

A FELSŐLÉGKÖR SŰRŰSÉGÉNEK MEGHATÁROZÁSA
AZ ŰRKUTATÁS ESZKÖZEIVEL I.

III Márton
MTA Csillagvizsgáló Intézet
Bajai Observatóriuma
Almár Iván
MTA Csillagvizsgáló Intézet

Bevezetés

Nincs sok információnk arról, hogy régebben milyenek voltak az elfogadott nézetek a légkör magasabb rétegeinek szerkezetéről, összetételéről, és főleg sűrűségéről. Feltehető, hogy Newtonnak, amikor behatóan foglalkozott a gravitációval, kialakult elképzelése volt a légkör véges kiterjedéséről. Még inkább bizonyos ez Torricelli esetében, aki a légnyomást a levegő hidrosztatikai nyomásával azonosította. Ennek ellenére sem komolyabb légkörkutatásról, sem légköri modellről a 19. sz. előtt nem beszélhetünk. Csak a ballisztika fejlődése és a léghajózás hozta magával a légkör pontosabb megismerésének igényét. A múlt század még kezdetleges eszközökkel végzett légkörkutatásának eredményeit egy 1864-ben, Franciaországban megjelent könyv foglalja össze, és az abban közölt adathalmaz joggal tekinthető a légkör (néhány km magasságig terjedő) első modelljének.

Századunkban azután a légkörkutatás nagymértékben fellendült. Ez megmutatkozik egyrészt a módszerek számában és finomodásában, másrészt abban, hogy a légkörkutatást egyre nagyobb magasságokra sikerült kiterjeszteni. Néhány évvel ezelőtt hazánkban is megkezdődött a semleges felsőlégkör kutatása, mégpedig a legmodernebb és leghatékonyabb módszerek egyikével, a mesterséges holdak fékeződésének megfigyelésén alapuló módszerrel. Cikkünkben éppen ezért főleg ezt a módszert kívánjuk részletesebben ismertetni. Előtte azonban áttekintést nyújtunk a felsőlégkör kutatásánál alkalmazott egyéb módszerekről.

1. Légkörkutatás rakéták felhasználása nélkül

1946-ban kezdődött meg a rakéták felhasználása a légkörkutatás céljaira. Ez alapvetően befolyásolta az alkalmazható módszereket, és így célszerű a kutatásokat éppen ezen az alapon csoportosítani.

A rakéták felhasználása nélkül végzett légkörkutatási módszerek közül eredményessége miatt elsőként a meteormegfigyeléseken alapuló módszert kell megemlítenünk. E módszer segítségével századunk húszas éveitől kezdve kaptak értékes adatokat a légkör sűrűségéből, és mivel a nyert adatok főleg a 40-110 km közötti magasságokra vonatkoztak, ez a módszer megadta a sztratoszféra közelebbi megismerésének lehetőségét.

A meteor-megfigyeléseknek a légkörkutató szolgálatába való állítása azért váratott oly soká magára, mert egyáltalán nem könnyű feladatról van szó. Ehhez szükség van olyan részletes elméletre, amely a meteorjelenségeket fizikai alapokon megmagyarázza. Az elméletnek le kell írnia a meteorok a légkörben történő mozgása folyamán fellépő valamennyi folyamatot: a meteortest felizzását, a párolgási és disszociációs folyamatokat, az elpárolgott anyag kondenzációját, csóvaképződést, a meteortest lefékeződését, az azzal kapcsolatban fellépő elektromágneses jelenségeket stb. Következésképpen a meteor-megfigyelésekből nyert légsűrűségi adatok egész sor fizikai hipotézisen alapultak, és ezek alkalmazásánál lényeges szerepet játszanak nehezen meghatározható vagy csak pontatlanul becsülhető adatok, mint pl. a meteortest alakja, anyagának sűrűsége, ionizációs effektivitása stb. Ebben áll a módszer hátránya. De tagadhatatlan előnye az, hogy a legegyszerűbb vizuális megfigyelésekből is lehet - legalábbis tájékoztató jelleggel - a felsőlégkör sűrűségére következtetni.

A módszer pontosságát jelentősen növelték, mégpedig előbb a fotografikus, majd a radarral történő észlelés bevezetésével. Ugyanakkor sikerült olyan formulákat is levezetni, amelyekben csak kisebb számban vagy egyáltalán nem szerepelnek a meteorra vonatkozó individuális paraméterek. Így pl. B. Ju. Levin kimutatta, hogy a különböző anyagú és sebességű meteoroknak a felizzás pillanatában gyakorlatilag azonos a hőmérséklete. Ebből kiindulva levezetett egy igen egyszerű összefüggést két meteor sebessége és felvillanási magassága között [1]:

$$h_2 - h_1 = 5/2 \cdot H \cdot \ln v_1 / v_2$$

ahol:

H a skálamagasság, a légkör egy igen fontos paramétere (azt a magasságkülönbséget jelenti, amennyivel feljebb haladva a sűrűség felére csökken).

