

KIS ATLASZ SOROZAT A NAPRENDZERRŐL (8):
ŰRKUTATÁS ÉS KÉMIA

Bérczi Szaniszló, Homonnay Zoltán, Lukács Béla, Mörtl Mária, Weidinger Tamás

Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, UNICONSANT
 Budapest, Püspökladány, 2005

**Bérczi Szaniszló, Homonnay Zoltán, Lukács Béla,
Mörzl Mária, Weidinger Tamás:**

**Kis atlasz a Naprendszerrel (8):
ŰRKUTATÁS ÉS KÉMIA**

Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport,
ELTE TTK/MTA Geonómia Bizottság, Budapest, 2005

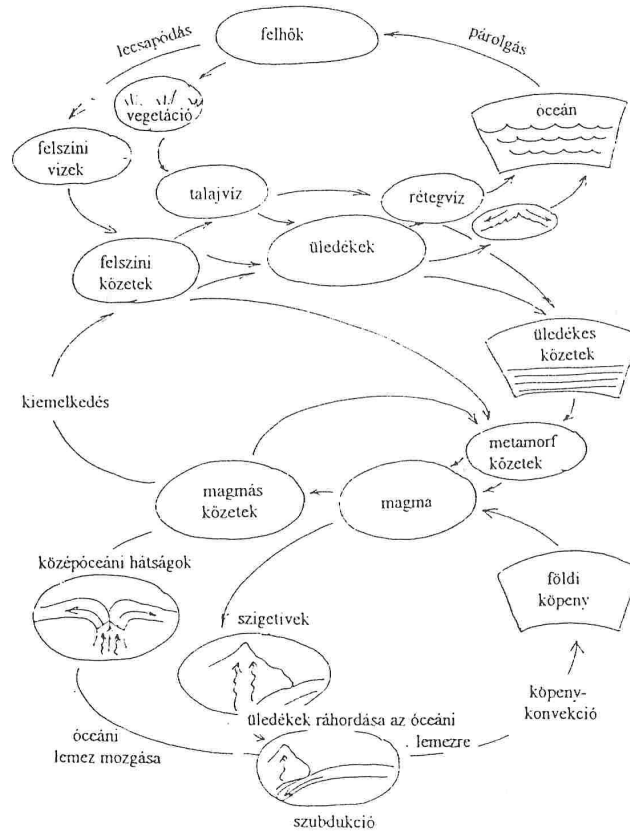
A periódusos rendszerből ismert kémiai elemek mindegyike szerephez jut a föld felszínén zajló kémiai folyamatokban. E kémiai elemek többnyire molekulákba vagy kristályokba zártan tartózkodnak a nagy kémiai színpad egyes állomáshelyein. Ezek az állomások különféle anyagi rendszerek. Az anyagi rendszerek legegyszerűbb csoportosítása a halmazállapotok szerinti. Magának a földtestnek az anyagi övezetei is szemléltetik ezt a három tartományt: a szilárd, kőzetekből fölépülő hatalmas közettestet, a felszínén sokféle formában jelen lévő és áramló hidroszférát és a gázok keverékéből álló atmoszférát. A Földön ezeket átszövő módon egy negyedik anyagi rendszer csoport is kialakult s ez az életet hordozó anyagi világé. Az élő anyagi rendszerek a három fő halmazállapot határvidékén foglalnak helyet. A négy nagy anyagi rendszer csoport öveket alkot a Földön és közöttük élénk csereforgalom zajlik.

Kémiai atlaszunkban mind a négy nagy anyagi tartomány kémiai világában kirándulást teszünk. De ma már más bolygótestek felszínére is eljutottak űrszondáink és ezeknek a felszínközeli anyagait is fokozatosan megismerjük. Érdemes ezért az űrkutatás és a kémia kapcsolatát olyan formában gazdagítani, hogy a földi kémiát (planetáris) összehasonlító kémiává tesszük. Ahogyan az összehasonlító planetológia az égitestek felszínét, úgy a kémia az égitest-felszíni környezetek anyagait veti össze. Ezzel lehetővé teszi a hagyományos kémiai ismereteknek izgalmas újráfelfedését és serkenti új irányokba való bővítését is. Mi ezeket a kémiai "kiterjesztéseket" elsősorban a Mars bolygóra mutatjuk be.

A Mars felszínét is főleg magmás eredetű kőzetek borítják, ahogyan ezt először a marsi meteoritekból, majd a Mars körül keringő űrszondák anyagvizsgálataiból megtudtuk. A Viking űrszonda légköri összetétel-mérése a Marson lehetővé tette, hogy a meteoriteknek egy addig rejtélyes csoportját marsi eredetűnek azonosítsák a kutatók. Ma már mintegy 30-35 különböző marsi meteoritot ismerünk. A legősibbnek a kora 4.5 milliárd év s ez a híres ALHA 84001 meteorit. Fiatalabbak, de még mindig 1,3 milliárd évesek a nakhlitok és a velük rokon chassignitok. A földi bazaltokkal és peridotitokkal rokon shergottitok kora pedig 0,5-0,17 milliárd év közötti. E magmás eredetű kőzetek repedéseiben azonban mállási termékeket találunk. Ezek arra utalnak, hogy a Földön

megismert ciklus, ha hiányosan is, de a marsi kőzetek körében is megfigyelhető.

A bolygótestek felszínén a kémiai elemek körforgása az a keret, amelyben átfogóan szemléltethetjük a kémiai anyagok nagyléptékű cserekapcsolatait. Ebből a felszínre leszállt űrszonda csak részfolyamatokkal ismert meg bennünket. Mivel a leszállás során a légkörben található gázokat, a felszíni kőzetek anyagát és néhány átalakulási folyamatot is megfigyelhettek a kutatók, például a Marson.



Ezért az űrszondás eredményeken át érdemes áttekintenünk egyes kémiai folyamatokat is. Ha kémiai kísérletekkel szereljük föl már megépített kísérleti gyakorló űrszondánkat, a Hunveyor, ezzel szimulálhatunk néhány

marsi kémiai folyamatot. E kémiai típusú mérések Hunveyorra történő gigondolása során új megvilágításba kerülhet sok már ismert hagyományos kémiai mérés is.

Szemléletünk is megváltozhat, például az oldószeres világról, ha más égitestekre lépünk. Az ammónia például sok vízhez hasonló tulajdonsággal rendelkezik: poláros oldószer, jó oldószer egyes szénvegyületek számára. Igaz, a földfelszíni hőmérsékletnél csak hidegebb (-30 fokos) környezetben van folyadék halmazállapotban, de ezek a viszonyok éppen a megvalósult állapotok lehetnek egykor más bolygók. Talán ez az ammóniás világ egykor az aminosavak létrejöttét is segítette ezen az ismeretlen bolygótesten. Ha az oldószerhez viszonyítjuk a kémiai reakciók egy részét, sajátos koordináta-rendszerhez jutunk. Ilyen oldószer-koordináta-rendszer összehasonlítást is bemutatunk kis atlaszunkban.

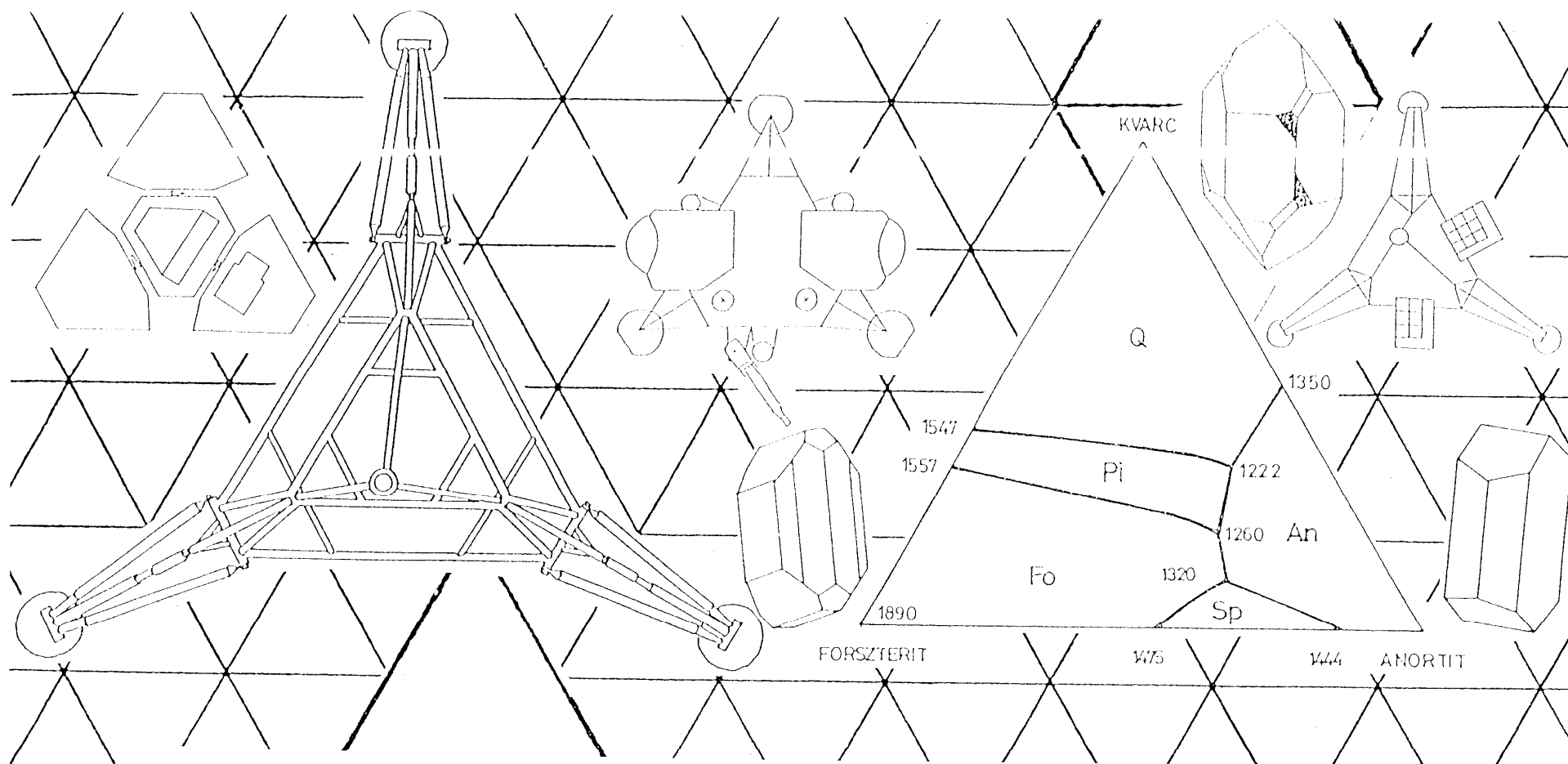
A szilárd bolygófelszínre leszállt Surveyor, Luna, Viking, Venera, Pathfinder és MER űrszondák fedélzeti kamerákkal sziklasivatagot találtak maguk körül. A szilárd, kristályos anyagok kémiája az egyik legfontosabb fejezete a korunkban zajló űrkutatási méréseknek. A földi kőzetek geokémiája jó alapot nyújt a négy eddig vizsgált égitest kőzeteinek összehasonlítására. Szinte újra fölfedezhetjük a már tanult folyamatok sajátosságait, ha egy másik bolygó atmoszférájában tanulmányozhatjuk például a mállási folyamatokat, a vízzel vagy a jéggel való kölcsönhatásból eredő reakciókat. A holdi kémiának érdekes szerep jutott. Ott a robotok után ember is járt és így már nemcsak a műszeres mérések, hanem a földre hozott mintákon végzett kísérletek oldaláról is összehasonlíthatuk a kőzeteket.

Az összehasonlító kémia is a XXI. század tudományága lesz, amely célt ad és izgalmas terepet a természettudományok e szép ágának újra földolgozására, ismételt áttekintésére, újszerű rendszerezésére. Jól tudjuk, hogy a természettudományok oktatásában ma "keresett cikk" az izgalmas célkitűzés, az érdekes terület bemutatása.

