

Bevezetés

A kutatás célja a metamorfózis és a kőzeteket ért deformáció közötti kapcsolat vizsgálata volt egyes magyarországi és kapcsolódó területeken található, a Kárpát-medence és környezete geodinamikai rekonstrukciója szempontjából kiemelkedő fontosságú tektonikai egységek metamorf kőzetösszleteinek példáin. A földkéreg összetételének, szerkezetének, fejlődési folyamatainak megértéséhez, modellezéséhez elengedhetetlen a metamorf kőzetek képződésének leírása, a folyamatok fizikai-kémiai paramétereinek minél pontosabb meghatározása. A pályázat fő feladata volt a hőmérséklet, a nyomás és ezek időbeli változásai, valamint a tektonikai deformáció kőzetátalakulásra gyakorolt együttes hatásainak részletes tanulmányozása, kölcsönhatási mechanizmusainak feltárása a litológiai jellegek, a kőzetkémizmus, az ásványos összetétel és a szemcseméret függvényében. A vizsgált képződmények metamorfózisa a nagyon kisfokútól (anchizóna) az amfibolit fácies nagy hőmérsékletű részéig, deformációs sajátosságaik pedig a törésestől a képlékenyig változott, nagyon különböző deformációs sebességű rendszereket képviselve. A fenti szempontokat figyelembe véve különböző nagytektonikai rendszerek változatos litológiai kifejlődéseinek vizsgálatát végeztük el. Ezekhez a modell-anyagokat magyarországi szerkezeti egységek (Bükk, Uppony, Szendrő, Kisalföld) és az Alp-Kárpát-Pannon-térség nemzetközi együttműködések keretében részben már begyűjtött, illetve nagyrészt a későbbiekben mintázandó típusterületei szolgáltatták (szlovéniai Pohorje hegység, horvátországi Szlavóniai-hegység). A pályázat alapkutató jellegű: a kőzetátalakulás (metamorfózis) és a kőzetet ért deformáció közötti kapcsolat jobb megismerését célozta. Az elért eredmények egyrészt a tektonikai deformáció különböző nyomás-hőmérséklet tartományokban végbemenő ásvány- és kőzetátalakulási folyamatokra gyakorolt hatásainak tisztázásához szolgáltattak új adatokat. Másrészt a metamorf fok jelző módszerek alkalmazási lehetőségeit pontosították, harmadrészt regionális kőzettani és mikrotektonikai eredményekkel szolgáltak. A pályázat során elért eredményeket vizsgálati területenként ismertettük.

Szlavóniai-hegység

Az MTA Geokémiai Kutatólaboratóriuma (2005-től MTA Geokémiai Kutatóintézet) és a Horvát Tudományos és Művészeti Akadémia közötti bilaterális együttműködés keretében vizsgáltuk a Szlavóniai-hegység (Horvátország) közepes fokú metamorfitjait. Előzetes eredmények alapján a vizsgált képződmények a Tiszai nagyszerkezeti egységbe sorolhatók voltak. A kapott nyomás-hőmérséklet adatok (8-11 kbar és 600-640 °C) megerősítették ezt a feltételezést (*Balen et al., 2006*). A Kutjevo mellett található szelvény csillámpalájában kémiailag zónás gránátot találtunk. A kialakult zónásságot *Balen et al. (2006)* szerint a kőzetben található ásványegyüttes prográd (növekvő hőmérsékletű) metamorfózis során végbement megváltozása okozta, egy Ca-dús fázis (apatit, plagioklász, kalcit) lebomlása során a felszabaduló Ca a gránátba épült be. Kvantitatív fázisdiagramos vizsgálataink alapján egy másik modellt is kidolgoztunk a gránát zónásság magyarázatára. E szerint a kialakult zónásságot a metamorfózis során az effektív kőzetösszetétel megváltozása okozta (*Horváth et al., 2007*). Ugyanezt a jelenséget a csillámpalákkal szoros kapcsolatban lévő paragneiszekben és amfibolitokban nem találtuk meg, ezekben a kőzetekben a gránátok nem vagy alig mutatnak zónásságot. A paragneiszekben a metapelitekben ritka hornblende (Ca-amfibol) jelent meg a K-világos csillám (muszkovit) helyett. A gránátos amfibolit minták gránátot, amfibolit (hornblende), plagioklász és kvarcot tartalmaznak. A három fő kőzettípusból készített fázisdiagramok igazolták a kőzetek azonos képződési nyomás-hőmérséklet körülményeit. A kőzetekben található monacitok (ritkaföldfém-tartalmú foszfát) elektronmikroszondával meghatározott U-Pb kora (428±25 és 444±19 millió év) új eredmény a Tiszai egységből. Ezek alapján a vizsgált minták a Tiszai egység eddigi ismeretek alapján bizonyított