A magasságmeghatározás pontosságát lényegesen növelte a *fotografikus meteorészlelés*. Az első eredményes felvételeket Lindemann és Dobson készítette a húszas években [2], míg a rendszeres meteorfényképezést a harmincas években vezették be az USA-ban (Harvard Csillagvizsgáló) és a Szovjetunióban (Dusanbe).

A fotografikus módszernél legalább két állomásról fényképezik a meteort, mialatt a fényképezőgépek előtt forgó szektorok a leképeződő vonalat szisztematikusan megszakítják. Ilyen felvételekről nagy pontossággal meghatározható a meteorpálya térbeli helyzete, a felvillanási pont magassága, a meteor sebessége és fékeződése. A felvételek kiértékelésére többféle módszert ismerünk. Így pl. F. L. Whipple módszerénél a meteorpálya több pontján lehet a levegő sűrűségét meghatározni: a nyom kezdetén, közepén, a végén és a maximális fényesség pontjában.

Az ötvenes években a meteormódszert kiterjesztették mesterséges meteorokra is. Ezeket úgy hozták létre, hogy Aerobee-rakétákat lőttek fel 80-100 km magasságra, és a rakétából nagy sebességgel kilőtt sörétgolyók felizzását több földi pontból egyidejűleg fényképezték. A módszer szellemes, de költségei nem állnak arányban hatékonyságával.

A háború utáni években kezdték alkalmazni a radartechnikát a meteorjelenségek tanulmányozására. A radarmegfigyelések bőségesen

nyújtják a légkörre vonatkozó információkat: a levegő nyomása és sűrűsége mellett képet adnak az ionok képződéséről, rekombinációjáról és diffúziós sebességéről, sőt, a meteornyomok sodródásából a légköri szelekre és turbulenciákra is lehet következtetni.

A rakétakorszak kezdetéig a különböző meteormegfigyelési módszerek adták a magaslégkör kutatásának gerincét. Mindamellett meg kell említenünk a ritkán alkalmazott módszerek között az esti és hajnali *szürkület megfigyelését*. Mivel egy gáz sűrűsége és a fénynek benne történő diszperziója között arányosság áll fenn, ezért a légkörben szóródó fény intenzitás-változásaiból, ill. a szürkület menetének fotometriai-spektroszkópiai megfigyeléséből a levegő sűrűségére lehet következtetni.

A módszer nem igényel speciális felszerelést, ezért több országban is alkalmazták. Elvileg hasonló alapokon nyugszik az a módszer, amelynél igen erős fényű fényszórók fényének szóródását vizsgálják fotografikus módszerekkel. A megfigyelés kiterjed a fény intenzitására, polarizáltságára és spektroszkópiai összetételére. Az 50-es években az USA-ban ezzel a módszerrel egész 70 km magasságig tudtak légköri adatokat gyűjteni.

Az utóbbi módszerekkel rokon eljárás a *sarki fénynek* és az éjszakai *világító felhők* fényének spektroszkópiai elemzése. Így főleg a 60-100 km-es tartományban lehetett információkhoz jutni, de hangsúlyozni kell, hogy ezek az adatok nem túlságosan megbízhatóak, mert a módszer olyan sugárzási folyamatok elemzésén alapszik, amelyeknek működési mechanizmusát ma is csak részben ismerjük.

Ismert volta miatt nem térünk ki az *ionosféra*kutatásra, amely a légkörkutatás egy speciális ágának is tekinthető. Hasonlóképpen csak megemlítjük, hogy a *rádiócsillagászat*nak is van légkörkutatási vonatkozása, hiszen égitestek rádiósugárzásának ionosférikus refrakciójából a földi légkör elektronkoncentrációját lehetett meghatározni különböző magasságokban. Csupán érdekessége, és nem jelentősége miatt említjük meg, hogy alkalmazásra kerültek *akusztikus* és *termometrikus módszerek* is, amikor robbanások hang- és hőhullámjainak terjedési sajátosságait hozták összefüggésbe a légkör sűrűségével.

Ha az 1946-ig nyert légkörkutatási eredményeket összevetjük a későbbiekkel, megállapíthatjuk, hogy a korábbi adatoknál csak azok úttörő jellegét értékelhetjük. Az akkori eredmények pontosságát és számszerűségét nem lehet a maiakkal együtt említeni. Így érthető, hogy az említett módszerek egy alapjában sztatikus légköri modellhez vezettek, és ennek nem sok köze volt a valósághoz. Valamennyi módszer közös hibája, hogy a legfontosabb légköri paraméterek közül (nyomás, sűrűség, skálamagasság, hőmérséklet, közepes molekulatömeg) csak 1-2-nek a meghatározását tette lehetővé, és azt is csak közvetett módon, olyan hipotézisek felhasználásával, amelyek a szereplő fizikai folyamatokat csak hiányosan írták le. A hiányzó légköri paramétereket a jól ismert alsólégköri viszonyokból extrapolációval határozták meg, ami - ahogy a későbbiekben kiderült - ismét helytelen volt. Az említett módszerekkel legfeljebb 100-120 km-es magasságig lehetett információkhoz jutni. Mindezek alapján a rakétakorszak előtti magaslégköri modelleket ma már nem fogadjuk el, hanem a rakéták felhasználásával nyert, kb. 100 km magasságig terjedő és gazdag mérési anyagon alapuló dinamikus modellekkel helyettesítjük azokat.

