

Kozmikus sugárzás detektálása nyomdetektorokkal a MATROSHKA és a BIOPAN projektekben

Dudás Beáta*, Szabó Julianna, Pálfalvi József

Magyar Tudományos Akadémia, KFKI Atomenergia Kutatóintézet, 1121 Budapest Konkoly Thege 29-33.

Abstract - Radiation exposure in space during EVA produced by cosmic radiation may be reduced by careful mission planning and through constructive measures. Therefore accurate knowledge is needed of the physical characteristics of the radiation field as well as the shielding distribution of the spacecraft and of the astronauts' suite. The MATROSHKA-I and II experiments outside and inside of the ISS provide dosimetric information at different locations inside an anthropomorphic phantom and on its poncho among others by solid state nuclear track detectors. During the BIOPAN experiments the detection of primary galactic cosmic rays (GCR) and secondary particles was set as an aim.

Keywords - solid state nuclear track detector, ISS (International Space Station), cosmic radiation

Kivonat - Űrséta és hosszú idejű űrállomáson történő tartózkodás alkalmával elszennvedett, kozmikus sugárzástól származó dózisterhelés csökkenthető gondos előkészítéssel és megfelelő technika kialakításával. Ezért pontos fizikai jellemzésre van szükség a sugárzási térről, valamint az űrjármű és az űrruha védőképességéről. A MATROSHKA-I és II kísérletsorozatok, amelyek a Nemzetközi Űrállomáson kívül és belül zajlanak, célja a kellő pontosságú dozimetriai információk nyérése az űrhajósok egyes szerveit és bőrfelületét érő sugárzásokról, többek között szilárdtest nyomdetektorok felhasználásával. A BIOPAN kísérletek folyamán az elsődleges kozmikus sugárzás és a másodlagos részecskék detektálását tűztük ki célul.

Kulcsszavak - szilárdtest nyomdetektor, Nemzetközi Űrállomás, kozmikus sugárzás

I. BEVEZETÉS

Az Európai Űrügynökség (ESA) különös figyelmet szentel olyan dozimetriai programoknak, amelyek az űrhajósokat érő kozmikus sugárzással és annak hatásaival foglalkozik. Ez nem meglepő, hiszen az űrutazásoknak, a legénység foglalkoztatásának manapság ez az egyik legjelentősebb hátráltató tényezője. A hosszú idejű űrrepülések során a kozmikus sugárzás lényeges egészségügyi kockázatot jelent, amely különösen napkitörések és intenzív naptevékenység esetén jelentős. Összehasonlításként megemlíthetjük, hogy bár az űrhajósokra élettartam-dózis vonatkozik, egy év alatt az őket érő dózisterhelés a földi sugárveszélyes munkahelyek éves dóziskorlátjának tízszeresét is elérheti.

Földkörüli pályán keringő objektumok esetében a galaktikus és a Napból eredő sugárzás összetétele bonyolult, mivel a sugárzás időben és térben nagyon inhomogén, valamint sok paramétertől függ. Sajnos még nem létezik olyan univerzális eszköz, amelyik az ilyen összetett sugárzás minden komponensét egyaránt mérni képes. Az AEKI-ben működő kutatócsoportunk a szilárdtest nyomdetektorok alkalmazására specializálódott. Ez egy speciálisan erre a célra kifejlesztett műanyagból készített passzív detektor, ami a $Z(\text{rendsám}) \geq 1$ töltött részecskéket $\sim 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ lineáris energiaátadás (LET) felett regisztrálja. Előnyük közé tartozik kis méretük, így akár az űrhajósok ruhájában is elhelyezhetőek.