legidősebb metamorf eseményénél (variszkuszi) kb. 100 millió évvel idősebbek (*Balen et al., 2006*).

Részletes metamorf petrogenetikai vizsgálatokat végeztünk egy kisnyomású, andalúzit-sztaurolit indexásványokkal jellemezhető gránátos csillámpalán a Szlavóniai-hegység DK-i részén. „Klasszikus” termobarometriai módszerek és kvantitatív fázisdiagramok segítségével meghatároztuk a kőzetek képződési körülményeit és összehasonlítottuk az elektron mikroszondával mért és a modellezéssel számolt ásványkémiai paramétereket. A monacit U-Pb tartalmán alapuló kormeghatározás alapján a metamorfózis kora 320 és 380 millió év közé tehető. Eredményeink alapján megállapítható, hogy a Szlavóniai-hegységben a (variszkuszi) regionális metamorfózis mind nyomás-hőmérséklet, mind kor tekintetében változatos megjelenésű, nem egységes. A Szlavóniai-hegység területenként eltérő variszkuszi metamorfózissal foglalkozó publikációt 2008 első felében kívánjuk benyújtani.

Mellétei-egység

Hazai és nemzetközi együttműködés keretében vizsgáltuk az észak-magyarországi mezozoos ofiolit sorozatba tartozó Bódva-völgyi Ofiolit Sorozat metamorf kőzetmintáit. A Bódva völgyében mélyült mélyfúrások által harántolt sorozat metabazalt és metagabbro kőzeteiben változatos kémiai összetételű amfibolok találhatóak. Ezek képződését egyrészt a kőzetsorozatot ért alpi (júra-kréta korú) polimetamorfózis, másrészt a kőzetek mikrodomén szintű kémiai heterogenitása okozta. Ez a kémiai összetételbeli változékonyság – kisebb mértékben – megjelenik a kloritok összetételében is. Rangos nemzetközi konferencián (Goldschmidt Geokémiai Konferencia, Koppenhága, Dánia) mutattuk be eredményeinket, valamint a témából publikáció is készült (*Horváth és Árkai, 2004, 2005*). Eredményeink új adatokat szolgáltatnak a terület geodinamikai modelljéhez és a tágabb terület komplex fejlődéstörténetének pontosabb megismeréséhez.

Szintén nemzetközi együttműködés keretében folyt az ún. mellétei kékpala (Szlovákia) egyik kiválasztott feltárásának részletes ásvány-kőzettani vizsgálata. A mintasorozat az alpi (jura) szubdukció során az ún. Mellétei-óceán egykori üledékes kőzetsorozatának átalakulásával képződött. A kékpala fáciesű metapelitek gránátot, glaukofánt és fengites csillámot tartalmaznak, alkalmanként ezekhez klorit, albit vagy zoizit társult. Az egy feltárásból származó minták metamorf fejlődéstörténetét azonosnak tekintettük a terepi és mikroszerkezeti megfigyeléseink alapján, ezért a minták eltérő ásványos összetételét a kémiai heterogenitásokban kerestük. Részletes metamorf kőzettani vizsgálataink alátámasztották ezt az elképzelést. A nagynyomású (kékpala fáciesű) metamorf ásványegyüttesek metapelitekben ritkán őrződnek meg a retrográd folyamatok miatt. Vizsgálataink alátámasztották, hogy a metamorfózis csúcs nyomás-hőmérséklet körülményein létrejött ásványegyüttes akkor marad meg, ha a kőzet a retrográd fejlődése során a nyomás és a hőmérséklet együtt csökken, valamint a kőzet zárt rendszerként viselkedik (nem éri jelentős, külső fluidumhatás). Az eredményekből készült publikáció megjelenés előtt áll (*Horváth és Kronome, in press*).