2. Rakéták a légkörkutató szolgálatában

A második világháború után teljesen új tudományágként fejlődött ki a rakéták felhasználásán alapuló légkörkutató szolgálat. A rakéták első sikeres felhasználása légkörkutató célokra az USA-ban történt, néhány hónappal a háború befejezése után. Az első, Wac Corporal elnevezésű rakéták teljesítménye még igen szerény volt: 10 kg hasznos terhet tudtak felemelni 65 km-es maximális magasságra. Az igazi rakétakorszak 1946-ban kezdődött, amikor néhány, a németektől zsákmányolt A-4 rakétát adtak át tudományos kutatóknak.

A Szovjetunióban 1947-ben kezdődött meg a rakétás légkörkutató szolgálat, Sz. N. Vernov vezetésével. A rakétafejlesztés eredményeként 1949-ben már 100 km-es magasságot értek el a szovjet rakéták, és a szükséges próbarepülések után 1951-től kezdődően rendszeresen és nagy számban bocsátottak fel, és bocsátanak fel ma is légkörkutató rakétákat.

A modern felsőlégkör-kutatásban három módszert különböztetünk meg:

a) Rakétákra elhelyezett műszerekkel és anyagokkal végzett mérések. Ilyen vizsgálatoknál a rakéta műszerei csak rövid ideig (nagygyorsan: percekig) tartózkodnak a magaslégtérben. Következésképpen a mérési eredmények is csak egy rövid időtartamra vonatkoznak.

b) Mesterséges holdakra elhelyezett műszerekkel végzett mérések. A rakétákkal pályára állított holdak általában életük 99 %-ában 200 km feletti magasságokban keringenek, és huzamosabb ideig maradnak a légkörben (a pályaelemektől függően, nagygyorsan: évekig). A műszerek mindaddig folyamatosan továbbítják a földre mérési eredményeiket, amíg rádióadójuk működik.

c) A Föld körül keringő mesterséges égitestek (lehetnek rakéták vagy műszer nélküli holdak is) fékezésére alapján végzett légsűrűség meghatározások. A hold teljes élete folyamán alkalmazható módszer.

A három módszerrel kapott eredményeket általában meg kell különböztetnünk egymástól. Így pl. bár az a) és b) alatti mérések bizonyos hasonlóságot mutatnak, az eredmények akkor is különbözőek lesznek, ha a rakétán ugyanazokat a műszereket helyezzük el, mint a mesterséges holdon. A rakétaszonda ugyanis a starthely és a kulminációs pont közötti légrétege állapotáról ad egy pillanatképet, tehát nagyjából a Földnek ugyanazon pontja fölötti vertikális profilt mér. Ugyanakkor a holdak műszerei mindig a Föld más-más pontja felett végzik méréseiket. Ehhez járul még az is, hogy míg a rakéták általában a 0-200 km közötti magasságokban végzik méréseiket, addig a holdak általában 200 km felett. Így tehát a két módszer nem helyettesíti, hanem kiegészíti egymást. A b) és c) alatti módszerek viszont főleg abban különböznek, hogy míg a műszeres mérések a pálya egy-egy pontjához tartozó pillanatnyi értékeket szolgáltatják, addig a fékezésből levezetett adatok egy nagyobb pályán mentén, hosszabb idő alatt nyert átlagértékeknek tekintendők. Mivel a mesterséges holdak fékezésén alapuló módszerrel a későbbiekben részletesen foglalkozunk, most csak az első két módszerrel kapcsolatos főbb problémákat foglaljuk össze.

Mind a rakétákra, mind mesterséges holdakra főleg kétfajta műszert használnak a légsűrűség meghatározására: manométereket és tömegspektrométereket. A *manométeres mérések* kiértékelésére több

módszer ismeretes. Az egyik azon alapszik, hogy a rakéta vagy a mesterséges hold pörgethető egy kívánt tengely körül. Így a manométerek is a bemeneti nyílásaikkal hol menetirányba, hol azzal ellentétes irányba néznek, és ezért az általuk mért értékek a rakéta pörgésének periódusával fluktuálnak. A kinetikus gázelmélet alapján azután egyszerű összefüggést lehet levezetni a légkör sűrűsége és a periodikusan változó manometrikus adatok amplitúdója között.

Más esetben az ideális gázokra vonatkozó alapegyenletet és a barometrikus egyenletet használják fel a közeg részecskéinek koncentrációjára (ún. manometrikus egyensúlyi állapot esetére) vonatkozó összefüggés levezetésére [3]:

$$N = B \cdot p \cdot (M \cdot T \cdot \sin V)^{-\frac{1}{2}}$$

ahol: N = a légkör részecskéinek koncentrációja

B = műszerállandó

p = mért manométernyomás

M = a gáz molekulásúlya

T = a műszerfal hőmérséklete

V = a belépőnyílás síkjának a sebességvektorral alkotott szöge.

