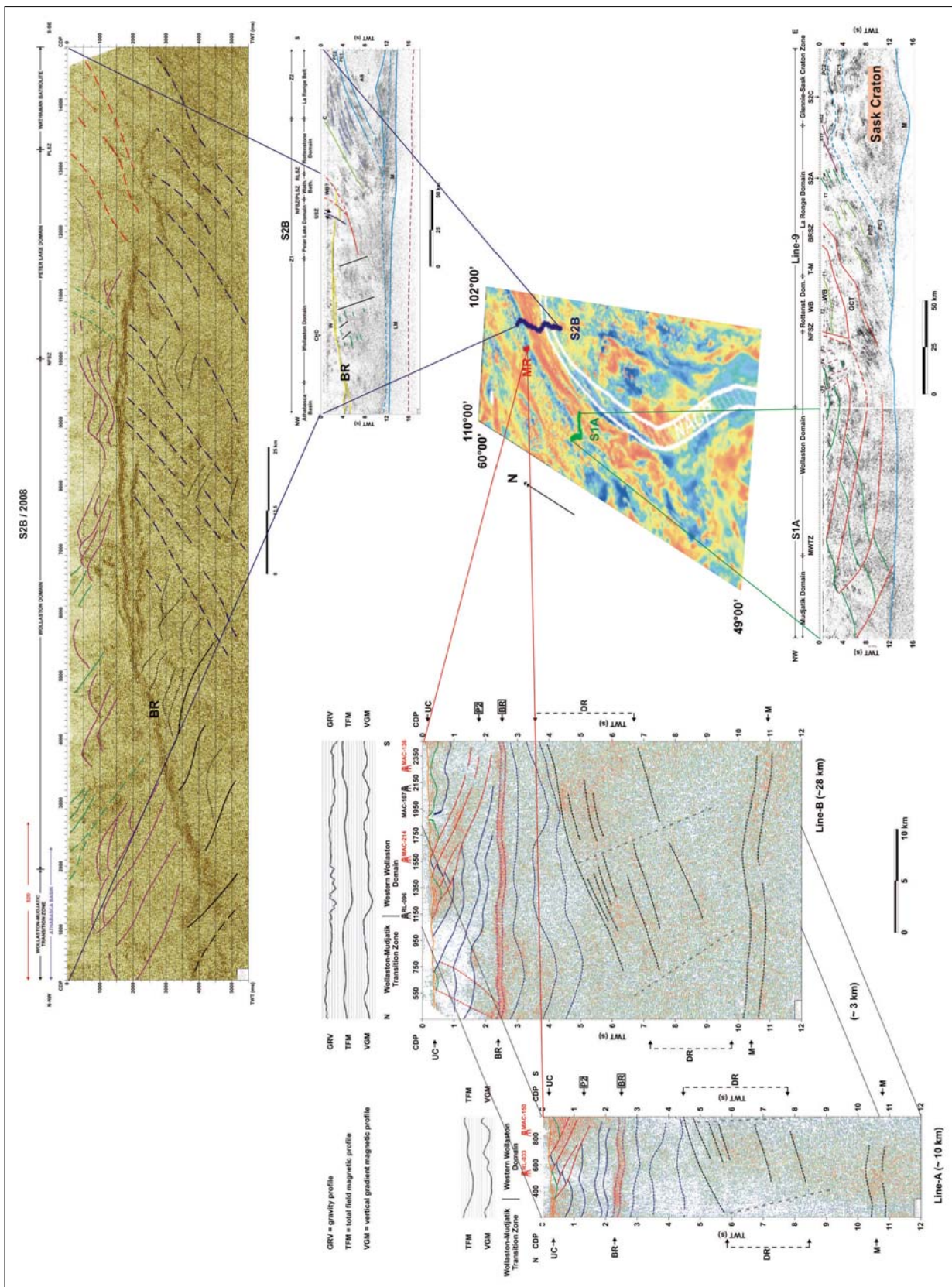
A keleti Athabasca-medence alatti aljzat (1b ábra), a Hearn és Rae kratonok jelentősen deformált, ÉK irányítottaságú, a középeztől erős fokig metamorfizált, az archaikumtól a paleoproterozoós korig terjedő kőzeteiből épül fel. A Hearn-provincia tovább osztható a Mudjatik és Wollaston doménekre (Lewry, Collerson 1990). A nyugati Athabasca-medence aljzata kevésbé ismert. A medencekitöltő mezoproterozoós üledékes kőzetek (1c ábra) a változó vastagságú (0–90 m), negyedidőszaki glaciális hordalékok alatt helyezkednek el. A medencekitöltés laposan települt (legnagyobb vastagsága ~1800 m) és kvarcban gazdag, fluviális konglomerátum, homokkő és agyagkő szekvenciákat tartalmaz, melyek tektonikusan metamorfizált, erodált képződményekre rakódnak. Az aljzat diszkordanciára (UC) települt regolitréteg változó vastagságú (0–70 m) és általában kapcsolatban van az érctelepekkel. A homokkő és az alatta lévő aljzat kőzetei számos törésszerű deformációs eseménynek voltak kitéve, beleértve korábbi képlékeny deformációk (gyűrt szerkezetek) törésszerű kiújulását (nyírási zónák). Az eredményekkel kapcsolatos publikációk teljes listája körülbelül 140 cikket foglal magában.