Bükk-hegység

A Bükk-hegység középső triász metavulkanit összetételének (Szentistvánhegyi Porfirit Formáció) komplex metamorf kőzettani, szerkezetföldtani és geokronológiai vizsgálata során először elvégeztük a terepi és mikroszkópos szerkezetföldtani vizsgálatokat. A begyűjtött mintasorozatból illit és klorit „kristályossági” vizsgálatokat végeztünk. A szeparált 2 µm alatti K-világos csillám frakción K-Ar kormeghatározást végeztek az MTA Atommagkutató Intézetében. A mikroszerkezeti vizsgálatok alapján a kőzettestet ért egyszerű nyírásos deformáció a töréses és a képlékeny közti átmeneti zónában ment végbe. A nyírás

kinematikailag jobbos eltolódásnak minősül, amely a meredek ÉÉK-i dőlésű palásság mentén ment végbe. A legjellemzőbb deformációs mechanizmusok a következők voltak: 1. „rideg” ásványok (pl. földpát, opak fázisok) mikrotöréses deformációja (kataklázis), 2. az igen finom szemcseméretű, filloszilikát-dús mátrix pedig döntően nyomásoldódási anyagáramlás által támogatott szemcsehatár menti csúszással deformálódott. A nyírással egyidejű fluidummigráció jelentősen gyengítette a kőzetet és szintektonikus kalcitképződéssel járt együtt. A kőzet „kigyengülése” (nyírószilárdságának jelentékeny csökkenése) döntően az egykori földpátok finomszemű filloszilikátokká történő átalakulásával magyarázható (ún. „reaction softening”) a deformáció során, amelyben alapvető szerepe volt a kőzetet ért fluidumhatásnak. A részletes metamorf petrogenetikai vizsgálatok alapján az anchi-/epizóna határát elérő metamorfózis (egészen pontosan: a metamorf „csúcsot” követő korai hűlési szakasz) kb. 73 és 77 millió év között történt, azonban a kőzettestet ért intenzív félig-képlékeny deformáció („milonitosodás”) a lillafüredi szelvényben nagy valószínűséggel ezen időintervallum után ment végbe a kréta legvégén, esetleg a kora-tercierben. Erre utal, hogy ugyanilyen (70 és 80 millió év közötti) korokat mutatnak a környezetben más, a fentebb bemutatott nyírás által nem érintett kőzetek is, így a fenti korok semmiképp sem értelmezhetők a jobbos elmozdulás koraként. A pályázat záró évében nemzetközi konferencián (Alpine Workshop, Davos, Svájc) ismertettük eredményeinket (*Koroknai et al., 2007*), az ezekből készített publikáció 2008 elején jelent meg a Journal of Structural Geology nemzetközi folyóiratban (*Koroknai et al., 2008*). A szerzők tudomása szerint ez a publikáció jelenti az első hazai kutatók tollából származó munkát ebben a rangos szakmai folyóiratban.

Kloritoid

Rangos nemzetközi konferenciákon foglaltuk össze (*Koroknai, 2005a, b*) az észak-magyarországi paleozóos képződmények (Upponyi- és Szendrői-hegység) tektonometamorf fejlődéstörténetét, rámutatva a képlékeny deformáció és a metamorf ásványképződés (kloritoid megjelenése) közötti szoros kapcsolatra. Az eredmények a kloritoid posztt tektonikus jellegét igazolták az S_{0-1} és S_2 palásságokhoz képest az Upponyi- és Szendrői-hegységben egyaránt. Mivel a „főpalásság” (S_2) kialakulása mindkét egységben a képződmények intenzív gyűrődéséhez kapcsolódik, ezért a kloritoid képződése a gyűrődés után ment végbe. Figyelembe véve, hogy a kloritoid képződése a metamorfózis maximális hőmérsékletű szakaszához köthető, ez egyben azt is jelenti, hogy a gyűrődés az alpi metamorf ciklus korai, prográd szakaszában — a maximális metamorf hőmérséklet elérése előtt — ment végbe. A Kazincbarcika–1 fúrás (Szendrői egység) kloritoidpalájában a koegzisztens klorit-kloritoid ásványpárok alapján az alpi metamorfózis maximális hőmérséklete mintegy 450 °C-ra becsülhető.