Itt p és T értékét mérik és telemetrikusan továbbítják, míg a V szöveget speciálisan határozzák meg. Az M értékét más mérésekből ismertnek kell venni, hogy a sűrűség is meghatározható legyen.

A manometrikus mérések a légsűrűség meghatározásának kérdését nem oldották meg. Főleg rakétaszondák esetében több különböző mérés határú manométerre van szükség az igen nagy mérési tartomány miatt (a mérendő szélső értékek aránya 10^8 !). Rendkívül nehéz feladat a műszereket úgy megkonstruálni, hogy azok a világűr körülményei között is kifogástalanul működjenek. Ezen felül a földi körülmények között végzett kalibrálás elkerülhetetlen nagy hibákat visz be a kapott numerikus értékekbe. Itt ui. lényeges szerepet játszanak a világűrbeli körülmények között lejátszódó rekombinációs folyamatok, amelyeknek hatását nehéz megbecsülni. Végül rakétaszondák esetében teljesen meghamisítja a méréseket a változó intenzitású deszorpció, vagyis a manométer anyagából történő gázkiáramlás. Ezért újabban légsűrűség-meghatározás céljából legfeljebb holdakon helyeznek el manométereket, de azok adatait is csak néhány nap elteltével (a deszorpció megszűnése után), és csupán mint relatív változásokat veszik figyelembe. A manométeres méréseket általában 100%-os hibával terheltnek lehet tekinteni, és ezért főleg csak a tájékozódást szolgálják.

Több esetben tömegspektrométert is használtak a levegő sűrűségének meghatározására. Ilyenkor mód adódik arra, hogy a közeg közepes molekula súlyát, és a teljes nyomást is meghatározzák. A különböző mérési elveknek megfelelően levezetett összefüggések rendszerint a nyomás, sebesség, molekulásúly, tubushőmérséklet és sebesség felhasználásával jutnak el a légsűrűséghez. A módszer alkalmazásánál fellépő hibák főleg a következők: kalibrációval kapcsolatos és telemetriai hibák, magasság-meghatározás és hőmérsékletmérés hibája, az orientációs szög hibája és dinamikai tényezők. Mindezek azt eredményezik, hogy a tömegspektrometriai légsűrűségadatok nem sokkal megbízhatóbbak, mint a manometrikusak.

Teljesen újszerű módszert próbáltak ki szovjet tudósok 1958-ban, amikor egy rakétából 430 km magasságban 4 kg nátriumot lőttek ki. A kísérlet célja az volt, hogy a keletkező *nátriumfelhő diffúziós sebességéből* meghatározzák a levegő sűrűségét. Hasonló méréseket végeztek az USA-ban és Franciaországban is, sőt mesterséges holdról kibocsátott felhővel újabban is kísérleteztek.

A kísérletet az teszi lehetővé, hogy szürkületkor a Nap sugarai megvilágítják a keletkező felhőt, a nátriumpárák gerjesztődnek, erősen fluoreszkálnak, és intenzíven sugároznak a nátrium D_1 és D_2 hullámhosszán. Így a felhő szűrőkön keresztül lefényképezhető. A módszer különösen több helyről készült szinkronfelvételek esetében adott szép eredményeket, főleg ha fotoelektromos mérésekkel kombinálták azokat. A felvételek feldolgozásánál meghatározzák az izofótákat, és azokból a felhő centrumának fényességváltozását az idő függvényében. Ebből meghatározható a diffúziós koefficiens, és a közeg hőmérsékletének ismeretében a légsűrűség kiszámítható.

A módszer szporadikusan került alkalmazásra, mert a nagy költségek mellett komoly szervezéstechnikai problémák merülnek fel, és a ráfordított munka nem áll arányban az eredménnyel. Korlátozza a megfigyelést, hogy csak szürkületben lehet a felhőket fényképezni, tehát a kísérletre csupán 1 órás intervallum áll rendelkezésre.

Mivel a diffúzió sebessége magasságfüggő, és csak megfelelő mértékben kiterjedt felhő fényképezése vezet célra, ezért a módszer nátriummal csak 200-400 km között alkalmazható.

Az eddigiektől nagyon különbözik az *eső gömbök módszere*, amelynél rakétákkal nagy magasságra feljuttatott gömbök szabad esésénél fellépő közegellenállásból határozzák meg a levegő sűrűségét. Az első ilyen típusú méréseket az USA-ban végezték 1952-ben. Az egyes kísérletekben használt gömbök mérete különböző volt: előbb 120 cm átmérőjű gömböket használtak, majd áttértek 18 cm átmérőjűekre, amelynek súlya 5,5 kg volt. A golyó belsejében akcelerométert helyeztek el, hogy a golyó gyorsulását mérni lehessen. Ezenkívül egy miniatűr Doppler-adót is tettek a golyó belsejébe, hogy a Doppler-mérések segítségével meg lehessen határozni a golyó pontos pályáját. A sűrűség meghatározására a következő összefüggést használták: [4]

$$M \cdot a_0 = 1/2 \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 \cdot \rho$$

ahol:

M = a golyó tömege

a_0 = a golyó mért gyorsulása

C_D = közegellenállási együttható

A = a golyó keresztmetszete

v = a golyó sebessége

ρ = a levegő sűrűsége

A módszer az eddigiek közül talán a legpontosabb eredményeket adta. Előnye, hogy a szereplő paraméterek jól meghatározhatók, és a sűrűséggel nem valamely bizonytalan hipotézisen keresztül állnak összefüggésben. Hátránya, hogy az esés, és ezzel a mérés is, viszonylag rövid ideig tart, tehát ily módon csak egy pillanatnyi keresztmetszeti képet lehet kapni, és csupán a

légkör alsó rétegeiről. Felmerült a módszer javításának lehetősége is. Ez abban állna, hogy egy több tíz méter átmérőjű műanyag gömböt kellene a golyók helyett használni. Ez egészen lassan esne, és fényképezhető is lenne, ami a sebesség-meghatározást pontosabbá tenné. Ugyanakkor azonban az üres műanyag gömb esetében a keresztmetszet a deformáció miatt határozatlanná válik, és a ballon a kis súly miatt nemcsak szabadon esik, hanem sodródik is a szelek hatására. Éppen ezért, és mert a mesterséges holdak fékeződéséből levezetett sűrűségértékek összehasonlíthatatlanul nagyobb számban állnak rendelkezésre és sokkal kevesebbe kerülnek, az eső gömbök módszerével az utóbbi években már nem végeznek sűrűség-meghatározást.

Ezzel be is fejeztük az ismertebb légsűrűség-meghatározási módszerek számbavételét. Nem vállalkozhatunk arra, hogy részleteiben hasonlítsuk össze őket egymással. Inkább csak azt szeretnénk kiemelni, hogy noha mindegyik módszernek van előnyös oldala, azért legtöbbjükénél a mért adatok és a légsűrűség közötti összefüggés eléggé közvetett, és mindegyiknél különböző korlátozások érvényesek, amelyek nagy mértékben lerontják a módszer hatékonyságát. Végül, sok esetben az is döntő, hogy a módszer nem rentábilis, és éppen ilyen vonatkozásban lehet megemlíteni a mesterséges holdak fékeződésén alapuló módszer előnyeit. Ez a módszer szinte valamennyi objektum esetében alkalmazható, attól függetlenül, hogy azt milyen céllal lötték fel. Nem számít az sem, hogy van-e működő rádióadója, ami pedig a műszeres méréseknél alapfeltétel. Ki kell emelnünk azt is, hogy ennél a módszernél nincsen szükség a holdon elhelyezett műszerekre, és ilyenformán csak a megfigyelési és feldolgozási munka igen szerény költségei merülnek fel. Éppen ezért mondhatjuk, hogy az összes módszer közül ez a legolcsóbb. Ugyanakkor ezzel a módszerrel a hold teljes élettartama folyamán folyamatosan kaphatunk légsűrűségi adatokat, és ezek - mai tudásunk szerint - megbízhatóbbak az eddigieknél.

3. A mesterséges holdak fékeződésén alapuló módszer

Egy mesterséges hold pillanatnyi helyzetét 6 megfelelően választott pályaelem általában egyértelműen meghatározza. Ilyen pályaelemrendszer lehet pl. a következő: az a fél nagytengely, az e numerikus excentricitás, az i pályahajlás, az Ω felszálló csomó hossza, az ω perigeum hossza, és τ a perigeumon való áthaladás időpontja.

Első közelítésben igaz, hogy a Föld gömb alakú lenne, belső összetétele gömbszimmetrikusan homogén volna, ha nem lenne légköre, és ha gravitációs szempontból a Naprendszer többi tagjától el lenne szigetelve, akkor a mesterséges hold pályája állandó alakú és a térben (a csillagokhoz képest) állandó helyzetű ellipszis lenne, vagyis pályaelemei nem változnának. Mivel azonban fenti feltételek nem teljesülnek, ezért a hold pályája sem állandó, hanem a különböző perturbáló (zavaró) hatások befolyására egyes pályaelemei megváltoznak.

A mesterséges hold a Föld gravitációs potenciáljai által meghatározott erőterben végzi mozgását. A Föld alakjának eltérése a gömbtől (főleg a lapultsága) anizotrópiákat hoz létre az erőterben, és ezek hatására főleg két perturbáció jelentkezik: a pályasík a Föld tengelye körül forog, és a nagytengely iránya a síkon belül is állandóan változik. Az előbbi perturbáció a Ω , az utóbbi a ω változásaiban mutatkozik meg. A légkör perturbáló hatása -