Ahogy eddig a bolygófelszíni mikrokörnyezeteket főleg geológiai és kőzettani szempontból modelleztük, úgy a kémiai viszonyok megismerése után a Hunveyor-Husar műszer együttes köré épített laboratóriumi terpesztali munkánkba már számos kémiai vonást is beépíthetünk.

Amikor kis atlasz sorozatunk 8. tagját útjára bocsátjuk, számíthatunk azokra az ásványbarátokra is akik a földi kémia szeretetében is a legvonzóbb lépéseket közvetíthetik akkor, amikor gyűjteményük szép darabjaival elvarázsolják az ásványtár látogatóit. Számukra földi és marsi analóg ásványok gyűjtésére való biztatással kívánhatunk jó munkát a bolygófelszín összehasonlító kémiájából epizódokat bemutató atlaszunkkal.

A szerzők



KIS ATLASZ SOROZAT A NAPRENSZERRŐL (8):
ŰRKUTATÁS ÉS KÉMIA

Bérczi Szaniszló, Homonnay Zoltán, Lukács Béla, Mörtl Mária, Weidinger Tamás

Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport, UNICONSTANT
 Budapest, Püspökladány, 2005

I. MAGMÁS KŐZETEK

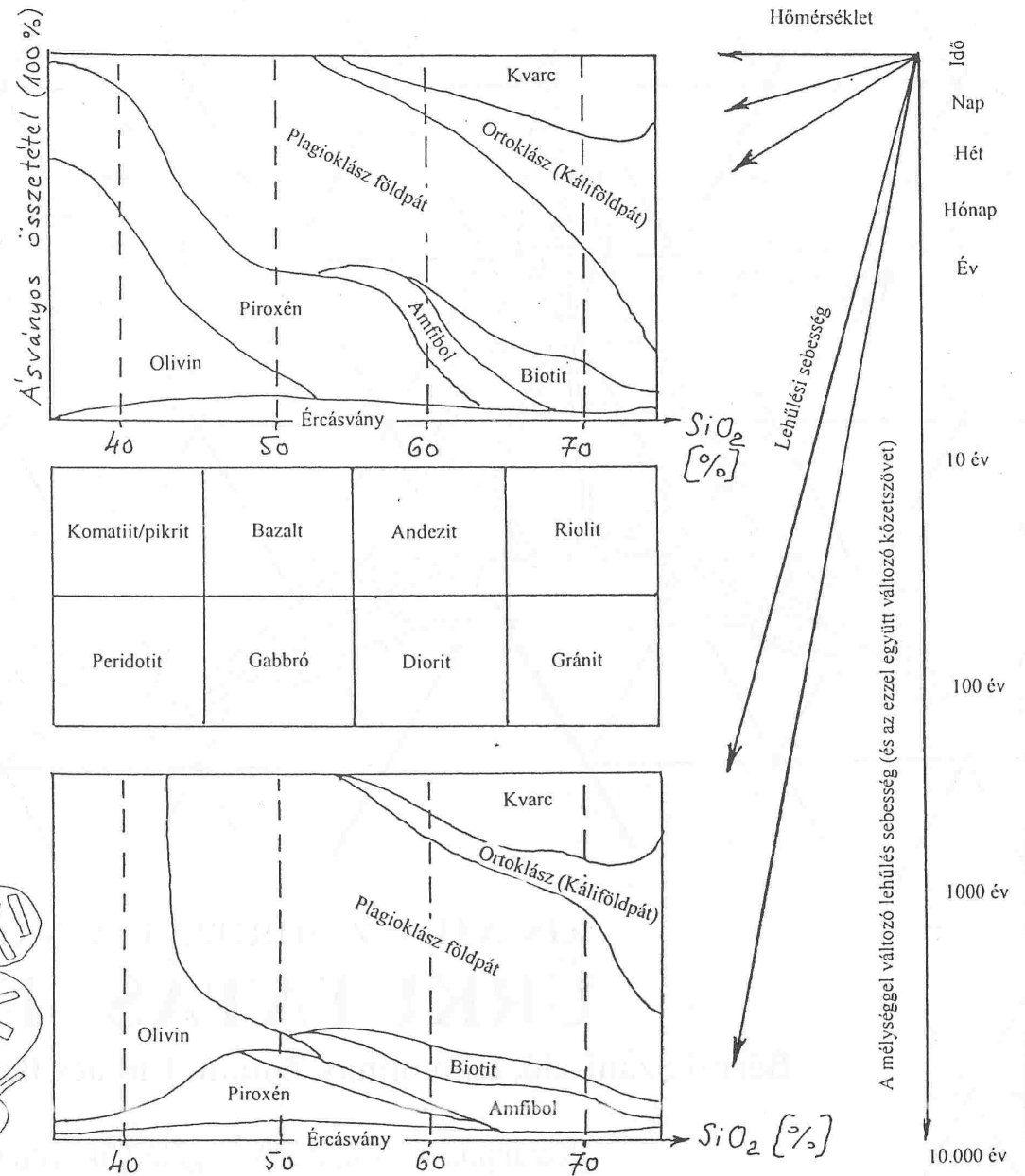
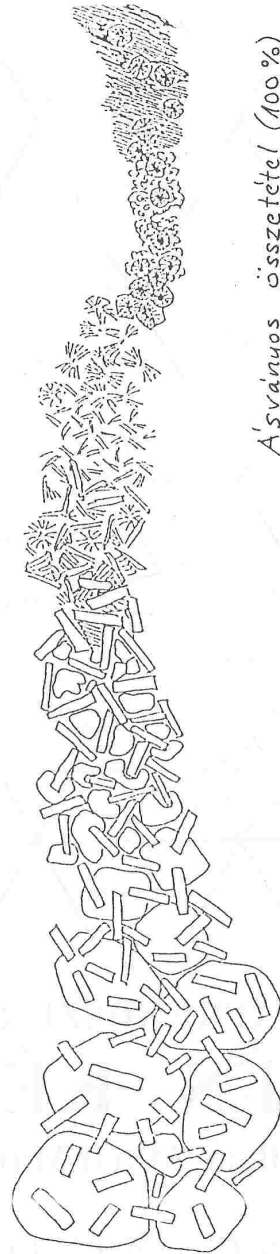
Planetáris kémiai vizsgálatainkat célszerű a szilárd felszínű égitestek felszínén és kérgében lejátszódó kémiai folyamatokkal kezdeni. Három fő közettípust különített el a köztettan ebben a tartományban: a magmás, az üledékes és a metamorf kőzeteket. Kis atlaszunkban először a magmás kőzetek világában lezajló kőzetkeletkezéssel, majd az így létrejött kőzetek mállása során bekövetkező néhány kémiai változással foglalkozunk.

1.1 Magmás kőzetek a Földön

A magmás kőzetek a Föld típusú, szilárd anyagú kőbolygótestek szilikátolvadékaiból keletkeznek. A Merkúr, a Vénusz, a Föld, a Hold és a Mars szilárd anyagának jelentős részét, e bolygótestek köpenyét és kérgét főleg ilyen szilikátos anyagok alkotják. A megszilárdult láva főleg Fe, Mg, Ca, Al, Na, K, Ti, Cr, Mn, szilikátokból, valamint számos oxid- és szulfidásványból épül föl. A magmás kőzetek rendszerét az elmúlt három évszázad során megalkották. E rendszernek a magját mutatjuk be, azzal a céllal, hogy benne elhelyezhessük a marsi magmás kőzeteket, melyek meteoriként érkeztek a Földre.

Az égitest felszínére ömlő láva jelentős része olvadt állapotban van, de benne már megkezdődött a kristályosodás. A magmás kristályosodás során létrejövő ásvány-együttes (ásványtársulás) a fő kőzetalkotó ásványokból a mellékelt ábra szerinti arányban tartalmaz színes és színtelen szilikátokat. A színes szilikátok az olivin, a piroxén, az amfiból és a csillámok, a színtelenek a plagioklász és a káli földpátok, a földpátpótlók és a kvarc. Bowen egy évszázaddal ezelőtti fontos megfigyelés volt az, hogy a magmás kristályosodás során a színes és a színtelen szilikátok gyakran együtt kristályosodnak, egymással párhuzamosan haladó folyamatként, de a sorokon belül meghatározott ásvány-sorrendet követve. Később, olvasztási kísérletei nyomán, a magmás kristályosodás során keletkező fázisok viszonyait anyagterképen foglalta össze: ez a híres Bowen diagram. A Bowen-diagram három fő ásványkomponens segítségével (olivin, plagioklász földpát és kvarc) le tudta vezetni a magmás kristályosodás fizikai-kémiai menetét. Ilyen anyagterképeket a Holdkőzetek, meteoritek c. atlaszunkban részletesebben is bemutatunk.

A 21. század elejére a magmás köztettan az interplanetáris mérési eredmények alapján a planetológia részét is képező tudományággá vált. Egyrészt azért, mert a legtöbb Föld típusú

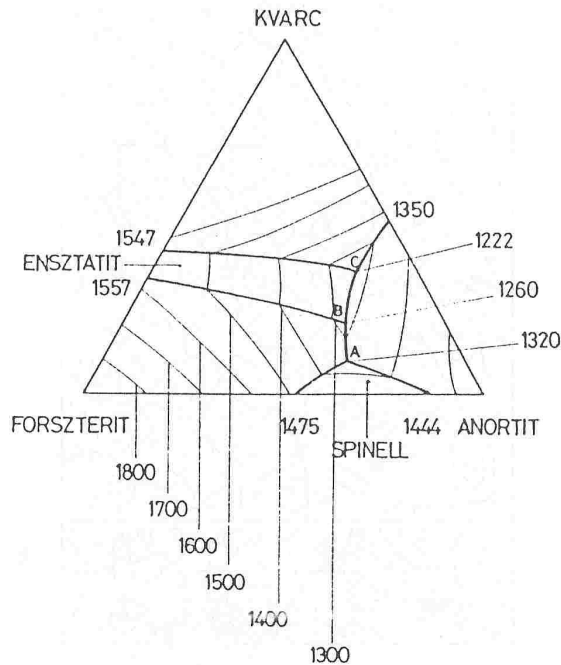


1.1. ábra. A magmás „köztetnyolcas” táblázat fölött a kiömlési, alatt a mélységi magmás kőzetek ásványos összetételének változását mutatjuk be az SiO_2 tartalom függvényében. Jobbra, a TTT típusú diagramon, a vulkáni és a plutóni kőzetek lehülési sebégeit ábrázoltuk.

bolygótest felszínén az űrszondák kimutatták a bazaltot és más magmás kőzetek jelenlétét. Másrészt azért, mert a geokémia kutatói fölsímték, hogy a bazaltok „háttérben” egy kondritos, tehát peridotitos összetételű köpeny áll, melynek parciális olvadékai a bazaltok. Ezért a magmás kőzetek olyan differenciálódási sorozatokba rendezhetők, melyek egyik pólusán a peridotitos köpeny anyagai, a másik oldalán pedig a belőle leszármaztatható különféle magmás kőzetek állnak. E sokszínű folyamatcsoportra példaként mutatunk be olyan eseteket, amelyeket a marsi meteoritek szolgáltattak.

1.2 Magmás kőzetek a Marson

Csaknem 30 esztendeje annak, hogy az első, kémiai kísérletekkel igazán gazdagon felszerelt űrszondák, a Viking leszálló egységek, simán leereszkedtek a Mars felszínére. E páros marsi expedíció eredményei közül már mi is találkoztunk a 3 biológiai kísérlet leírásával a Bolygófelszíni mikrokozmoszok atlaszában. A Mars magmás kőzeteinek megismerésében azonban egy egészen különleges, közvetett



1.2. ábra. Az olivin-kvarc-anortit hármasszögletű fázisdiagramja, a nevezetes Bowen diagram.

1.1. Táblázat. A 15 legkorábbi marsi meteorit adatai. Ma már több, mint 30 marsi meteorit ismert, több közülük egyetlen hullásból való. Hat kőzettípusba sorolhatók: dunit, lherzolit, ortopiroxenit, klinopiroxenit, olivin-porfiroz bazalt, bazalt.