Eklogit kavics

Megkezdődött a Dunavarsány melletti pleisztocén korú konglomerátum kavicsanyagában található eklogit kavicsok részletes petrográfiai és geokémiai vizsgálata. A Magyarországon csak szórványosan előforduló nagynyomású kőzettípus modern metamorf kőzettani vizsgálatával meghatároztuk a kőzetek eredeti képződési környezetét. Előzetes eredményeinket (*Horváth et al., 2005*) a 7. Nemzetközi Eklogit Konferencián mutattuk be Seggauban (Ausztria). Az egyensúlyban képződött gránát-omfacit ásványpárokat felhasználva a metamorfózis csúcsa 660-750 °C és 15-17 kbar volt. Hasonló eredményeket kaptunk kvantitatív fázisdiagramok alkalmazásával is.

Dél-Alföld

Befejeződött a Tiszai Egység dél-alföldi részén mélyült Újszentiván Uszi-2 számú mélyfúrás csillámpaláján végzett kvantitatív fázisdiagramokon alapuló metamorf petrogenetikai vizsgálatosorozat. A gránát-sztaurolit csillámpala az alpi (kréta) orogén során amfibolit fáciesű metamorfózist szenvedett, melynek csúcs hőmérséklet-nyomás viszonyai kb. 650 °C és 9 kbar voltak. Vizsgálatainkhoz felhasználtuk Horváth és Árkai 2002-ben az *Acta Geologica Hungarica* folyóiratban megjelent publikációjának eredményeit. A munka során összehasonlítottuk a metamorf kőzetekben használt két leginkább elterjedt kvantitatív fázisdiagramok készítésére alkalmas programcsomagot (Perplex és Thermocalc), valamint különböző, egyre összetettebb kémiai rendszereket használtunk a modellezés során. Az elektron mikroszondával mért és a vizsgálatok során számított ásványkémiai paraméterek jó egyezést mutattak a fő kőzetalkotó ásványok (gránát, biotit, sztaurolit, plagioklász) esetében. A fázisdiagramok segítségével nem csak a metamorfózis csúcsának fizikai körülményei határozhatók meg (nyomás, hőmérséklet), hanem a metamorfózis során bejárt P-T út is. Az eredményekből készült publikáció 2007 első felében jelent meg a *Geologica Carpathica* nemzetközi folyóiratban (Horváth, 2007).

Pohorje-hegység

Nemzetközi kutatócsoport (magyar, szlovén, német részvétellel) vizsgálta a Pohorje-hegység (Szlovénia) magmás és metamorf kőzeteit. A miocén korú (kb. 18,6 millió év, egyedi cirkonzemcséken LA-ICP-MS U-Pb módszerrel meghatározott kor) tonalit képződési körülményeit termobarometriai módszerekkel határoztuk meg. Az eredmények alapján az intrúzió képződési körülményei nyugaton (750-770 °C, 3-4 kbar) és keleten (760-820 °C, 6-7 kbar) eltérőek. Szerkezetföldtani és geokronológiai vizsgálatok alapján a magmás test képlékeny deformációja (palásság kialakulása) a zöldpala fácies nyomás-hőmérséklet viszonyai között ment végbe az intrúzió geológiai léptékben igen gyors (~3 millió év) kiemelkedése során. A gyors kiemelkedést a radometrikus koradatok mellett egyértelműen alátámasztják az ottangi törmelékes üledékekben talált (és K/Ar módszerrel datált) palás tonalitkavicsok is. A Pohorje-pluton U-Pb módszerrel meghatározott miocén kora azt jelzi, hogy — szemben a korábban elterjedt általános nézettel — e test semmi esetre sem sorolható a „klasszikus” (jellemzően eocén-oligocén korú) Periadriai magmatitok közé, amelyek képződése egészen más tektonikai rezsimhez kapcsolódott.

A magmás test palaburkát alkotó — zömében amfibolit fáciesű és a középső ausztróalpi egységhez sorolható — metamorfitekben mért meglepően fiatal radiometrikus korok (30–15 Ma) valószínűleg a miocén korú magmás esemény felülbélyegző (fiatalító) hatását tükrözik, hiszen a szomszédos Kozjak-hegységben, amelyet a miocén magmás esemény nem (ill. csak kis mértékben) érintett, a kréta („eolapi”) korok javarészt megőrződtek.