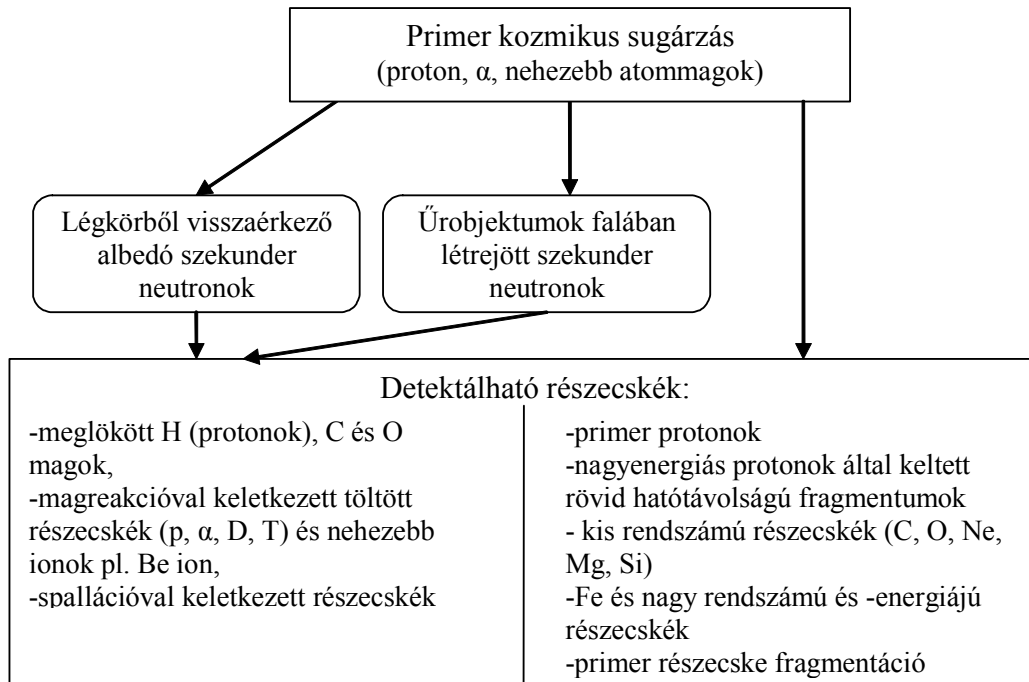
II. ALKALMAZOTT TECHNIKA

A szilárdtest nyomdetektorokban az elektromosan töltött, ionizáló részecskék pályájuk mentén keskeny (3-10 nm szélességű) rombolt zónát hoznak létre. Ez kristályos anyagokban különböző rácshibák létrejöttéhez, míg műanyagokban a kémiai kötések felszakadásához, szabad gyökök keletkezéséhez vezet. Bizonyos kémiai reagensek ezeket a rombolt zónákat nagyobb sebességgel oldják vagy „marják”, mint az

* dudbea@aeki.kfki.hu

illető anyag nem rombolt részeit. Így a keskeny roncsolt zónát a maratószer kellő idő után és hőmérséklet mellett kiszélesíti, így optikai mikroszkóppal látható nyomot hoz létre [1, 2]. A keletkező nyomok tulajdonságait befolyásolja a részecske fajtája és energiája. Az általunk használt nyomdetektor anyaga poliallil-diglikol-karbonát (PADC): $C_{12}H_{18}O_7$. A detektorok érzékenysége (az a LET, amelyik már kimaratható rombolt zónát hoz létre) és a képanalizátor optikai rendszere határozzák meg azokat a részecskefajtaikat, az energiatarományt, melyeket ezzel a detektorral vizsgálni tudunk.

1.ábra. A primer és szekunder kozmikus sugárzásból keletkezett detektálható részecskék



Az 1. ábrán láthatjuk azokat a részecskéket keletkezésük szerint csoportosítva, amelyeket a PADC detektor az űrben regisztrálhat. A kozmikus sugárzás dozimetriai vizsgálatára több lépcsős (6 h, 15h) maratást alkalmazunk 6 M-os NaOH oldattal 70 °C-on. 6 óra után még nem jelennek meg a 20 keV/μm-nél kisebb LET-ű részecskék nyomai, viszont 15 óránál eltűnnek a felszínhez közeli nyomok, ezért van szükség a detektorok vizsgálatára mindkét maratási lépés után.