Meteorit neve	A megtalálás helye	A megtalálás ideje	Tömeg (g)	Típus
Chassigny	Franciaország, Haute-Marne, Chassigny falunál	1815, október 3.	~4,000	dunit (chassignit)
Shergotty	India, Bihar Állam, Shergahti városánál	1865, augusztus 25	~5,000	bazaltos shergottit
Nakhla	Egyiptom, El-Nakhla falunál	1911, június 28	~10,000	klinopiroxenit (nakhlit)
Lafayette	Egyesült Államok, Indiana, Lafayette	1931 évben	~800	klinopiroxenit (nakhlit)
Governador Valadares	Brazília, Minas Gerais, Governador Valadares	1958 évben	158	klinopiroxenit (nakhlit)
Zagami	Nigéria, Katsina Tartomány, Zagami Rock falu	1962, október 3	~18,000	bazaltos shergottit
ALHA 77005	Antarktisz, Victoria Föld, Allan Hills	1977, december 29	482	peridotit (lherzolitos shergottit)
Yamato 793605	Antarktisz, Victoria Föld, Yamato-hegység	1979 évben	16	peridotit (lherzolitos shergottit)
EETA 79001	Antarktisz, Victoria Föld, Elephant Moraine	1980, január 13	7,900	olivin-porfiroz shergottit
ALH 84001	Antarktisz, Victoria Föld, Allan Hills	1984, december 27	1,939.9	rombopiroxenit
LEW 88516	Antarktisz, Victoria Föld, Lewis Cliff	1988, december 22	13.2	peridotit (lherzolitos shergottit)
QUE 94201	Antarktisz, Victoria Föld, Q. Alexandra Range	1994, december 16	12.0	bazaltos shergottit
Yamato 000593	Antarktisz, Victoria Föld, Yamato-hegység	2000, november 29	13,700	klinopiroxenit (nakhlit)
Yamato 000749 (802)	Antarktisz, Victoria Föld, Yamato-hegység	2000, december 3	1,300	klinopiroxenit (nakhlit)
Dar al Gani 476, 489, 735, 670, 876, 975	Libia, Szahara sivatag	1997-1999 években	Ca: 5,500	olivin-porfiroz shergottit

szerepe volt a Viking méréseknek. A leereszkedés során ugyanis megmérték a marsi légkör összetételét és ezt az adatsort néhány év múlva a Földre már eljutott marsi kőzetek azonosítására használták föl.

A meteoritek között az 1960-as évekig fölsímték egy olyan csoportot, amely a magmás szövetű akondritok közül közös kémiai vonásokkal válik ki. Oxidáltabbak a többi akondritnál, nagy az illóelem tartalmuk, jelentős az alkália tartalom a földpátokban, sok a Ca a piroxénokban. Ezt a csoportot három fontos tagjáról, a Shergotty, a Nakhla és a Chassigny meteoritekről SNC csoportnak nevezték el. A nakhla-ról 1974-ben két fizikus, Papanastassiou és Wasserburg Rb-Sr radioaktív kormeghatározási módszerrel kimutatta, hogy nagyon fiatal, 1,3 milliárd éves, szemben a meteoritek többségének 4,5 milliárd éves korával. Ilyen fiatalkori vulkanizmus csak nagyobb méretű bolygótesten játszódhatott le. Később a shergottitokat még fiatalabbnak, már csak 170 millió évesnek mérték (ez a földi rétegtanban a Jura kora).

A Viking légkörmérések nyomán Bogard és Johnson (1974) a megtört SNC mintákból fölszabaduló nemesgázok (Ar, Kr, Xe) izotóparányai alapján valószínűsítette az SNC meteoritek marsi eredetét. Később a becsapódással való kiszakítás mechanizmusát is modellezték. A gyűjtemények 6 féle SNC meteoritje mellé még 6-ot találtak 1995-ig az Antarktiszon. Ma már csaknem 40 SNC meteorit ismerünk, mert időközben, az Antarktisz után a forró sivatagokban is fedeztek föl újabb marsi meteoriteket. A marsi meteoritek táblázatának csak az első harmadát mutatjuk be tájékoztatásul.

1.3 Az SNC meteoritek kőzettípusai

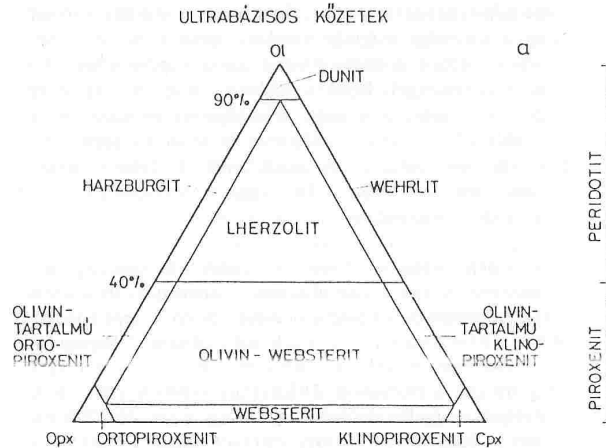
Az SNC meteoritek magmás kőzetek. A magmás kőzetek az égitest (Föld, Mars) belső folyamatai során jönnek létre. A földi magmás kőzetek rendszerét először az ásványos összetétel, a kemizmus (pl. SiO_2 tartalom) és a szövet szemcsemérete alapján tagolták típusokba. A legismertebb elrendezésben a kiömlési (vulkáni) kőzetek a táblázat felső sorában, ezen kőzetek mélységi magmás (plutóni) típusai a táblázat alsó sorában, növekvő SiO_2 tartalom alapján szerepelnek. A felső sor e táblázatban a vulkáni komatiit/pikrit, bazalt, andezit, riolit sorozat, az alatta lévő sor pedig a mélységi magmás peridotit, gabbró, diorit, gránit sorozat (1. ábra.). A szemcseméret szoros kapcsolatban áll a lehülési sebességgel. Ezért a táblázat mellé, a függőleges tengely irányában, a lehülési sebességet is bemutató és a finomabb kőzetszöveti osztályozást is lehetővé tevő TTT diagramot illesztettünk. (A holdkőzetek lehülési sebesség szerinti ilyen diagramját a Holdkőzetek, meteoritek c. kis atlaszunkban mutattuk be.)

A marsi meteoritek ebben a magmás kőzet-osztályozási rendszerben a bázisos-ultrabázisos tartományba esnek. A marsi meteoriteket 6 típusba sorolják. Ortopiroxenit (ALHA 84001), Klinopiroxenit (a nakhlitok), Dunit (chassignit), Bazaltos-shergottit (pl. a Shergotty maga is), Pikrites-shergottit (pl. a Northwest Africa 1068 – NWA 1068) és a Lherzolitos, vagy Peridotitos-shergottit (pl. az ALHA 77005). A három leggyakoribb marsi meteorit típus a nakhlit, a bazaltos-shergottit és a lherzolitos shergottit.

1.4 A shergottitok

A bazaltos-shergottitok szürke színű magmás kőzetek, melyek monoklin piroxénekből (pigeonit, augit) plagioklász földpátból (amely azonban ütés hatására átalakult maskelynitté) és járulékos ásványokból áll. A peridotitos-(lherzolitos)-shergottit a földi lherzolitokra-harzburgitokra hasonlít. Szövetében nagy rombos-piroxén szemcsékbe vannak beágyazva az olivin és krómit kristálykák. Csak kevés földpátüveg (maskelynit) található bennük. A peridotit a Földön – és a Marson is - a köpeny anyaga, melyből parciális olvadások nyomán bazaltos, pikrites olvadékok ömlenek a felszínre vagy jutnak felszín közelbe és ott kikristályosodnak. A shergottitok egyes típusai ebbe a folyamatba illő kőzettípusok. Az olivin-porfíros shergottitok nagyméretű olivin kristályokból állnak, amelyek be vannak ágyazva a finomszemcsés bazaltos alapszövetbe.

Éppen a MER robotok fölismérése az, hogy egyes típusok a marsi felszínen kőzettömbökben is megtalálhatók. Például McSween a Spirit útja során megfigyelt és mért olivinben dús marsi bazaltokat az olivin-porfíros shergottitokkal rokon kőzetnek találta annak alapján, hogy a Pancam, a miniTES és a Mössbauer spektrométer adatok igazolták, hogy az olivin gyakori ásványa több marsfelszíni kőzetnek (Humphrey, Adirondack, Mazatzal). A Guszev-kráterben mért bazaltokban az olivin összetételének Fe/Mg aránya is hasonló volt az olivin-porfíros shergottitokéval. Ezek a sötét, aprószemcsés Guszev-bazaltok mintegy 25 %-ban tartalmaznak olivin fenokristályokat és mivel a színképük hasonló a déli terra peremén található kőzetekéhez, ezért azt is föltételezik, hogy

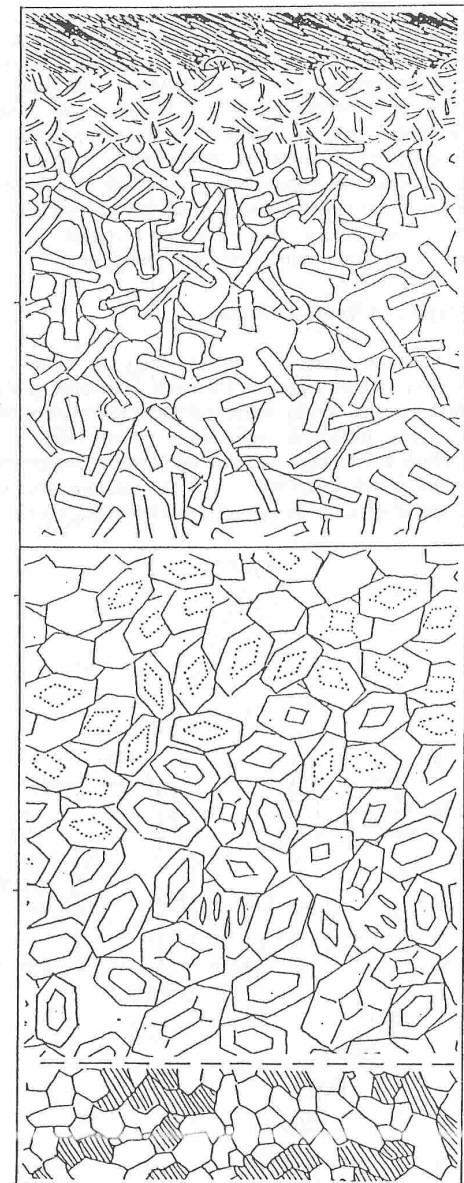


1.3. ábra. Az ultrabázisos és a bázisos kőzetek definíciója három fő ásványkomponenssel, kompozíciós diagramon.

főként ez a bazalt - az olivin-porfíros shergottit - alkotja a noachisi ősi terrákat. (Noachis, Hesperida, Amazonis a három marsi rétegtani emelet. Lásd: Bolygótestek atlasza, 2001.) Más kutatók (pl. Irving) a Tharsis vulkánokat tartják az olivin-porfíros bazalt forráshelyének.