szerencsére - nagy mértékben különbözik a gravitációs tér perturbációtól. A hold fékeződését leegyszerűsítve a következőképpen lehet elképzelni. Mivel a légsűrűség felfelé exponenciálisan csökken, ezért egy számottevő excentricitású pályán keringő hold minden egyes keringés folyamán a perigeum kisebb környezetében "megmártózik" a sűrűbb légrétegekben, míg a pálya többi részén lényegesen ritkább közegben halad. Tehát a hold a perigeum környezetében mindig kissé lefékeződik, és így a fékező hatás a perigeum környezetében uralkodó légsűrűséggel arányos. A perigeum környezetében lefékezett hold már nem tud ugyanolyan messzire eltávolodni a Földtől, mint az előző keringés folyamán, vagyis a pálya apogeuma csökken, míg a perigeum alig változik. Következésképpen az ellipszis excentricitása csökken. Így tehát a légkör fékező hatására elsősorban az a fél nagytengely és az e excentricitás változik meg. Hozzátehetjük, hogy az eddigi perturbációk *szekulárisak*, vagyis az idővel arányosan növekvőek. Ezzel szemben a Nap és a Hold gravitációs perturbációi, amelyek pontosabb méréseknél semmiképpen sem hanyagolhatók el, *periodikus* jellegűek (a sugárnyomásból eredő perturbációról a későbbiekben lesz szó). A főbb perturbáló hatásokat a következő táblázat foglalja össze:

Perturbáció forrása	Perturbáció típusa			
	nagy	kicsi	közepes	kicsi
Földi grav. tér	Ω, ω	-	e	i, Ω, ω
Légkör	a, e	i	-	Ω, ω
Luni-szoláris	-	-	-	a, e, i, Ω, ω

Az eddig elmondottakból nyilvánvaló, hogy az egyes perturbációs források az észlelt perturbációk alapján szétválaszthatók. Ha légsűrűség megállapítása a cél, akkor az a és e pályaelemeket, ill. a Kepler III. törvényével a -ba átszámítható P keringési időt kell mérni. Ez utóbbi legalább 2 nagyságrenddel pontosabban határozható meg, mint az excentricitás, ezért a légsűrűség meghatározására levezetett képletek szinte kivétel nélkül a keringésidő megváltozását veszik alapparaméternek.

A számításhoz szükséges formulák levezetése egyrészt aerodinamikai, másrészt égimechanikai alapon történik. A fékeződés a közegellenállásra levezetett képletben kapcsolódik össze a sűrűséggel:

$$F_D = 1/2 \cdot C_D \cdot S \cdot \rho \cdot v^2$$

ahol: C_D = a közegellenállási együttható

S = a mozgó test effektív keresztmetszete

ρ = a közeg sűrűsége

v = a test sebessége a közeghez képest

Ezt az F_D közegellenállási erőt lehet azután a pályaháborgásokra levezetett speciális Lorange-féle egyenleteknél mint perturbáló erőt figyelembe venni. Első lépésként ki kell számítani, hogy ezen perturbáló erő hatására egyetlen keringés folyamán mekkora az a fél nagytengely megváltozása:

$$\Delta a = - a^2 \delta \int_0^{2\pi} \frac{(1 + e \cos E)^{3/2}}{(1 - e \cos E)^{1/2}} \rho dE$$

és az e excentricitás változását tükröző $x = e \cdot a$ paraméter változása:

$$\Delta x = - a^2 \delta \int_0^{2\pi} \frac{1 + e \cos E}{1 - e \cos E} \cdot (\cos E + e) \rho dE$$

ahol: a, e = a hold pályaelemei

ρ = aerodinamikai paraméter (később kerül tárgyalásra)

E = excentrikus anomália

A két integrál megoldása sokféle módon történhet. Gyakori, hogy az integrandusnak az e szerinti sorbafejtésével és az elsőfajú, n -ed rendű, imaginárius argumentumú Bessel-függvények felhasználásával oldják meg a feladatot. Az első keringés változásaiból numerikus integrálással is meghatározhatók a hosszabb időintervallumot átfogó változások.

Külön problémát jelent azonban a levezetett "elméleti" formulák átalakítása gyakorlati célokra. Ez általában sorfejtéssel történik. A legismertebb ilyen képletet D. G. King-Hele vezette le: [5]

$$\rho_A = - \frac{0,157 \cdot \dot{T}}{\delta} \sqrt{\frac{e}{a \cdot H}} \left[1 - 2e + \frac{5}{2}e^2 - 3e^3 - \frac{H}{8ae} \left(1 - 10e + \frac{7H}{16ae} \right) + \frac{\varepsilon}{e} \sin^2 i \cdot \cos 2\omega \right]$$

(0,02 ≤ e ≤ 0,2 esetén)

ahol: ρ_A = a levegő sűrűsége $H/2$ km-rel a perigeum fölött (gcm^{-3})

\dot{T} = a hold keringésidejének napi változása (nap/nap)

H = a légkör skálamagassága a perigeum magasságában (km)

ε = a légkör lapultsági együtthatója (= 0,00335)