III. KLIMATIKUS KÍSÉRLETEK

A szilárdtest nyomdetektorok részecske regisztrációs képességét a környezeti tényezők befolyásolhatják [3]. Korábbi vizsgálatok megerősítik, hogy a nyomkialakulás folyamatában jelentős változás áll be vákuum alatt [4], és a regisztrációs hőmérséklet is jelentős hatással van a nyomválaszra [5]. Célunk az volt, hogy megállapítsuk, hogyan változik az űrdozimetriai célokra általunk használt Tastrak gyártmányú, 0,6 % DOP adalékanyagot tartalmazó PADC szilárdtest nyomdetektor érzékenysége extrém klimatikus körülmények között, mint pl. alacsony nyomás és hőmérséklet, illetve ezek kombinációja.

A klímakamrás kísérletek során az 1x10x20 mm-es PADC nyomdetektorokat besugaroztuk kollimált ^{210}Po α-forrással [6]. A 2. ábrán látható klímakamrával dolgoztunk (ebben végeztük el a besugárzásokat), amellyel az elérhető legalacsonyabb hőmérséklet -60 °C, legkisebb nyomás 80 Pa. Mind a besugárzások előtt, mind utána alkalmaztunk vákuumot vagy hűtést, illetve mindkettőt egyszerre. A kamrás mérésekhez

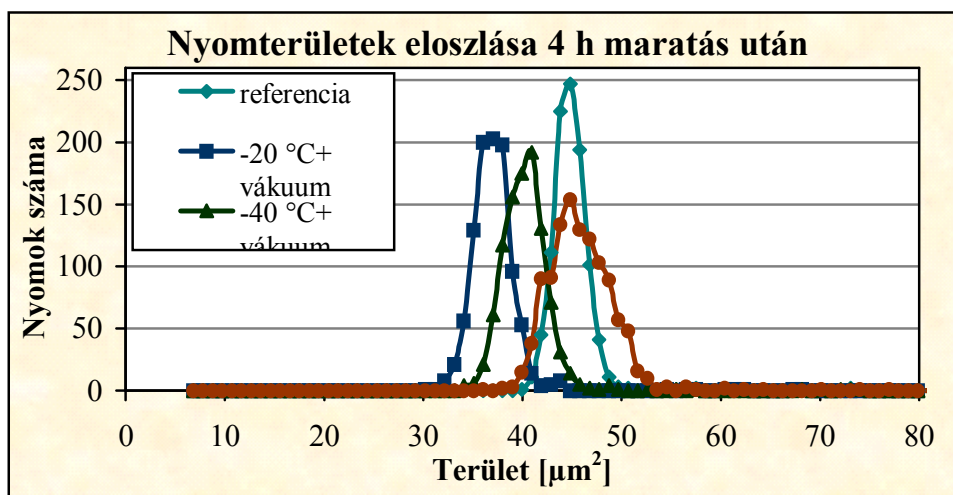
végeztünk párhuzamosan besugárzásokat azonos geometriában szobahőmérsékleten és atmoszférikus nyomáson.

2. ábra. Klímakamra az AEKI SKL Űrdozimetriai csoport tulajdonában



Az űrbeli körülmények szimulációja mellett a nyomterület eloszlásokból – a vizsgálat célja csak a nyomterület eloszlás alakjának és a maximum helyének meghatározása volt – a következő eredményekhez jutottunk: elővákuum idejének növekedésével a nyomok területe csökkent (degradáció) és az utóvákuum továbbront a regisztrációs képességen, ami azt jelenti, hogy a nyomok területe kisebb lett. A maratási idő növelésével - eredetileg 4h, majd további 2 óra maratás - azonban az utóvákuum hatása lecsökkent.