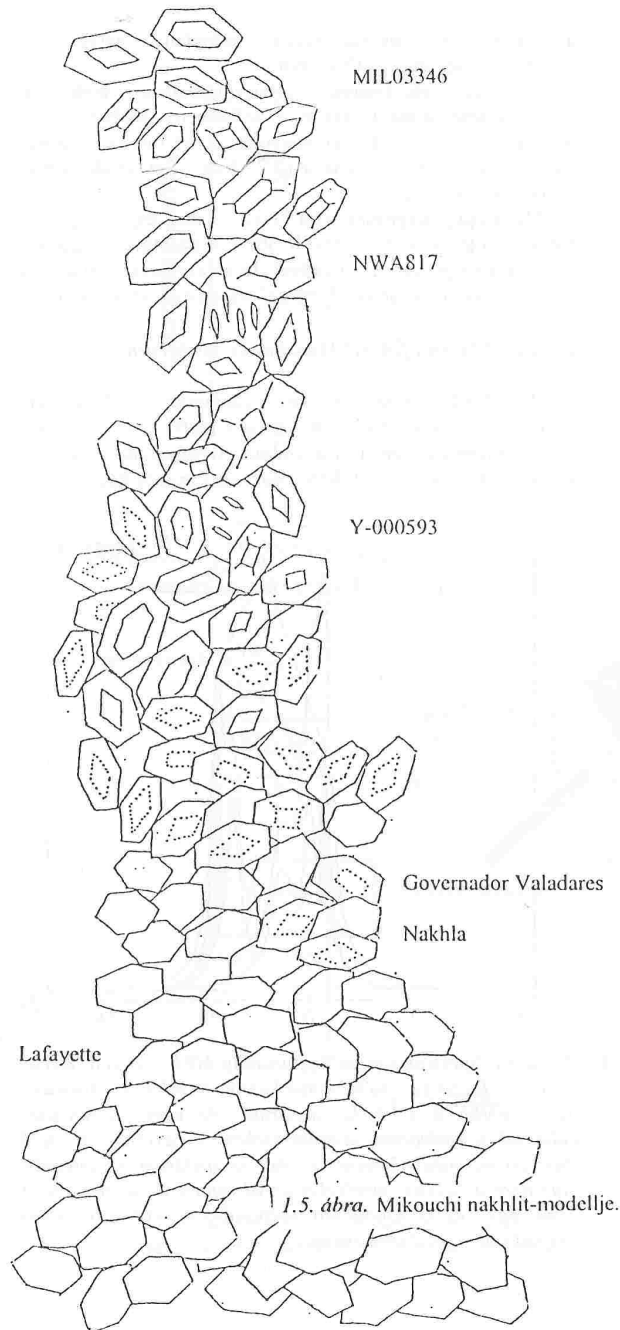
A shergottitok geokémiai osztályozására Warren és Bridges javasolt egy kéreg-asszimilációs modellt. Ez földi köpeny-zárványok mintájára a shergottitokat a marsi köpenyből származtatja. A marsi bazaltos parciális olvadékok – a földi párhuzamos eseményeknek megfelelően – amikor eltávoztak a köpenybéli forráshelyről kiürítették azt és elszegényítették bizonyos geokémiai összetevőkben. Ennek alapján Warren és Bridges bevezet háromféle shergottitot: erősen (E), közepesen (K) és gyengén (Gy) kiüresedett shergottitokat. Az E-shergottitok közé tartozik pl. a QUE94201, a K-shergottitok közé tartozik pl. ALHA77005, a Gy-shergottitok közé tartozik a Shergotti és a Zagami. (A Gy-shergottitok azonban leszármaztathatók az E-shergottitokból úgy is, hogy a fölfelé tartó láva a kéregben nagy ritka-földfém tartalmú kéreg-összetevő komponenssel asszimilált, olvasztott magába.

A magma parciális kiolvadása, majd az útja és lehűlése során bekövetkező differenciálódási folyamatát jól tükrözi a létrejött kőzetnek és a benne lévő ásványoknak a ritka földfém (RFF) tartalma. Ilyen módszerrel ismerték föl a földi kőzetekben is a peridotitos köpenyből a bazaltot leszármaztató parciális olvadási folyamatokat. A parciális olvadás során ugyanis a RFF tartalom a korai kiolvadó fázisban halmozódik föl.



1.4. ábra. A Theo-láva oszlop rétegződési képe.

Breccsa
Gabbro
Klinopiroxenit
Peridotit



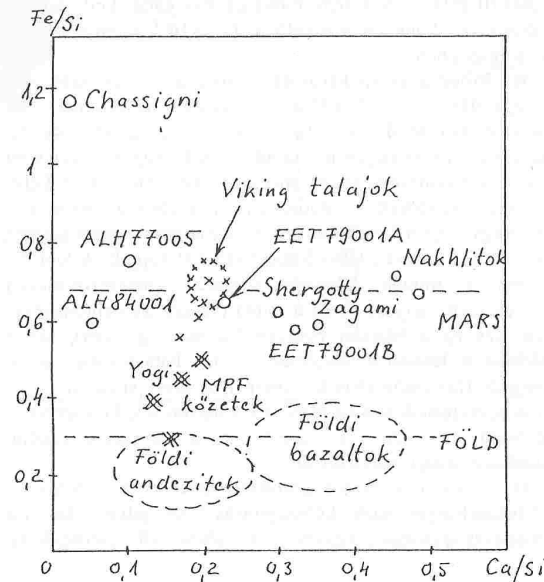
1.5 A nakhlitok

A nakhlitok főleg monoklin piroxénből álló kumulátos kőzetek. Kisebb részben olivin és más ásványok is előfordulnak benne. A nakhlitok nagyméretű magmatesten belüli kristályosodás során jöttek létre. A már létrejött piroxén ásványok, a magmatestnél nagyobb sűrűségük miatt, lassan ülepedtek és a magmatest alá süllyedtek, ahol egymáson megtámaszkodtak. Az így létrejött kőzetszövet a kumulátos szövet. Összetételében is és a nakhlitok szövetét tekintve is nagyon hasonlít a nakhlitokra a földi Theo-láva Kanadában (Treiman és munkatársai, 1996). A magmás kristályosodási és szétválási folyamatok során a Theo-lávatest 120 méter vastag összetételben három nagy kőzettípus réteg különült el. Ezek szövege is különbözik. Felülről lefelé haladva, egy felső 20 méteres breccsás fedő alatt a következő rétegek helyezkednek el a Theo-lávatestben (2. ábra): gabbró, mintegy 35 méteres vastagságban, alatta mintegy 50 méteres vastagságban piroxenit és legalul peridotit mintegy 10-12 méteres vastagságú rétegben (Friedman Lentz és munkatársai, 1998).

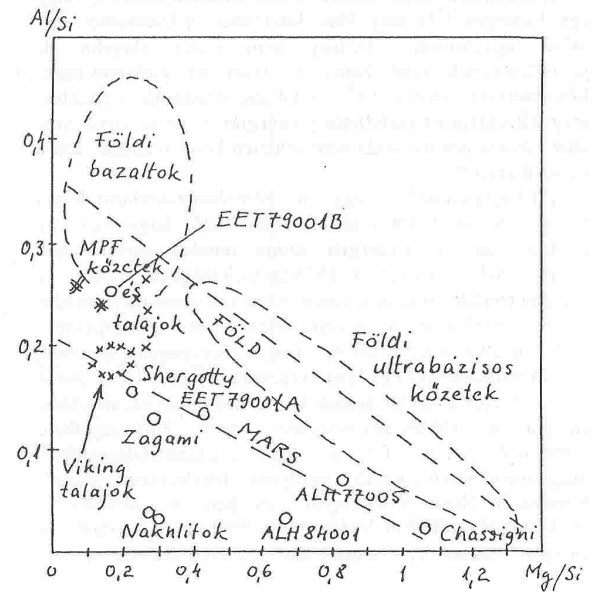
1.6 A Mikouchi modell a nakhlitok kialakulásáról

A Theo-lávatest ismeretében, több nakhlit minta összehasonlító vizsgálatával Mikouchi japán kutató modellt alkotott arról a geológiai környezetről, ahonnan a nakhlitok

számozhatnak. A nakhlitok szövetében a kumulátos szövetet alkotó, sajátalakú piroxének között olivin kristályok, valamint a kőzetolvadékból kristályosodott földpát található. Mikouchi annak alapján, hogy az olvadék alá süllyedő ásványok között kevesebb a maradék kőzetolvadék, míg az olvadékoszlop felsőbb részein lazábban helyezkednek el a támaszkodó piroxének, mélységi sorba tudta rendezni a nakhlitokat. Egy nakhlitos lávaoszlop magassági „emeletei” szerinti sorozatban az oszlop tetején helyezhető el a jelenleg (2005-ben) legújabb nakhlit, a MIL03346. Lefelé haladva az NWA817 következik, még lejjebb a Yamato-000593, majd a Governador Valadares és a Nakhla helyezkedik el. A hűlő lávaoszlop legmélyebb pontjáról származhat a Lafayette, mert ebben illeszkednek legtömörebben a kumulátos piroxének (Mikouchi és munkatársai, 2003). A felsorolt 6 nakhlitot úgy is szemléltethetjük tehát, mint amelyek egy 30 méteres vastagságú lávaoszlopba mélyített fúrású magnak egyes szakaszait képviselik. E sorbarendezhetőség megerősíti azt a feltételezést, hogy egyetlen becsapódási esemény szakíthatta ki marsi forráshelyükről a nakhlitokat. Harvey és társai ezt a forráshelyet a Syrtis Majorban feltételezik a TES és THEMIS színképvizsgálatok alapján. A színképi vizsgálatok alapján sokkal változatosabb a marsi felszín magmás kőzeteinek köre, mint amire a kutatók a marsi meteoritek alapján számítottak (Christensen). Az utolsó ábrán kémiai összehasonlítást is bemutatunk az a földi és a marsi magmás kőzetek között.



1.6. ábra. A nevezetesebb marsi meteoritek és néhány földi kőzet elhelyezkedése az Fe/Si -- Ca/Si illetve az Al/Si -- Mg/Si elemarány-térképen.



II. A MÖSSBAUER-SPEKTROSKÓPIA A MARSÍ KÖZETEK KUTATÁSÁBAN

Egy új anyagvizsgálati módszert minden kis atlaszban bemutatunk. Először 3 rövid kérdéssel a módszer lényegét emeljük ki:

2.1 Mire jó a Mössbauer-spektroszkópia?

Pl. adott elemet tartalmazó anyagok fázisanálízisére.

2.2 Miért éppen a Mars-kutatásban?

Mert a Mössbauer-spektroszkópiái célra alkalmas elemek közül a legeredményesebben használható a vas, és közismert, hogy a Mars vörös színét nagy valószínűséggel vasvegyületek okozzák.

2.3 Hogyan működik?

Röviden: a gammasugárzás atommagok által történő specifikus abszorpcióján keresztül.

Érdekes megfigyelés, hogy az általában nagy energiájú gammasugárzás energiatartékosságának valószínűtlenül kicsi. Például az ^{57}Fe -mag $1,44 \times 10^4$ eV-os sugárzása esetén ez az érték $4,6 \times 10^{-9}$ eV (!). Ez azt jelenti, hogy igen jelentéktelennek tűnő hatások is azt eredményezhetik, hogy egy bizonyos ^{57}Fe -mag által kibocsátott γ -kvantumot egy másik ugyanolyan ^{57}Fe -mag nem képes elnyelni. E jelentéktelennek tűnő hatás pl. lehet az elektron-magkölcsönhatás, amely 10^{-9} eV-tal összemérhető mértékben megváltoztatja az észlelhető γ -energiát, s így az egyik mag által kibocsátott sugárzás nem feltétlenül kerül rezonanciába a másik maggal*.

(*Megjegyzendő, hogy a Mössbauer-spektroszkópia korlátozott alkalmazása annak köszönhető, hogy van egy effektus, ami a γ -energiát szinte minden esetben sok nagyságrenddel eltolja a félérték-szélességhez képest, és hasonló mértékben ki is szélesíti: ez az impulzus-megmaradás törvénye értelmében a fotonemissziókor vagy -abszorpciókor elkerülhetetlen visszalökődési energia. Szerencsére azonban, ha a Mössbauer-mag egy kristályrácsban helyezkedik el, akkor a rácsrezgések kvantáltóságának köszönhetően a visszalökődési energia a félérték-szélességhez képest elhanyagolható mértékűvé váhat. Ez az ún. „visszalökődésmentes” magrezonancia-abszorpció, amelynek feledezéséért Rudolf Mössbauer Nobel-díjat kapott 1961-ben. A „Mössbauer-effektus” gyakorlatban legfontosabb feltétele az alacsony γ -energia, ráadásul olyan szintek közötti magátmenethez tartozó,

amiből az egyik a mag alapállapota. Ilyen eset nem túl sok van, kifejezett szerencse, hogy vas esetén a legkedvezőbbek a feltételek.)