Szeizmikus kutatások

A szeizmikus felmérés összesen kb. 2000 km mélyszeizmikus reflexiós szelvényt (2. ábra), számos helyi kutatáshoz kapcsolódó, nagy felbontású 2D szelvényt és egy pszeudo-3D mérést, valamint három, egyenként több mint 700 km hosszúságú refrakciós vonalat foglalt magában. Az adatgyűjtési paraméterek Hajnal és munkatársai (2005, 2010) publikációikban foglalták össze. A Sask Craton mikrokontinens felfedezése a THO középső régiójában intenzív



1. ábra Az Athabasca-medence földtani környezete (a), mágneses potenciál térképe (b) és egy jellemző földtani keresztmetszete (c)
 Figure 1 Surrounding geology of the Athabasca Basin (a), its geomagnetic potential field map (b), and a typical geological cross-section (c)



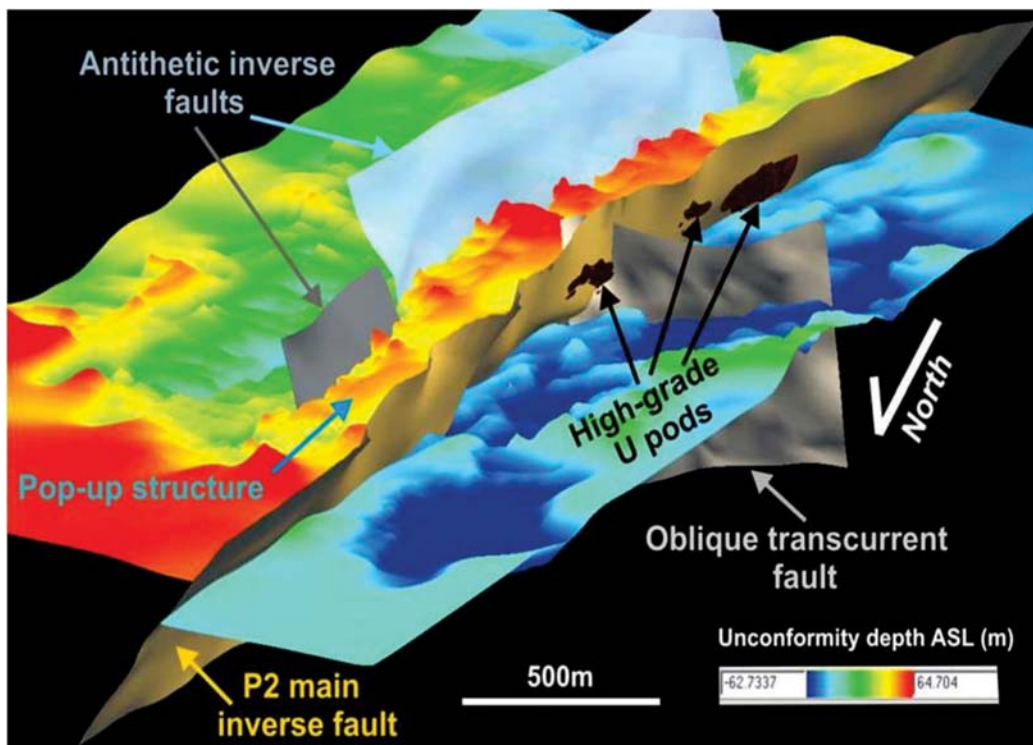
2. ábra | LITHOPROBE és EXTECH-IV mélyszizmikus szelvények
 Figure 2 | Deep seismic sections (LITHOPROBE and EXTECH-IV projects)