3. ábra. Hűtött, elő- és utóvákuummal kezelt detektorok és egy kontroll mérés során kapott nyomterületek eloszlása



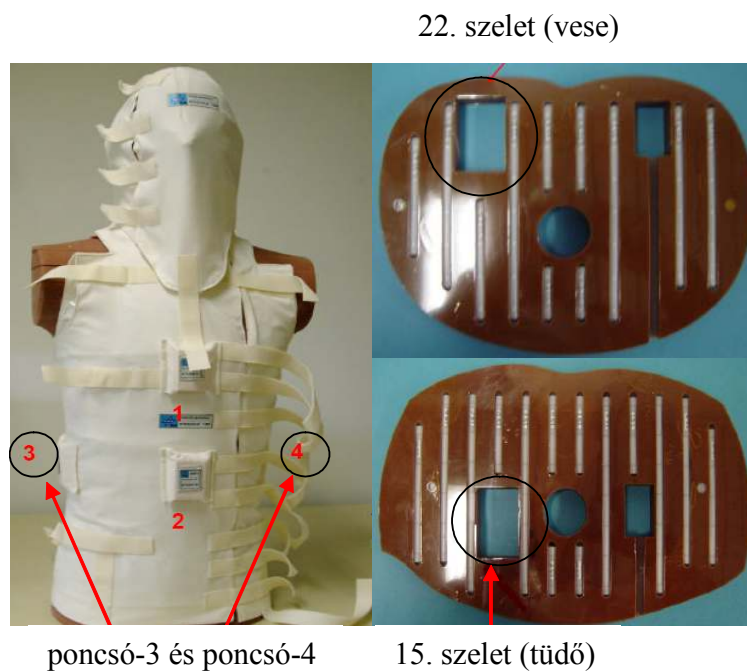
Hűtés során az ellenkező eset történt: az alacsony hőmérsékletű besugárzás jobb nyomregisztrációt eredményezett, a kialakuló nyomok területe megnövekedett. Hűtés (-60 °C) és vákuum (80 Pa) együttes alkalmazása esetén az alacsony hőmérséklet szinte teljes mértékben kompenzálta az alacsony nyomásból

eredő méretcsökkenést (3. ábra), viszont a területeloszlási görbe félértékszélessége nagyobb lett. Ennek a folyamatnak a mechanizmusa egyelőre nem ismert és további tanulmányozást igényel.

IV. MATROSHKA ÉS BIOPAN PROGRAMOK

A MATROSHKA program egy szövetekvivalens műanyagból készített fantomon alapszik, amely 2004-ben került fel az ISS-re (Nemzetközi Űrállomás) azzal a céllal, hogy sugárzást mérő detektorokat helyezzenek el a testében. Természetesen ez a fantom és ruházata az űrhajósok modellezésére szolgál. A vizsgálat tárgya a kozmikus sugárzás összetevőinek hatása az űrhajósokra. Meghívásra az AEKI Kutatócsoportja szilárdtest nyomdetektorokkal szerepel a kísérletben, ami több fázisban zajlik. Első alkalommal (I) a fantom másfél évig az űrállomás külső felszínéhez volt rögzítve [7], második alkalommal (IIa) egy zsilipkamrába, harmadszorra az ISS Zvezda moduljába került (most is ott van).

4. ábra. Az AEKI szilárdtest nyomdetektorok elhelyezkedése a MATROSHKA fantomban



poncsó-3 és poncsó-4

15. szelet (tüdő)

A fantomban mind a szervek helyére, mind a ruházatba lehetett detektorokat elhelyezni; mivel a fantomot szeletekre osztották fel, így a dóziseloszlás meghatározására is lehetőség volt. A 4. ábrán láthatjuk az AEKI nyomdetektorok pozícióját: 1-1 detektorcsomag a vese és tüdő helyére, 2 csomag a fantomot fedő mellénykébe (poncsó) került. Az űrséták szimulálásához a MATROSHKA I programban a szkafander helyettesítésére még egy konténert húztak a fantomra.