A fentiek egyben azt jelentik, hogy minden különböző kémiai környezetben lévő (tehát más elektronsűrűséget érző) ^{57}Fe -magnak más lehet a „ γ -energiája” - legalábbis egy kb. 10^{-10} eV finomságú skálán. Ezt a hatást nyilván nagyon jó lenne tudni megmérni, de ki hallott már ilyen precíz mérésről?

A megoldás: használjuk ki magát az érzékeny magrezonanciát! Vegyünk egy referencia sugárforrást (értsd: ^{57}Fe valamely stabil kémiai környezetben), majd változtassuk az általa kibocsátott γ -sugárzás energiáját kontrollált módon, és regisztráljuk, hogy mely energiaváltoztatás hatására nyeli el ezt a γ -sugárzást az általunk analizálni kívánt anyag! Ha ilyen módon végigpásztázunk a megfelelő energiaskálán, akkor egy jellegzetes abszorpciós karakterisztikát kapunk, ami az analizált anyag egyfajta Mössbauer-ujjlenyomata (spektruma).

2.4 Hogyan változtatható a kibocsátott γ -sugárzás energiája?

Meglepően egyszerűen: a Doppler-elv felhasználásával, a sugárforrás mozgásával. Könnyen belátható, hogy pl. a félérték-szélességnek megfelelő $4,6 \times 10^{-9}$ eV-os energiaperturbációhoz az ^{57}Fe sugárzása esetén $v = (4,6 \times 10^{-9} / 1,44 \times 10^4) * 3 \times 10^{11} = 0,096$ mm/s-os mozgás kell, ami a gyakorlatban könnyen biztosítható (a 3×10^{11} a fénysebesség mm/s egységben)..

A Mössbauer-spektrométer mozgatója periodikusan végigpásztáz egy beállított sebesség-intervallumot, és másodpercenként akár több tízszer felvesz egy spektrumot. Az analizátor memóriájában minden sebességhez (kicsiny sebességintervallumhoz) egy memóriarekesz tartozik. A kellő intenzitás (kiértékelhető statisztika) eléréséhez a mérést sok órán vagy napon keresztül kell folyamatosan végezni, azért hogy pl. a 2.1. ábrán látható spektrumokat kapjuk. A legtöbb esetben a mintán áthaladó sugárzás (magrezonancia-) abszorpcióját mérjük, de ha a minta elkészítése nehézségeket okoz, (és ez a Marson egészen biztosan így van), akkor reflexiós a technikát alkalmazzák. Ez hatásfokában jóval gyengébb (hosszabb ideig kell mérni), de azért járható út.

A spektrumok alakját alapvetően háromféle kölcsönhatás határozza meg. Az ^{57}Fe esetén ez a következő módon mutatkozik meg a spektrumban.

Ha pusztán a magot gömbszimmetrikusan körülvevő elektronfelhővel való kölcsönhatás van jelen, akkor a Mössbauer-spektrum egyetlen vonalból áll (szingulett),

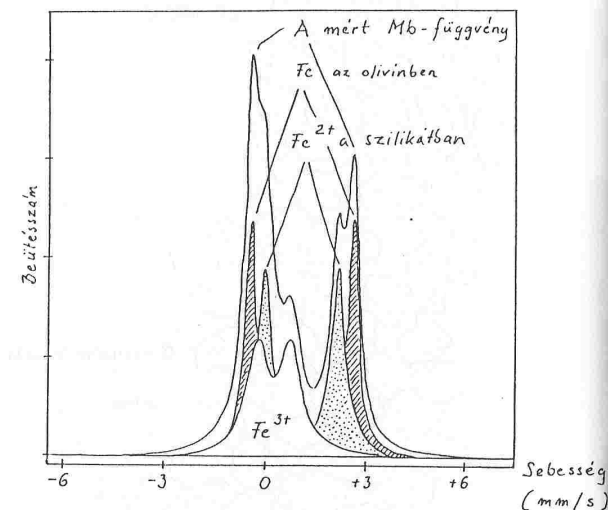
amelynek a sebességskálán elfoglalt helye az elektronsűrűségtől függ (2.1. ábra).

Ha az elektronok sűrűségeloszlása eltér a gömbszimmetrikustól, akkor a Mössbauer spektrum egy dublettre hasad fel. Minél nagyobb az aszimmetria, annál nagyobb a vonalak távolsága (2.2. ábra). Ezt kvadrupólus-felhasadásnak hívják.

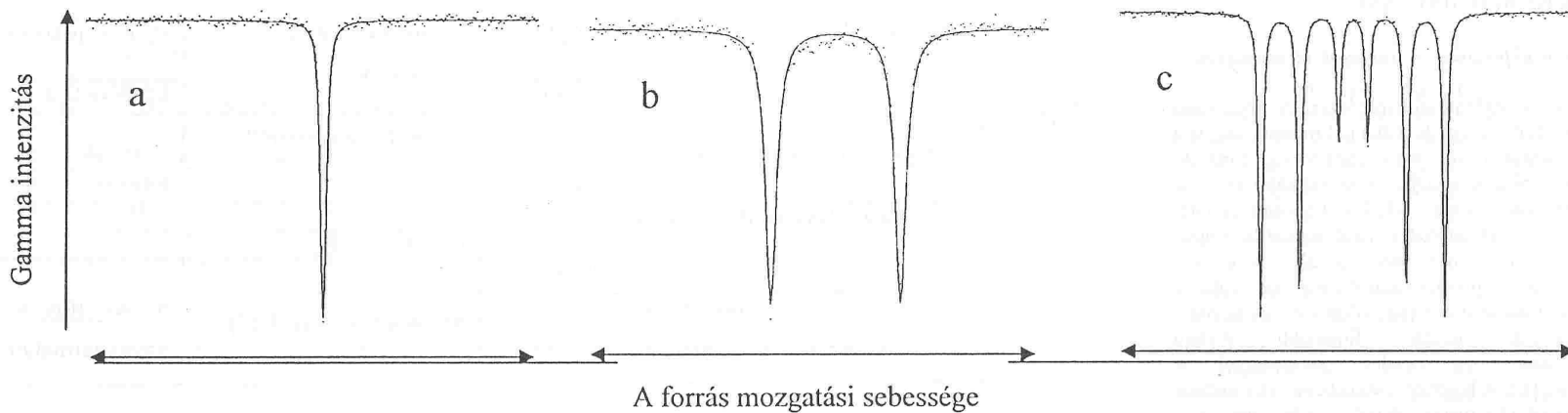
Ha a mag mágneses teret "érez", akkor egy jellegzetes hatvonalas struktúra tűnik fel (1c ábra). A szextett felhasadása arányos a mágneses tér értékével. Ilyen szerkezetű például a magnetit ásványokban elhelyezkedő vasatomok spektruma.

2.5 Egy Marson főlvet Mössbauer-spektrum

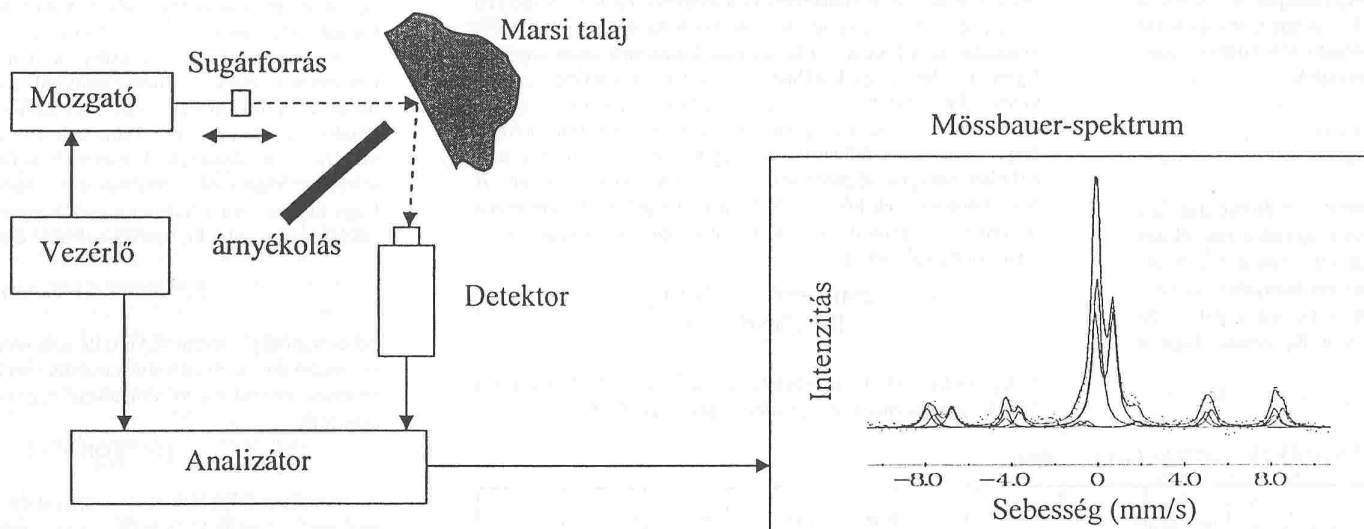
A MER űrjárműveken elhelyezett Mössbauer-spektroszkóp gyakran végzett mérést a marsi kőzeteken azok vasvegyületeinek meghatározásához. Bemutatunk egyet az Opportunity által készített Mössbauer spektrumok közül.



2.3 ábra. Spektrumkép az Opportunity MER robotról, melyet az Eagle kráter peremén kibúvó kőzeteken mért. A folyamatos külső görbe a mért Mb-spektrum. Az egyes ásványokra jellemző vasállapotok alapján lehet az ásványi anyagok összetételét meghatározni. Azokat a spektrum összetevőket láthatjuk az ábrán, amelyeket az olivinben ill. a piroxénben lévő Fe^{2+} és a szulfátban szereplő Fe^{3+} atomok adnak járulékként a mért spektrumhoz.



2.1. ábra. Egyszerű ^{57}Fe -Mössbauer-spektrumalakok. a: atommag gömb-szimmetrikus elektronsűrűség-eloszlású környezetben; b: atommag nem gömb-szimmetrikus elektronsűrűség-eloszlású környezetben; c: atommag gömb-szimmetrikus elektronsűrűség-eloszlású környezetben és mágneses térben.



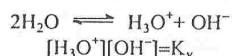
2.2. ábra. Egy reflexiós módban működtetett Mössbauer-spektrométer elvi vázlata. (Mivel a detektor a mintában visszalökődés-mentesen abszorbeált majd re-emittált gamma fotonokat észleli, a spektrumban pozitív emissziós csúcsok jelennek meg a szokásos negatív abszorpciós vonalak helyett.)

III. A KÖZETEK KÉMIAI MÁLLÁSA

3.1 A pH szerepe a kemiában: oldódások és mállások

A Földön a víz a legfontosabb oldószer. A környezeti kémiai vizsgálatok között az egyik első a pH mérése, vagyis a kémhatás meghatározása. Ez egyszerű esetben úgy történik, hogy indikátorpapírt mártunk a vízbe, és az indikátor színe az oldatban lévő oxónium ionok (H_3O^+) koncentrációjától függően alakul. A papírt különböző indikátorokkal bevonják, ezek színe protonált, ill. protonvesztett formában más, és a protonálódás is különböző pH-nál valósul meg. Az indikátor színét a mellékelt színskálával összehasonlítjuk és így az oldat pH-ját megbecsüljük. Ezután finomabb skálájú indikátorpapírral akár egy tizedes pontossággal is meghatározhatjuk a pH-t. A laboratóriumba bevitt vízmintánál üvegelektóddal végzik el a mérést. A módszer lényege, hogy az üveg felületén lévő ionok az oldatban lévő oxónium ion koncentrációtól függően kicserélődnek, egyensúly alakul ki. Az egyensúly egy potenciálkülönbséget alakít ki, aminek nagysága a pH-val arányos. Ílymódon általában két tizedes pontossággal mérhető a pH.