A képlet elárulja, hogy a keringésidőn kívül a többi pályaelem alárendelt szerepet játszik, meghatározásukat is elegendő közelítő pontossággal végezni. Ezzel szemben a keringésidő változásánál a legnagyobb pontosságra kell törekedni, és azt is lehetne mondani, hogy ezzel a módszerrel a légsűrűség meghatározás tulajdonképpen a keringésidő meghatározásra vezetődik vissza. Már itt meg kell azonban jegyeznünk, hogy a keringésidő mért változása nem egyedül a légkör fékező hatásának tudható be. Mesterséges holdaknál a Nap sugárnyomását is figyelembe kell venni, ha ez a hatás kimutatható. Minél nagyobb a hold hatáskeresztmetszete a tömegéhez képest, annál inkább válik lényegessé a sugárnyomás, amelynek számítására például a következő képlet szolgálhat: [6]

$$\frac{da}{dn} = 2a^3 F \left(\left(S \cdot \cos E + T \sqrt{1 - e^2} \sin E \right) \right) \frac{E_1}{E_2}$$

$$F = \frac{s}{c} \cdot \frac{f}{m} \cdot \frac{1}{G \cdot M}$$

ahol: da/dn = a félnagy tengely elsőrendű perturbációja egy keringés folyamán
 S, T = a perturbáló erő pályasíkba eső és arra merőleges komponensei
 s = Nap-állandó
 c = fénysebesség
 f/m = a hatás keresztmetszet és a hold tömegének aránya
 G = gravitációs állandó
 M = a Föld tömege
 E_1, E_2 = a földárnyékba való be- ill. kilépéskor felvett excentrikus anomália.

A sűrűségképlet egyik lényeges, hogy nem érzékeny H esetleges hibáira: ha H hibája 25%, akkor ez a légsűrűség számított értékét csak 1%-kal terheli! Ez azért fontos, mert H értéke a naptevékenységtől is függ, még hozzá nem teljesen ismert módon.

Az utóbbi probléma némely szerzőt arra indította, hogy a formulát ne a légsűrűségre, hanem annak \sqrt{H} -val alkotott szorzatára vezesse le. Így M. J. Marov a következő képletet javasolja: [7]

$$\rho\sqrt{H} = -\frac{2}{3} \cdot \frac{\dot{T}}{T} \cdot \frac{1}{C} \cdot \frac{1-e}{1+e} \sqrt{\frac{e}{2\pi r_p(1+e)}}$$

ahol:

T, \dot{T} = a keringésidő és változása

$C = C_D \cdot A / 4m$ és A a hold felszíne, m a tömege

r_p = a perigumhoz tartozó rádiuszvektor

Módszere abban áll, hogy a bal oldali szorzatot grafikusán ábrázolja, és a grafikonról nyeri H értékét, majd ennek segítségével kiszámítja a sűrűségét. Hasonló szerkezetű G. V. Groves képlete is: [8]

$$\rho\sqrt{H} = -\frac{m \cdot \dot{T}}{3AC_D} \sqrt{\frac{2e}{\pi a}} \frac{\sqrt{1-e^2}}{1+e^2}$$

A sűrűség helyett a fenti szorzat kiszámítása fizikailag is megengedhető, ha figyelembe vesszük, hogy a sűrűség és a H változásai szorosan összefüggnek egymással, továbbá H -nak viszonylag kis grádiense van.

A képletek sorának ismertetését még folytathatnánk, de helyette inkább térjünk vissza a már korábban említett aerodinamikai paraméterre, amely valamilyen formában mindegyik sűrűségképletben szerepel. A jelölés a következő kifejezést vonja össze:

$$\delta = C_D \cdot S \cdot F / m$$

ahol az eddig szerepelteken kívül:

F = a légkör rotációját figyelembe vevő tényező.

Az első három tényezővel kapcsolatban különböző problémák merülnek fel. Az *aerodinamikai* (közegellenállási) *együttható* konkrét megmérése a

magaslégkör esetében nem végezhető el. Szélcsatorna-kísérletek extrapolációjából de főleg elméleti úton, az ún. szabad molekulaáramlás esetére 2,2 - 2,4-et kaptak. A számításokban a molekuláknak a hold falával való ütközésénél a diffúz re-emisszió mechanizmusát fogadták el. Eszerint a molekulák nem a rugalmas ütközés törvényeinek megfelelően verődnek vissza, a visszaverődés szöge független a beesésé szögétől. Sokan feltételezik, hogy a visszaverődésre érvényes a Knudsen-féle cos-törvény, ugyanakkor a molekulák sebességét Maxwell-eloszlásúnak veszik. Megoldatlan kérdés a re-emisszió hőmérséklete: befolyásolja-e a re-emittált molekula hőmérsékletét a felület hőmérséklete, vagy sem? Vagy esetleg teljesen meg is határozza? Tény, hogy a lényegesen különböző elméletek is hasonló C_D -értékekre jutnak. A légsűrűség meghatározásban nem annyira a C_D abszolút értéke játszik szerepet, mint inkább értékének feltételezhetően állandó volta.