továbbkutatási tevékenységet váltott ki. A Line-9 mélyszeizmikus szelvény nyugati részén észlelt, NY felé dőlő erős reflexiók azt bizonyítják, hogy az orogén nyugati szegélye egy szubdukciós folyamat eredménye. Regionális léptékben a konvergenciazóna egy ÉK irányítottágú mágneses és geoelektromos anomáliával esik egybe, ami lehetőséget nyújtott a litoszféra további vizsgálatára több száz kilométerrel északra (S2B szelvény). A McArthur River bányaterület környezetében mért Line-A és Line-B mélyszeizmikus szelvények (EXTECH-IV projekt) megalapozták a kapcsolatot az uránércesedési zóna és a konvergáló tektonikai szegélyek között. A reflexiós szelvényeken sikerült leképezni azt a közvetlenül a felszín alatti, DDK felé dőlő, több mint 2 km szélességű nyírási zónát is (P2), amely migrációs útvonalat szolgáltatott az érctelep kialakulásához szükséges, megfelelő mennyiségű folyadék áramlásához. A fentiekén kívül részletes képet nyertünk egy „rejtélyes”, laterálisan folyamatos, ezeken a szelvényeken kb. 7 km mélységben húzódó, nagy energiájú reflexiós zónáról is (Mandler, Clowes 1997).