Az űrből visszaérkezett detektorok kiértékelésekor a kémiai maratással láthatóvá tett részecskenyomok paramétereinek (átmérő, terület, stb.) meghatározása után a $LET > 10$ keV/ μm -es részecskékre kiszámítottuk a LET eloszlását, amelyből végül a napi dózisteljesítmények adódtak [8]. A dózisegyenérték és az elnyelt dózis hányadosából megkaptuk az átlagos LET függő minőségi tényezőt. A rendszert nagy energiájú részecskegyorsítókkal - BNL, Amerikai Egyesült Államok; HIMAC, Japán -, neutron generátorral - 14,5 MeV RBI, Zágráb -, 1 MeV protonnal (Van de Graaf) és kollimált ^{210}Po α -forrással (4,65 MeV) kalibráltuk.

1. táblázat. A MATROSHKA IIA PADC detektorokból kapott dóziseredmények a fantombeli pozíciójuk szerint

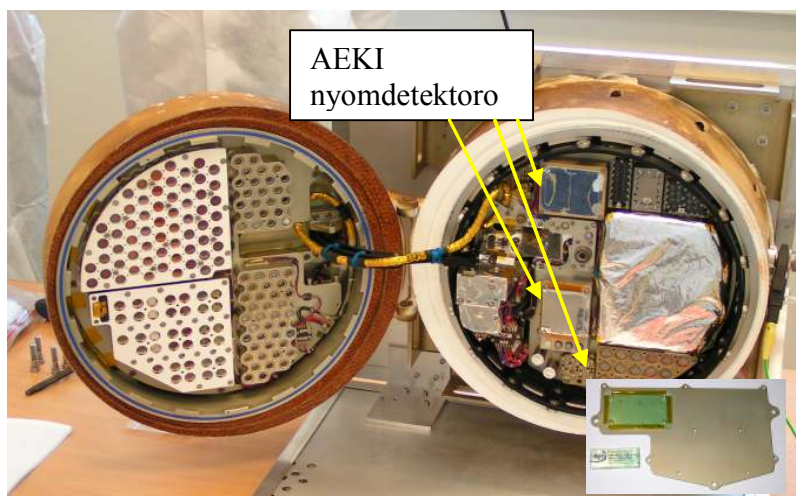
Elhelyezkedés	Dózisteljesítmény, [$\mu\text{Gy}/\text{nap}$]	Dózisegyenérték- teljesítmény, [$\mu\text{Sv}/\text{nap}$]	Átlagos minőségi tényező, Q
Referencia	40 ± 5	273 ± 16	$7 \pm 0,7$
Tüdő	19 ± 4	178 ± 18	$9 \pm 0,9$
Vese	16 ± 2	159 ± 10	$10 \pm 0,7$
Poncsó-3	37 ± 7	279 ± 23	$8 \pm 0,9$
Poncsó-4	36 ± 7	269 ± 22	$8 \pm 0,9$

Az 1. táblázatban a MATROSHKA IIA kísérlet dózisteljesítmény adatait láthatjuk. Az eredményekből kitűnik, hogy a fantom ruházatában mért dózisok nagyobb értéket mutatnak a szervekénél, hiszen a szöveteket helyettesítő anyag sugárzást elnyelő képessége megmutatkozik. Viszont a poncsónál kapott adatok (csak a nagy LET-ű részecskékből!) ötször meghaladják a földi sugárveszélyes munkahelyen dolgozók sugárvédelmi előírása szerinti dóziskorlátot. A 10 keV/ μm felett mért dózisok a teljes dózisterhelés mintegy 65%-át adják. Egyéb, pl. termolumineszcens (TL) detektorokkal ez alatt a LET küszöb alatt végzett mérések kiegészítik a szilárdtest nyomdetektorok eredményeit. Az AEKI Űrdozimetriai Kutatócsoportja által tervezett és a Nemzetközi Űrállomáson is rendszeresített PILLE dózismérő [9] a MATROSHKA IIA kísérletek alatt átlagosan 150 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ dózisteljesítményt mért az Orosz Zvezda modul belsejében, ahol a Referencia nyomdetektorok is voltak. Így a teljes dózisteljesítmény 423 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ volt.