A pH mérését víz jelenlétében végezhetjük el. A víz a protonok átadásának közege, másrészt az alapegyensúly a víz autoprotolízise és az ebből eredő oxónium ion koncentrációt változtatják meg a savas, ill. bázikus anyagok.



Ennek az állandónak (K_v , vízion-szorzat) az értéke 10^{-14} , s mivel az oxónium és a hidroxid ionok egyenlő mértékben keletkeznek, ezért ezek koncentrációja $10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. A pH definíció szerint az oxónium ion koncentrációjának negatív logaritmus ($-\lg[H_3O^+]$), vagyis a tiszta vízben a pH 7. Ez viszont csak 25 °C-on igaz, ugyanis a K_v értéke függ a hőmérséklettől (1. Táblázat).

3.1. Táblázat. A vízion-szorzat és a semleges pH a hőmérséklet függvényében

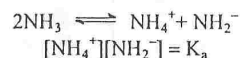
t (°C)	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60
pK _v (= -lgK _v)	14,9435	14,7338	14,5346	14,3463	14,1669	13,9965	13,8330	13,6801	13,5348	13,3960	13,2617	13,1369	13,0171
Semleges pH	7,4718	7,3669	7,2673	7,1732	7,0835	6,9983	6,9165	6,8401	6,7674	6,6980	6,6309	6,5685	6,5086

3.2. Táblázat. Különböző pH-jú vizek és eredetük.

Keletkezési körülmények	pH	Hidroxidok kiválása	Ilyen pH-jú környezet
	11	magnézium	bázikus talaj
	10		
A tengervízben lévő H_2CO_3 oldja a $CaCO_3$ mészvázakat és így $Ca(HCO_3)_2$ keletkezik	9 8	kétértékű mangán (Mn^{2+})	tengervíz
	7	cink	folyóvíz
A levegőből CO_2 -t old be és ezért H_2CO_3 keletkezik	6 5	réz kétértékű vas (Fe^{2+})	esővíz
	4	alumínium	láp
Rio Tinto: pirites rétegből kén- és vasbaktériumoktól	3 2	háromértékű vas (Fe^{3+})	bányavíz (Rio Tinto)
	1		savas termásvíz

3.2 Hogyan beszélhetünk pH-ról vízmentes közegben?

Ha vizes közegben akarunk vizsgálni, akkor az egyik lehetőség, hogy vizünk. Szerencsére a modern vizsgálati módszerek kis mennyiségű mintákkal dolgoznak. A másik lehetőség az, hogy hidrogénből és oxigénből a tett színhelyen állítjuk elő. Arra is gondolhatunk, hogy ha nincs víz, akkor a kémhatás sem fontos, a pH-ról való beszédnek sincs értelme. Egyrészt lehet, hogy korábban volt víz azon a bolygón, s így vizes folyamatok is végbemehettek, másrészt egyéb oldószerek is szóba jöhetnek, amiben nedves kémiai folyamatok lejátszódhatnak. Az egyik ilyen az ammónia, ami a külső bolygók légkörében van jelentős mennyiségben. A földi körülmények között -30 °C alatt folyadék. Az ammónia is képes autoprotolízisre és a protonátadási folyamatok is lejátszódhatnak benne.



A K_a értéke -33 °C-on körülbelül $10^{-32} \text{ mol}^2 \cdot \text{dm}^{-6}$, vagyis a folyékony ammóniában a semleges pH(analóg) 16.

3.3 Miért olyan fontos a kémhatás mérése az égitest felszíni környezetek vizsgálatában?

A kémhatás alapján következtetni tudunk arra, hogy a vizsgált víz vagy talaj milyen eredetű és ez meghatározza azt is, hogy egyes anyagok milyen koncentrációban, ill. milyen formában lehetnek jelen.(3.2. Táblázat)

Az egyik ilyen egyensúly a fémionok oldódása. A természetes vizek a környezetükből sokfajta sót magukba oldanak, és amikor egy folyó eléri a tengert, egy egészen más kémhatású közegbe ér. Tekintsük pl. a vas(II)-ionokat. A vas(II)-ionok oldódásának mértékét befolyásolja a többi ion jelenléte. Most csak a kémhatás szempontjából nézzük meg, hogy hogyan. Ha a hidroxidionok koncentrációja nagy, akkor szilárd anyag válik ki, vas(II)-hidroxid csapadék keletkezik.



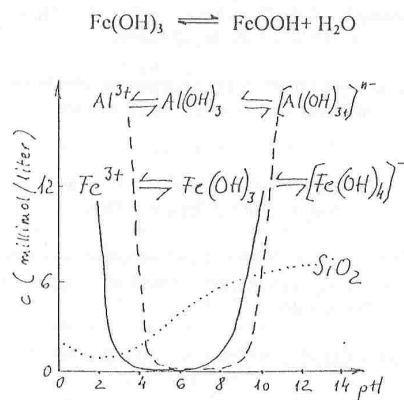
Az oldhatósági szorzat (L) értéke adja meg azt a határt, amikor ez bekövetkezik. Ha a koncentrációk megfelelő hatványon vett szorzata meghaladja az oldhatósági szorzatot, akkor kiválik a csapadék.



A semleges folyóvízben a hidroxidion koncentrációja $10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$, amiből adódik egy maximális vas(II)-ion koncentráció (telített oldat). Ha ez a telített oldat bejut a tengervízbe, ott a kémhatás lúgos (pH 8,4), vagyis a hidroxidion koncentrációja nagyobb, mint $10^{-7} \text{ mol} \cdot \text{dm}^{-3}$. Itt az oldhatósági szorzat kisebb vas(II)-ion koncentrációt enged

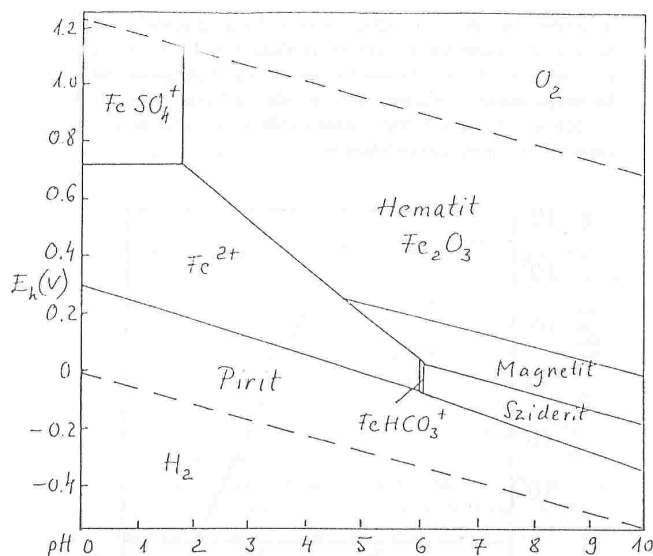
meg és a felesleg vas(II)-hidroxid csapadék formájában kiválik.

Ha az oxónium ionok koncentrációja nagy, savas a kémhatás, akkor a hidroxidion koncentrációja kisebb, hiszen a kettő szorzata állandó. A savas közegben az oldhatósági szorzatnak megfelelően több vas(II)-ion oldódhat (3.1. ábra). Ez a folyamat nehézfémeknél kifejezetten káros, hiszen ezek az élő szervezetekre nézve mérgezők. Természetes vizekben a vas(II)-ionok vas(III)-ionokká oxidálódnak. A vas(III)-hidroxid a vas(II)-hidroxidnál is kisebb oldhatóságú és egy további lépésben vízleadással goettit (FeOOH) alakul át.

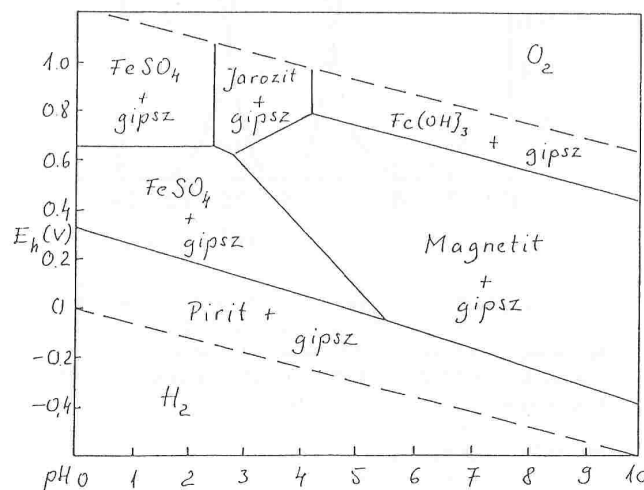


3.1. ábra. A maximális Fe^{2+} koncentráció a pH függvényében

A másik nagyon fontos hatás a redoxifolyamatokra kifejtett hatás. A redoxpotenciál (E_h) arról tájékoztat minket, hogy az adott elem oxidált vagy redukált formában szeret-e jelen lenni. Mindazon folyamatokat, ahol valamelyik vízion szerepel az átalakulás egyenletében a pH befolyásolja, vagyis a pH változtatása az oxidációt vagy a redukciót teheti a kedvező folyamatá. Az előbbi példára, a vasra vonatkozóan a 3.2 ábra mutatja be azokat a formákat, amelyekben a vas az adott körülmények között, a vizes oldattal egyensúlyban létezik. Az ábráról az is leolvasható, hogy a permanganátion a természetben nem létezik, vizes oldata fokozatosan mangán-dioxiddá alakul. Ugyanígy elemi vas kiválására sem számíthatunk vizes közegben, mert előbb megy végbe a víz hidrogénné való átalakulása, hiszen a vas negatív standard potenciálú fém. A vonalak helye és a stabil fázisok összetétele a többi anyag koncentrációjának függvénye. (3.3 ábra).



3.2. ábra. A vas különböző oxidációs számú vegyületei és a vizes oldószer pH-ja közti kapcsolat.



3.3. ábra. Vasvegyületek kiválása marsi összetételű, nagy szulfát tartalmú savas vizekből.

3.4 A földi tengervíz kiszáradása: bepárlási sósorozat

Egy másik oldódási kémiai jelenségsort akkor kapunk, ha kiszárítjuk gondolatban a tengerek vizét. Ez a valóságban tengerparti elzárt területeken be is következik. Ilyenkor, oldhatóságuk egyre javuló sorrendjében, a következő ásványi sók válnak ki: karbonátok (legrosszabbul oldódó sók), gipsz ($\text{Ca}_2\text{SO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), anhidrit (Ca_2SO_4), kősó (NaCl , halit), blődít ($\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), epsomit ($\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, keserűs), kainit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{KCl} \cdot 3\text{H}_2\text{O}$), hexahidrit ($\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$), kieserit ($\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$), bischofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$).

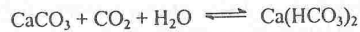
Megjegyezzük, hogy ez a sorrend a tengervíz összetételének is függvénye. A kiszáradás során a korábban már kivált ásványok egyrészt visszaoldódhatnak és átkristályosodhatnak, másrészt vízfelvétellel egymásba alakulhatnak. Ilyenkor ez az ideális sorrend megváltozik. A vízfelvétel egyensúlyi folyamat, a hőmérséklet mellett a légkör relatív nedvesség-tartalma is befolyásolja. A hexahidrit például földi körülmények között 50-55%-os relatív páratartalomnál 25°C -on könnyen átalakul epsomittá.

A legutóbbi marsi mérések a Mars egyenlítője mentén kb. 10% víznek megfelelő hidrogént találtak, ami hidrolízissel keletkezett szilikátok ill. sóhidrátok formájában kötött. A marsi üledék főleg magnézium-szulfátokat tartalmaz, ami a valamikori óceánok bepárlódása során vált ki. Ezek a szulfát-sók több-kevesebb vizet tartalmaznak kristályvíz formájában. A fentiek közül a kieserit köti meg legerősebben a vizet, még vákuumban is, ill. 670 K-ig stabil. Nedves környezetben azonban könnyen felvesz még vizet és hexahidritté vagy epsomittá alakul. Utóbbiak vízvesztése (dehidratációja) viszont nem áll meg a kieseritnél, hanem közvetlenül a vízmentes, amorf szerkezetű magnézium-szulfát keletkezik. Emiatt ügyelni kell arra, hogy az összetétel meghatározásáig a kőzet tárolása az égitesten uralkodó körülmények biztosításával történjen.