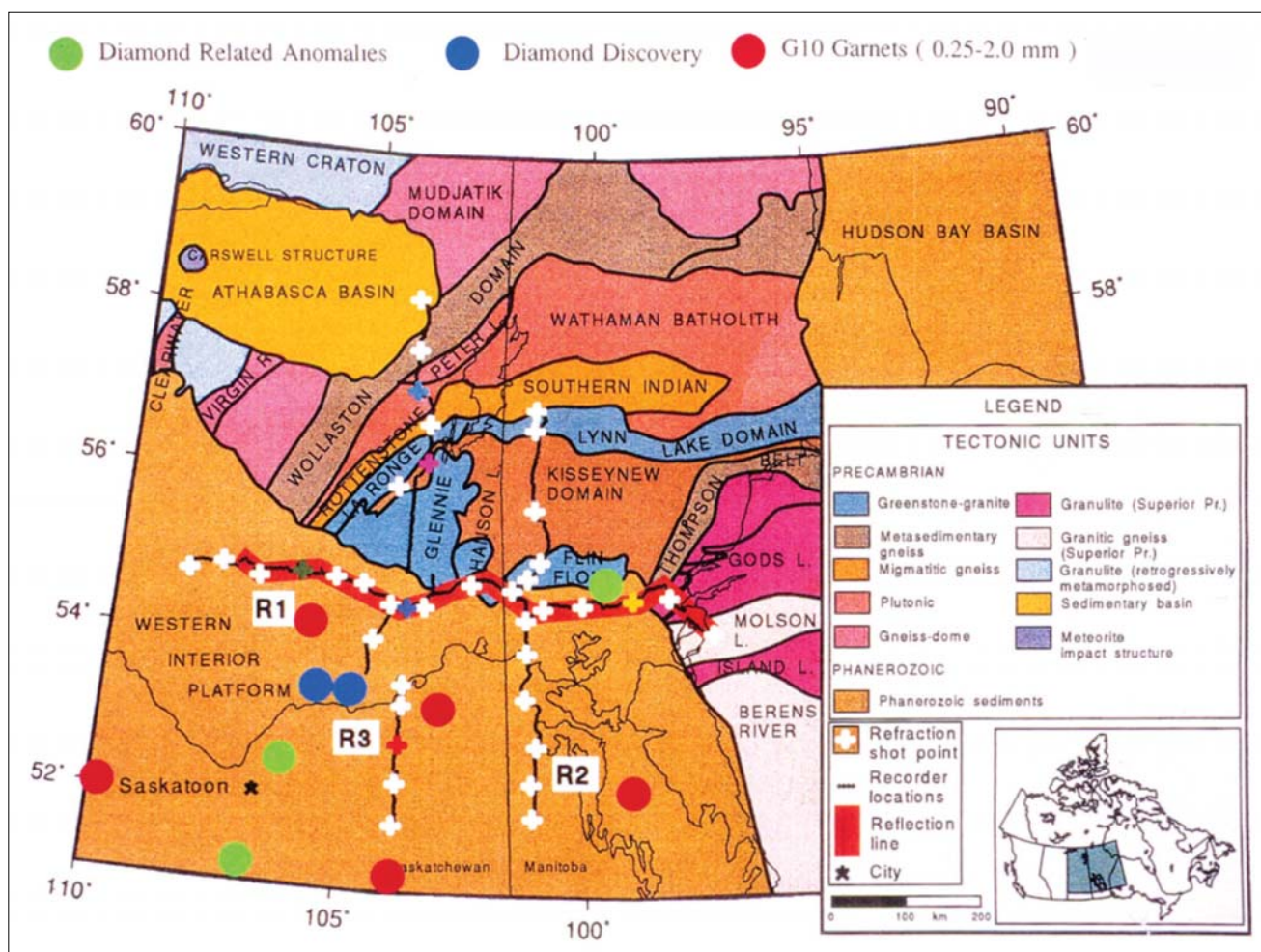
A McArthur River urántelep felett végzett pszeudo-3D szeizmikus mérés a homokkőaljzat unkonformitásának (UC) szerkezeti egységeit tárta fel (3. ábra). Mindegyik felismert töréses szerkezeti elem feltolódásos mozgásokkal jellemezhető, a vetők dőlése a közepestől a közel vertikálisig változik. A UC felszínének 3D megjelenítése bemutatja annak kapcsolatát az összetett vetőrendszerekkel, a feltolódásos vetőket a P2 repedezett zóna felett, illetve az urántest(ek) közvetlen környezetének szerkezeti viszonyait. A helyi kiemelkedésekkel és süllyedékekkel jellemez-

hető, szeizmikus mérésből meghatározott UC felszín néhány méteres pontossággal megegyezik a termelés során kapott adatokkal.

Megjegyezzük, hogy az urán kutatás mellett a Saskatoontól mindössze kb. 200 km-re északra elhelyezkedő kimberlit-előfordulások (White, Kjarsgaard 2012) is jelentős kutatási tevékenységet eredményeztek. A „gyémánt-indikátorok” keresése eredményeképpen számos kedvező tulajdonságú, földtanilag és geofizikailag anomális területet sikerült felfedezni (4. ábra). Mindezek a jelek azonban „rejtélyesek” voltak, mivel a proterozoós orogénövön belül helyezkednek el. Ez ellentmondás volt, mivel az ismert gyémánt-előfordulások földtani környezete stabil, ősi kraton, vastag kéreggel és merev litoszférikus köpennyel. Az archaikumi Sask Craton (lásd 2. ábra) felfedezése az anomális területek középső zónájában azonban további lendületet adott a kutatások folytatásához. A LITHO-PROBE refrakciós felmérést ipari támogatással újraterveztük úgy, hogy a kéreg akusztikus tulajdonságain kívül a Sask Craton alatti köpenyből is kapjunk hasonló információt. A robbantásonként (fehér keresztet az ábrán) ~3 tona dinamittal észlelt három, egyenként több mint 700 km hosszúságú refrakciós szelvény egy kb. 50 km mélységig lehatoló kéreggyökeret határolt le anomális P-hullámsebességgel a felső köpenyben. Az anizotrópia következtében ez maximum 8,6 km/s volt É–D irányban és minimum 8,1 km/s K–Ny irányban. A mai napig 72 kimberlittőlcsért fedeztek fel a kutatott területen nagy felbontású légi mágneses mérések segítségével, amelyek közül számos gyémánttartalmúnak bizonyult.