Az Európai Űrügynökség (ESA) irányítása alatt futó BIOPAN program a kozmikus sugárzás biológiai és fizikai hatásának vizsgálatára irányul. Az AEKI kutatócsoportja 2005-ben és 2007-ben sikeresen vett részt dozimetriai összeállításával a projektben, ahol mindkét esetben egy Foton típusú visszatérő műhold juttatta fel a kísérleti egységeket (mérőműszerek, biológiai minták stb.) Föld körüli pályára kb. 300 km magasságba [10]. Az első esetben, a BIOPAN-5 kísérletben a galaktikus kozmikus sugárzás és a másodlagos részecskék, mint a neutronok detektálására 10 darab PADC lapocskát és különböző töltött részecske konvertereket tartalmazó szilárdtest nyomdetektor összeállítást alkalmaztunk. A konverterek segítségével kiszélesíthető az a neutron energia tartomány, amit a PADC detektor regisztrálhat: így 100 keV - 4 MeV helyett a termikus neutronoktól akár a 30-40 MeV-es határig tudunk mérni. Ennek felépítése lehetővé tette a töltött részecskék mellett a neutronok közvetett vizsgálatát az űr és a műhold irányából is [11]. A szilárdtest nyomdetektorok méréseiből kapott ekvivalens dózisteljesítmény $0,7 \pm 0,01$ mSv/nap (átlagos minőségi tényező, Q: $6 \pm 1,2$) a kiértékelés a MATROSHKA detektorokkal megegyezően történt.

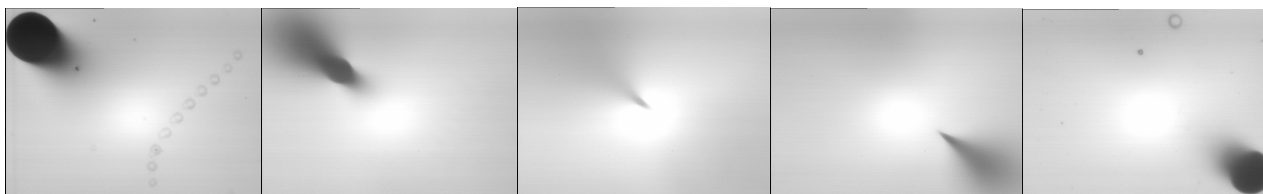
A BIOPAN-6 kísérletben már a teljes dozimetriai ellenőrzést az AEKI kibővített egységei biztosították (5. ábra). Az újabb „neutron” egység 25 darab PADC lapocskából állt, amelyeknek kiértékelése folyamatban van. A PADC detektorok mellett több konvertert, valamint beépített monacit forrást is alkalmaztunk, hogy képet kapjunk az űrben létrejött nyomok paramétereinek változásáról a földi besugárzásokhoz képest. Konverterként alkalmaztuk (n, α), (n, p), valamint $^{12}\text{C}(n,xn')\text{Y}$ reakciók keltésére alkalmas anyagokat (pl. B, PE, C, Ni, Al).

5. ábra. A BIOPAN-6 tepsiben a biológiai kísérletek és mérőrendszerek elhelyezkedése belülről



A további egységek feladata volt a kozmikus nehéz részecskék feltérképezése elektronikus mérőrendszerek belsejében. Ez nagyon fontos, hiszen egy ilyen nagyenergiás részecske az egész mérőműszer meghibásodását okozhatja. Az 6. ábrán egy, a detektoron áthaladó nagyenergiás részecske kimaratót nyomát láthatjuk. A rombolt zóna kioldása egyszerre kezdődik mindkét felületen és halad az 1 mm vastag detektorlap belseje felé. A két irányban egyszerre kialakuló nyom néhány óra múlva találkozik. A hosszúság, átmérő és idő adatokból a nyomkialakulás sebessége meghatározható és ez összefüggésbe hozható a részecske fajtájával és energiájával.