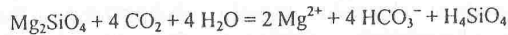
3.5 Mállás vizes közegben, a karbonátok oldódása

Eddig a tengervízben oldott sókat tekintettük át és azok esetleges kiválásait. A természeti környezetben azonban szilárd összetevők is jelen vannak. A legérdekesebb átalakulási események a folyadék állapotú anyagok (pl. tengervíz) és a szilárd anyagok (pl. vulkáni kőzetek) kölcsönhatása során következnek be. Ezekhez járul még a légkör átalakító hatása. Így összességében a Föld típusú égitestek felszínén igen összetett gáz-folyadék és szilárd

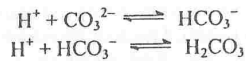
anyagú kölcsönhatási folyamatok zajlanak. Ezekből ragadunk ki néhány jellemzőt. A szilárd anyagok és az őket átalakító fluidumok (gázok vagy folyadékok) között létrejövő átalakulásban megváltozik a kőzet anyaga, amit mállásnak nevezünk. Ennek szélsőséges esete az, amikor az oldószer a teljes kőzet anyagot föloldja. Első példaként éppen ezt mutatjuk be, vagyis hogy hogyan képes a mészkő föloldására a szén-dioxidot oldott állapotban tartalmazó víz:



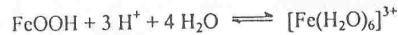
Nemcsak a karbonátok, hanem más kőzetek mállását is előidézheti a szén-dioxid, pl.:



Nagy nyomáson, víz jelenlétében, alacsony hőmérsékleten a felső nyíl irányába tolódik el a fenti egyensúly. A nyomás azért van hatással erre az egyensúlyra, mert a felső nyíl irányában zajló a reakció térfogatsökkenéssel jár együtt, így a nagy nyomás az oldódást segíti elő. Az óceánokban bizonyos mélység alatt a mészszváz feloldódik. Az óceánok kémhatása nagyjából a hidrogén-karbonát oldat kémhatásával azonos. A savas eső hatását az oldott hidrogén-karbonát ill. talaj mésztartalma (CaCO_3) semlegesíteni képes egy bizonyos fokig.

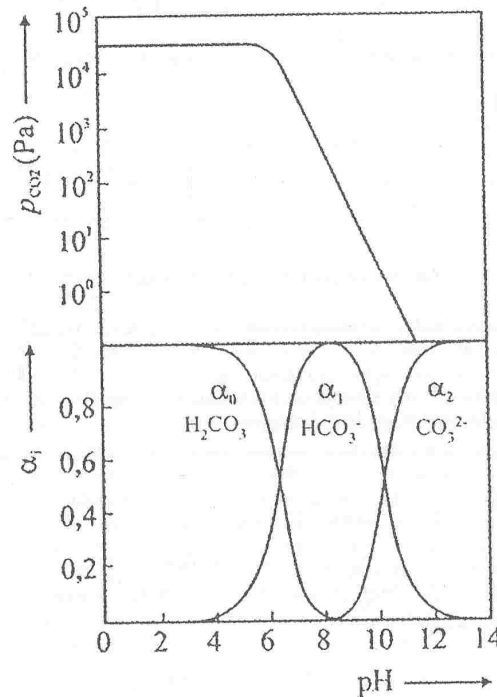


Több sav (pl. H_2SO_4) hozzáadására más rendszerek veszik át ezt a szerepet és igyekeznek a pH változást csökkenteni. Először a szilikátok fémionjai cserélődnek ki hidrogénre, majd az alumínium-szilikátok oldódása következik. Végül a vas-hidroxid reagál miközben fémionok kerülnek oldott állapotba:



Karbonátok kiválása semleges vagy bázikus közegben valósulhat meg. A Marson annak ellenére, hogy a légkör főleg szén-dioxidból áll, csak kevés karbonátot találtak. Volt viszont goetit és jarosit ($\text{KFe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$). Utóbbi a savas, oxidáló környezetben végbemenő mállás korai terméke. Földi körülmények között ritka, mivel tovább alakul goetit (FeOOH). Feltételezik, hogy a Marson egykor jelenlévő óceánok savas kémhatása akadályozta meg a karbonátok, a Marson elsősorban a sziderit keletkezését. Ezt a savas kémhatást két folyamat eredményezte. Egyrészt a vastartalmú

ásványok hidrolízise okozta, mivel a fenti egyensúly balra tolódik el. Másrészt a vulkáni eredetű kén-dioxid oxidáló környezetben idővel kénsavvá alakult. Ebből jöttek létre kénsavas mállás eredményeként a megtalált szulfátsók is. A Földön a Rio Tinto forrásvidékén található hasonlóan savas, magas vastartamú, oxidáló környezet.

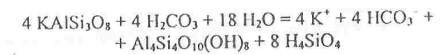


3.4. ábra. (felül) A szén-dioxid parciális nyomása az oldat felett az oldat pH-jának függvényében. (alul) A szénsav és a belőle keletkezett ionok (CO_3^{2-} , ill. HCO_3^-) aránya az összes specieszhez (H_2CO_3 , HCO_3^- , CO_3^{2-}) képest a pH függvényében.

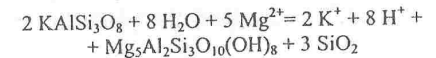
3.6 Mállás a Föld felszínén

A vulkáni folyamatokban keletkezett majd megszilárdult láva a felszínen a környezettel való kölcsönhatás eredményeként aprózódik, átalakul. A magmás kőzetek kémiai átalakulásában a legfontosabb szerepet a földi körülmények

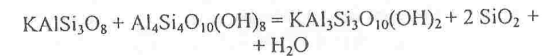
között a víz és a benne oldott légköri gázok, főleg a szén-dioxid és az oxigén játsszák. Első lépés a vízzel való reakció, vagyis a hidrolízis. Már a Földön is megfigyelhető, hogy a savasabb környezetben a mállás eredményeként agyagásványok (pl. kaolinit) keletkeznek, míg a semleges, enyhén savas, ámde kevés iont tartalmazó vízben (trópusi körülmények) a hidrargillit, böhmít, limonit a mállás terméke. Példaként tekintsük egy káliföldpát kaolinná való átalakulását. Általában több lépésen keresztül megy végbe és az oldott szén-dioxid is részt vehet a folyamatban.



Lúgos körülmények között, magnéziumionok jelenlétében a káliföldpát az alábbiak szerint reagál miközben klorit és kvarc keletkezik:

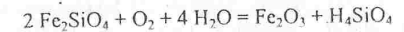


A káliföldpát megfelelő feltételek (hőmérséklet, reakcióközeg) között az előzőleg keletkezett kaolinnal muszkovittá és kvarccá alakulhat tovább.



Fontos, hogy a fenti átalakulások egyensúlyi folyamatok és a példákban is látható, hogy a körülmények (ionok koncentrációja, hőmérséklet, pH) döntően befolyásolják az átalakulások menetét, ezért a végeredményből következtetni lehet a múltira. Az ásványok mállással szembeni ellenálló-képességének relatív sorozatát a 3.3 táblázat tartalmazza.

A következő folyamat az oldott anyagok esetleges oxidációja, amiben a Földön az oldott oxigén mellett az oxidációs folyamatok energiáját felhasználó mikro-organizmusok is aktívan részt vesznek. Az oxidált termékek általában kisebb oldhatóságuk miatt kiválnak.



Redukáló környezetben, szulfidionok jelenlétében a szulfidos ércek csapódnak ki. Ezt követi az oldott kalcium és részben a magnézium kiválása karbonátok formájában, Megjegyezzük, hogy némely karbonát

termikus stabilitása nem túl nagy, például az ezüst-karbonát bomlási hőmérséklete földi körülmények között csupán kb. 210 °C. Az óceánokba változatlanul eljutó oldott nátrium-, kálium- és részben a magnézium sók kiválását korábban már bemutattuk.

3.3 Táblázat: Ásványok relatív mállás-ellenállási sora.

Legellenállóbb	8. magnetit	16. zoizit
1. cirkon	9. staurolit	17. augit
2. turmalin	10. kianit	18. sillimanit
3. monacit	11. epidot	19. hipersztén
4. gránát	12. hornblendit	20. diopszid
5. biotit	13. andaluzit	21. aktinolit
6. apatit	14. topáz	22. olivin
7. ilmenit	15. titanit	Legkevésbé ellenálló

3.7 Planetáris mállások és oldódások: a Mars esete

A természetben az oldószerekkel való kölcsönhatás következtében a kőzetekben az oldódási, a mállási és a kicsapódási folyamatok együttesen fordulnak elő. A mállás során a víz a benne álló sziklák felszínét alakítja át, a kőzet repedéseibe behatolva pedig ott ki is válhatnak a vízben oldott sók. Tekintsünk egy planetáris mérési eredményt, amelyben mállási sósorozatok szerepelnek, melyek egyrészt a mért mállási kéreg alapján lettek meghatározva, és így betekintést adtak a kőzetekért oldószerek sorozatáról. Másrészt mállástermékeket a marsi meteoritokban is megfigyeltek.

A korai Mars felszínét bazaltos kőzetek alkották. A marsi kőzeteket először a kénsavas felszíni vizek mállása alakította át egykoron. Később a Mars inkább vízi világ lett. Ez az összkép olvasható ki a marsi kőzetek mállásának kémiai képletéből (Kargel). A marsi kőzeteknek változó összetételű oldószerek hatására bekövetkezett kémiai eseménysorozatáról a MER űrszondák küldtek adatokat. A TES mérési adatok alapján Mg és Ca szulfátok valamint a Na tartalmú sók alkotják a kőzetek külső, felszíni mállástermékeit. A klór gyakorisága alapján a kőzetek késői mállása során a kősó (halit) és biszofit ásványokat gondolták kiválni. Az egész kései mállási folyamat a bromidos cementek képződésével zárult, s ezekben a brómtartalom váltakozó.

Csak kevés karbonát ásvány fordul elő a marsi kőzetekben. A finomszemcsés hematit és más Fe^{3+} sók is olyan vizes oldatból válhattak ki, amelyben kéntartalmú gyökök is jelen voltak, és ezért vas-szulfát is keletkezett. Az

ilyen oldatokból Ca-Mg-Na szulfátok is és vasas fázisok is kiválnak. Ezért gyenge korrelációt is megfigyeltek a vas és a kén jelenléte között a marsi kőzetekben. A Marson történt sókiválások tehát többféle és változó összetételű mállási folyamatokról örznek kémiai emlékeket a sósorozatok formájában melyeket a bemutatott anyagok anyagterképei alapján határoztak meg (Squyres, Arvidson).

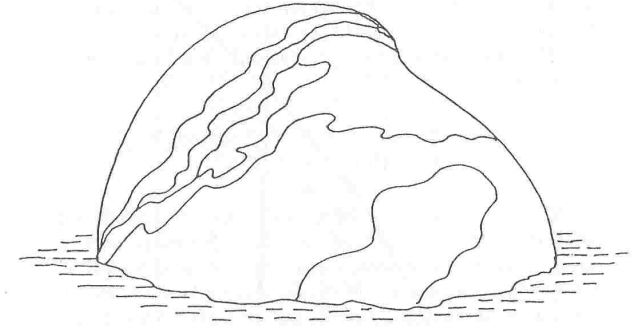
Történeti képhez rendezve a sósorozatokot, a megfigyelésekből az világlik ki, hogy először – a Mars korai időszakában – a viszonylag jó oldékonyságú sók váltak ki, amiket aztán a kevésbé jó oldékonyságú vasas konkréciók kiválása követett. Mindeközben megváltoztak a marsi tengeri viszonyok, a marsi tenger összetétele, ezért megtörténhetett az oldékonyság korai sók visszaozdása is, ami üregeket hagyott maga után. Amikor a kénsavas víz magnéziumszulfátot tartalmazott már, akkor a belőle kicsapódó ásványok kémiai természetét a magnézium-szulfát sóknak ugyanis számos változata van s ezek között az átalakulás térfogat-változással jár. Ezek a térfogatváltozások, deciméteres táblákra darabolódott kőzetek formájában, gyakran meg is figyelhetők a Meridiani Terra leszállási vidéken, a talajból előbukkanó szikláknál az Opportunity felvételein. (Megjegyezzük, hogy a magnézium-szulfátos vizes oldatok az Európán is fontos szerepet játszhatnak.)