3. ábra | A homokkőaljzat unkonformitásának 3D képe – McArthur River bányaterület
 Figure 3 | 3D image of the sandstone-basement unconformity – McArthur River mine district



4. ábra A refrakciós robbantópontok nyomvonala (fehér keresztekkel jelölve)
 Figure 4 Refraction shot points marked with white crosses

Összefoglalás

A cikkben bemutatott regionális mélyszeizmikus szelvényekkel leképzett litoszféraszerkezetek az ásványinyersanyag-bányászat számára perspektivikus területeket határoltak le. A lokális, nagy felbontású kutatások meghatározták a felszín alatti szerkezeteket, az ásványtelepek kialakulásának egyik elsődleges indikátorát. Az aljzati unkonformitás (UC) és a vetőrendszerek térképezése értékes információt nyújtott a bányászati műveletekhez is. A közetfizikai paraméterek és a szeizmikus attribútumok diagramjai (cross-plotok) kijelölték az ásványtelepek képződésének másik fontos indikátorát, a megváltozott közetfizikai tulajdonságú zónát (alteration halo).

A 2011. március 11-én bekövetkezett fukusimai katasztrófát követő napon az uránipari részvények ára körülbelül a felére esett vissza. Sok cég azonnal felmondta a korábban tervezett kutatási szerződéseket. Egy példa volt erre, hogy néhány héten belül Nigerben kezdünk volna egy akkor már teljesen megtervezett pseudo-3D szeizmikus mérést, amelynek megvalósítása elmaradt. A terepi adatgyűjtés megszervezése már eleve komoly problémát jelen-

tett az ottani terrorcselekmények és az akkortájt terjedő ebolajárvány miatt. Ilyen és ezekhez hasonló, előre nem látható események befolyásolják világszerte az ásványi nyersanyagok kutatást (azok világgpiaci árát). Az utóbbi egy-két évben az uránkutatás azonban ismét felívelő szakaszba került Kanadában, ahol a világ ércartalom szempontjából legdúsabb telepei találhatók.

A tanulmány szerzői

Hajnal Zoltán, Takács Ernő, Bhaskar Pandit, Györfi István, Németh Balázs

Hivatkozások

- Clowes R. M. (2010): Initiation, development and benefits of Lithoprobe – Shaping the direction of Earth science research in Canada and beyond. *Can. J. Earth Sci.* 47, 291–314
- Hajnal Z., Ansdell K. M., Ashton K. E. (2005): Introduction to special issue of Canadian Journal of Earth Sciences: The Trans-Hudson Orogen transect of Lithoprobe. *Can. J. Earth Sci.* 42, 379–383
- Hajnal Z., White D. J., Takacs E., Györfi I., Annesley I. R., Wood G., O’Dowd C., Nimeck G. (2010): Application of modern 2D

- and 3D seismic-reflection techniques for uranium exploration in the Athabasca Basin. *Can. J. Earth Sci.* 47, 761–782
- Lewry J. F., Collerson K. D. (1990): The Trans-Hudson Orogen: Extent, subdivision and problems, in the early proterozoic Trans-Hudson Orogen of North America. Edited by Lewry J. F., Stauffer M. R. Geological Association of Canada, Special Paper 37, 1–14
- Mandler H. A. F., Clowes R. M. (1997): Evidence for extensive tabular intrusions in the Precambrian shield of western Canada: A 160-km-long sequence of bright reflections. *Geology* 25/3, 271–274
- Takács E., Hajnal Z., Pandit B., Annesley I. R. (2015): Mapping of alteration zones with seismic-amplitude data and well logs in the hard-rock environment of the Keefe Lake area, Athabasca Basin, Canada. *The Leading Edge* 34/5, 530–538
- White D. J., Kjarsgaard B. A. (2012): Seismic delineation of the Orion South kimberlite, Fort a la Corne, Canada. *Geophysics* 77, WC191–WC201