6. ábra. Egy nagyenergiás részecske nyomának mikroszkópos felvétele öt különböző fókuszbeállításban



V. ÖSSZEFOGLALÁS

Az AEKI két kutatócsoportja 2006-ban a Nemzetközi Űrállomás Szerviz moduljában átlagosan 423 $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ dózisteljesítményt mért. 180 napra ez 76 mSv dózist eredményezett. Az Űrállomás légénysége kb. ennyi időt töltött el az állomáson. Indokolt tehát, hogy a sugárvédelmi feladatok ellátására az űrben is kiemelkedő fontosságot tulajdonítsunk. Az űrhajósok sugárdózis terhelését korlátozni kell, de ennek csökkentéséhez ismerni kell a dóziseloszlás adatokat mind az űrobjektum, mind az emberi test belsejében, hogy a megfelelő külső védelem, ruházat kialakítható legyen. A MATROSHKA, a BIOPAN és más hasonló programok ezt a célt szolgálják. Például a 2001. és 2005. között végzett vizsgálatok eredményeképpen a Nemzetközi Űrállomáson sikeresen alkalmaztak új sugárvédelmi technikát, fokozva a védelmet a korábban megfelelőnek gondolt alumínium belső burkolat speciális összetételű műanyaggal való felcserélésével. Reméljük, hogy az AEKI Sugárvédelmi Kutatócsoportjának aktív részvétele ebben a nemzetközi összefogással folyó munkában hozzájárul a biztonságosabb dózistervezéshez és a hosszú időtartamú űrutazások feltételeinek megteremtéséhez.

IRODALOM

- [1] DURRANI, S.A., BULL, R.K.: Solid State Nuclear Track Detection - International Series in Natural Philosophy Vol. 111. Pergamon Press, U.K. (1987)
- [2] SZABÓ J., DUDÁS B., PÁLFALVI J.: Az űrállomás fantomja. In: *Természettudományi Közlöny*, 138. (2007) 7. p. 323-325.
- [3] BENTON, E.V.: On latent track formation in organic nuclear charged particle track detectors *Proceedings of the International Topical Conference on Nuclear Track Registration in Insulating Solids and Applications* 1 (1969) II:2-23.
- [4] SOMOGYI, G., TOTTH-SZILAGYI, M., HUNYADI, I., and HAFEZ, A.F.: Effects of certain production parameters and post-production treatments on the etching characteristics of CR-39 sheets *Nuclear Tracks* 12 (1986) 97-100.
- [5] O'SULLIVAN, D., THOMPSON, A.: The observation of a sensitivity dependence on temperature during registration in solid state nuclear track detectors *Nuclear Tracks* 4 (1980) 271-276.
- [6] SZABÓ, J., FEHÉR, I., PÁLFALVI, J.K., BALÁSHÁZY, I., DÁM, A., POLÓNYI, I., BOGDÁNDY, E.N.: In vitro cell irradiation system based on ^{210}Po alpha source: construction and characterization *Radiation Measurements* 35 (2002) 6:575-578.
- [7] SZABÓ J., DUDÁS B., PÁLFALVI J.: Az űrállomás fantomja. In: *Természettudományi Közlöny*, 138. (2007) 7. p. 323-325.
- [8] PÁLFALVI, J.K., AKATOV, YU., SZABÓ, J., SAJÓ-BOHUS, L., EÖRDÖGH, I.: Detection of primary and secondary cosmic ray particles aboard the ISS using SSNTD stacks *Radiation Protection Dosimetry* 120 (2006) 1-4: 427-432.
- [9] APÁTHY I. Sugárdózis-mérése égen és Földön. *Híradástechnika*, LIX (2004)5. p. 25-36.
- [10] PÁLFALVI J., SZABÓ J., DUDÁS B.: AEKI: exobiológiai programokban. : *Technika Műszaki Szemle*, 50. (2007) 3. p. 38-39.
- [11] J. K. PÁLFALVI, J. SZABÓ, B. DUDÁS: Neutron detection on the Foton/M2 satellite by a track etch detector stack *Radiation Protection Dosimetry* 126 (2007) 1-4: 590-594.