Az *effektív keresztmetszet* kiszámítása igen egyszerű a gömb alakú (vagy azt megközelítő alakú holdak esetében, többnyire azonban nehéz meghatározni a sebességvektorra merőleges síkba eső felület nagyságát. Akármilyen alakú stabilizált hold esetében ismeretes az effektív keresztmetszet, de valamelyik tengelye körül pörgő holdnál az S érték állandóan változhat. Mivel azonban a pörgés folyamatos és általában viszonylag gyors, mód nyílik arra, hogy az átlagos keresztmetszettel számoljunk. Ennek meghatározását megkönnyíti, hogy a kozmikus objektumok túlnyomó többsége henger alakú, vagy ahhoz közel áll, sőt a holdak több mint felénél a test hosszának és átmérőjének L / D aránya nagyobb kettőnél. Ilyenkor a maximális tehetelenségi nyomaték tengelye merőleges a hossz tengelyre. Ebben az esetben légcsavarszerű mozgás állhat elő, amikor az átlagos keresztmetszet nyilván:

$$S = L \cdot D$$

Abban a másik szélsőséges esetben, amikor a test bukácsoló mozgást végez, (vagyis a forgástengely merőleges a sebességvektor irányára) az átlagos keresztmetszet:

$$S = \frac{2}{\pi} (L \cdot D + 0,25\pi D^2)$$

A test azonban az említett két határhelyzet között bármilyen helyzetet is elfoglalhat. Erre az általános esetre sok szerző javasolja, hogy S gyanánt a hold felszínének 1/4-ét vegyük, mint az összes lehetséges érték közelítő középértékét. Ugyanerre az esetre King-Hele egy másik közelítést javasol: [5]

$$S = L \cdot D(0,818 + 0,25D / L)$$

Némely esetben fotometriai mérések az S változásaival kapcsolatban adhatnak útbaigazítást, sőt megadhatják a hold pontos orientációját is. Megemlíthetjük, hogy ennél a paraméternél még egy járulékos effektussal is lehet számolni. A hold mozgása folyamán ui. elektromosan feltöltődhet és így a földi mágneses tér is lefékezi. Az effektust úgy is fel lehet fogni, mintha a hold keresztmetszete növekednék meg, bár ez a jelenség a C_D értékét is érinti. A

kérdés elméletileg még nem teljesen tisztázott, és az effektus kimutatására irányuló mérések negatív eredménnyel zárultak. Gyakorlati számításoknál éppen ezért nem szokás figyelembe venni.

Az aerodinamikai paraméterben szereplő F rotációs tényező azzal kapcsolatos, hogy a légkör a Földhöz képest rotál. A légkör rotációja következtében a mért közegellenállás tartalmaz egy a pályasíkkal szöget bezáró erőhatást is. Ennek a sebességvektorral párhuzamos komponensét vesszük figyelembe a képletben mint korrekciós tényezőt.

A szóbanforgó komponens közelítő értéke:

$$F = (1 - r_p \cdot w \cdot \cos i / v_p)^2$$

ahol:

r_p, v_p = a hold rádiuszvektora és a Földhöz viszonyított sebessége a perigeumban

w = a levegő sebessége a Földhöz viszonyítva

Korábbi mérések 400 km magasságig már képet adtak a légkör átlagos sebességéről. Ennek alapján F értéke egy átlagos hold esetében 0,9-1.1 körül mozog, és a hold élettartama folyamán nem változik lényegesen. Kiderült azonban, hogy a rotációs tényező elhanyagolása akár 10%-os hibát is okozhat.

Tekintve, hogy a holdak fékeződésén alapuló módszert aprólékosabban elemeztük, mint a többi, a hibalehetőségek is jobban előtérbe kerültek. Ennek ellensúlyozására megemlítjük, hogy a jóminőségű légsűrűségmérések hibáját ennél a módszernél általában 10-20% közöttinek becsülik, ami jobb, mint az egyéb módszereknél elért pontosság. Hozzátehetjük még, hogy a felsőlégkörről alkotott elképzeléseink 99%-ban a fékeződésből levezetett sűrűségadatokon alapulnak. A méréseket egy, az egész világot átfogó hálózatok végzik, köztük magyar állomások is.

Cikkünk következő, második részében tárgyaljuk a megfigyelési eszközöket és műszereket, a megfigyelések feldolgozási módszereit és végül a felsőlégkör szerkezetére és a sűrűségváltozásokra vonatkozó modern eredményeket.

IRODALOM

- [1.] *Levin B. Ju.:* Elementi fiziceszkoj teoriji meteorov
- Astron. Zsurnal, Vol 17, No3, 1940.
- [2.] *Lindemann F. A., Dobson G. M. B.:* A theory of meteors etc.
- Proc. Roy. Soc. A, 102, p. 103, 1923.
- [3.] *Poloskov S. M.:* Upper atmosphere struycure parameters etc.
- Space Res. I., p. 95, 1960.
- [4.] *Jones L. M. Fischlach F. F., Peterson J. W.:* Seasonal and latitude variations etc.
- IGJ Rocket Rep. Ser. No 1, 0. 47, 1958.
- [5.] *King-Hele D. G.:* Theory of Satellite Orbits in an Atmosphere
- Butterworths, London 1964.
- [6.] *Kozai Y.:* Effects of Solar Radiation Pressure etc.
- SAO Spec. Rep. No56, 1961.
- [7.] *Marov M. J.:* O plotnosztyi verchnyej atmosferü etc.
- Koszm. Isszled. Tom II., No6.
- [8.] *Groves G. V.:* Effect of the Air Drag etc.
- Nature, 181, p. 1761, 1958.