3.4 Táblázat. A magnéziumszulfát sók víztartalma

hidrát	ásványnév	képlet	víztart.
7-es	epsomit	$[Mg(H_2O)_6](SO_4)(H_2O)$	51 %
6-os	hexahidrit	$[Mg(H_2O)_6](SO_4)$	47 %
5-ös	pentahidrit	$[Mg(H_2O)_4](SO_4)(H_2O)$	43 %
4-es	starkeyit	$[Mg(SO_4)(H_2O)_4]$	37 %
3-as		$[Mg(SO_4)(H_2O)_3]$	31 %
2-es	sanderit	$[Mg(SO_4)(H_2O)_2]$	23 %
1-es	kiescrit	$[Mg(SO_4)(H_2O)]$	13 %

Kargel amerikai kutató szerint a Meridiáni Terra vidékén lezajlott események sorozata a következő volt: 1) egy savas szulfátos oldat járta át a bazaltos tufát, s ennek hatására magnézium-vas-kalcium sók csapódtak ki, 2) egy kloridos oldat – és esetleg az előző oldat maradéka, - oxidálta a vasat, 3) ugyanez a kloridos oldat szelektíven visszaoldott és kimosott az előző sókból is, ezáltal porózusan hagyta vissza az előző kőzetet, 4) később ugyanez a kloridos oldat nátrium és kálium klorid sókat hagyott maga után a pórusokban, és a repedésekben is, mert a kőzet fokozatosan kiszáradt és

föltöredezett, 5) ezek után egy vizes korszak következett, s 6) majd arra egy hosszú, hideg, száraz, időszak, (alkalmankénti rövid melegebb oldási időszakokkal tarkítva, amikor a nagyon telített sós oldat tovább ette-mállasztotta a kőzetek felszínét.



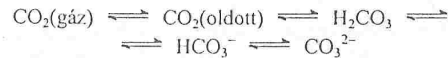
3.5. ábra. Mechanikai mállás a gömbhéjas (v. gömbös) mállás földi környezetben.

Egyes kutatók szerint a bemutatott sósorozatokot kis vízmennyiségek is létrehozhatták. Ehhez az szükséges, hogy a kevés víz rendszeresen ismétlődve, tehát évszakosan, vagy naponta, fejtsse ki a mállasztó hatását, például úgy, hogy a vizes oldatok behatolnak az ásványzsemcsék közötti szemcschatárokon. Később a szél hatására is megtörténhet a mállott anyagok elszállítása a felületi repedésekből. E mállott anyagok aztán a marsi talajba keveredve porként szállítódnak és vannak jelen a felszínen. Éppen ezt figyelték meg a Guszev kráterben, ahol a Spirit útja mentén sorakozó kőzeteknek gyakran két tónusa volt: az alsó részük világosabb színű és a felső részük sötétebb. A felszíni mállást a nagyon kis mennyiségben a marsi légkörben is jelen lévő víz körforgásával magyarázzák. Az éjszakai hidegben kicsapódó vízpára a nap keltekor, hajnalban szublimál. Mégis, egy tranziens víz monoréteg marad a sziklák felszínén, ami folyadékként viselkedik. Több tíz percnire tehető az az időszak, amikor a szikla vizes felületű és már ez alatt a rövid idő alatt is számottevő kémiai mállás történhet, ha ez naponta lejátszódik. Ugyanez a folyamat a talaj mállását is okozza.

A marsi meteoritok átalakulási termékeit is sósorozatokban keresték (MIL 03346 nakhlit-ban). A Marsra a MER-ek által megfigyelt mállások alapján a karbonát, anhidrit, gipsz, kősó (halit) és agyagásványok átalakulási termék sorozatot jósolták, de ebből a marsi meteoritban csak a gipszet találták meg.

3.8 A Földi légkörből a Mars légkörébe lépünk, ahol főleg széndioxidból áll a légkör

A Földön a szén-dioxid koncentrációja 380 ppm (part per million), ami azt jelenti, hogy egymillió molekulából 380 szén-dioxid. Ezzel arányos a szén-dioxid parciális nyomása is. A vízben a szén-dioxid oldódik, egy része szénsavvá alakul át, amiből proton leadással hidrogén-karbonát, majd karbonátion keletkezik.



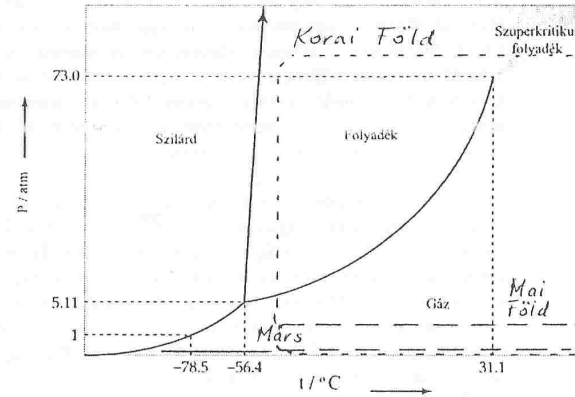
Az első egyensúly a hőmérséklet mellett szén-dioxid parciális nyomásától is függ, a többi egyensúlyt csak a hőmérséklet, ill. a protonleadások mértékét a külső pH is befolyásolja. Ha csak a szén-dioxid alakítja ki a kémhatást, akkor a Földön uralkodó nyomás mellett a pH 5,6 körül van. Ha más tapasztalunk, akkor más anyagok is beleszólnak a pH kialakításába (ld. savas esők).

3.9 A halmazállapotok változása a főleg szén-dioxidból álló légkörökben

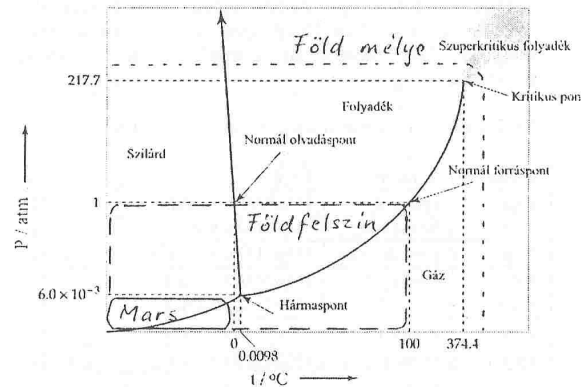
A nyomás és a hőmérséklet meghatározza azt, hogy egy anyag milyen halmazállapotú. A szén-dioxid halmazállapotának a nyomástól és a hőmérséklettől való függését a 3.6 ábra mutatja. A Földön a felszíni légköri nyomáson -78°C felett a szilárd szén-dioxid gáz halmazállapotúvá válik, szublimál. Összehasonlításképpen a víz fázisdiagramját is közöljük (3.7 ábra). A hármaspont -57°C -nál és $5,1 \cdot 10^5$ Pa nyomásnál van, ahol mindhárom halmazállapot egyensúlyt tart egymással. Folyékony halmazállapotba csak a hármaspont felett hozható az anyag. A kritikus pont a szén-dioxid esetében 31°C , és a hozzátartozó kritikus nyomás $7,3 \cdot 10^6$ Pa. Ezen a ponton a gőz és a folyadék sűrűsége azonosává válik, a felületi feszültség megszűnik, így a kétféle állapot helyett csak egyfajta, az un. szuperkritikus állapot alakul ki. E hőmérséklet felett az anyag a nyomás növelésével nem hozható folyadék halmazállapotba. (3.6. Táblázat)

A Mars légköre főleg szén-dioxidból áll (ld. 3.5 Táblázat). A marsi légkör felszín közeli nyomása alacsonyabb, mint a szén-dioxid kritikus nyomása, ezért a marsi légkört szén-dioxid gőzből állónak tekinthetjük. Ez a légköri szén-dioxid gőz egyensúlyra törekszik a szárazjégből álló jégsapkákkal.

Ha évszakosan növekszik a hőmérséklet, akkor a jégsapkákról szén-dioxid gőz szublimál, és növeli a légköri nyomást. A szén-dioxid egyensúlyi gőznyomása, mint minden



3.6. ábra. A szén-dioxid fázisdiagramja. Az ábrán folytonos vonal jelzi az állapotjelzők értékeinek lehetséges tartományát a Marson, szaggatott vonal a mai Földön, ill. pontozott vonal a korai Földön.



3.7. ábra. A víz fázisdiagramja. Az ábrán folytonos vonal jelzi az állapotjelzők értékeinek lehetséges tartományát a Marson ($6-9$ mbar, $152-220$ K), szaggatott vonal a Föld felszínén (≤ 1 bar, $220-373$ K), ill. pontozott vonal a Föld mélyén (≤ 1000 bar, ≤ 673 K).

gőznyomás, exponenciálisan növekszik. Mivel más, állandó nyomással jelenlévő anyagok csak nagyon kis mennyiségben vannak jelen a marsi légkörben, ezért olyan nagy a nyomásbeli ingadozás a Marson.

3.5. Táblázat. Fontosabb anyagok halmazállapotai néhány égitesten

	p / bar	Gázok	Folyadékok	Jég
Merkúr	10^{-15}	O ₂ , Na, H, He		
Vénusz	92	CO ₂ , N ₂		
Föld	1	N ₂ , O ₂ , Ar, H ₂ O, CO ₂	H ₂ O, nagyobb szénhidrogének	H ₂ O
Hold	$3 \cdot 10^{-15}$	He, Ne, H ₂ , Ar		
Mars	$6-9 \cdot 10^{-3}$	CO ₂ , N ₂ , Ar	CO ₂ ?	CO ₂ , H ₂ O
Jupiter	$\gg 1000$	H ₂ , He	Szuperkritikus állapot	
Európa	10^{-11}	H ₂ O, OH, O, H, O ₂	H ₂ O (a jégréteg alatt)	H ₂ O
Szaturnusz	$\gg 1000$	H ₂ , He	Szuperkritikus állapot	
Titán	1,5	N ₂ , CH ₄	H ₂ O?, szénhidrogének	H ₂ O

A Vénusz légköre is főleg szén-dioxidból áll, amely a felszín közelében szuperkritikus állapotban van, mivel a felszíni hőmérséklet mintegy 740 K és a nyomás több, mint 90-szerese a földi nyomásnak. Ezért a vénuszi viszonyokon a széndioxid már csak egyféle halmazállapotban fordulhat elő. Mivel azonban számottevő a kénvegyületek mennyisége a vénuszi légkörben, és ezeknek a kritikus nyomása és hőmérséklete magasabb a vénuszinál, ezért a légköri csapadék a Vénuszon a kénsavas eső.

Egy adott anyag halmazállapotát nem minden esetben lehet csak a fázisdiagram alapján meghatározni. A többi anyag jelenléte is befolyásolhatja azt, hiszen például a gázok beoldódhatnak egy másik folyadékba, vagy zárványvegyületek keletkezésével szilárd halmazállapotba kötött is jelen lehetnek a gázok.

3.6. Táblázat. Néhány anyag kritikus nyomása és hőmérséklete

Anyag	$p_{kr} / 10^5$ Pa	T_{kr} / K
Etán	48,2	305,4
Metán	45,6	190,6
CO ₂	72,9	304,2
H ₂ O	218,3	647,4
H ₂	12,8	33,23
He	2,26	5,2
O ₂	50,1	154,8
N ₂	33,5	126,3
NH ₃	111,3	405,5
Ar	48,0	150,7

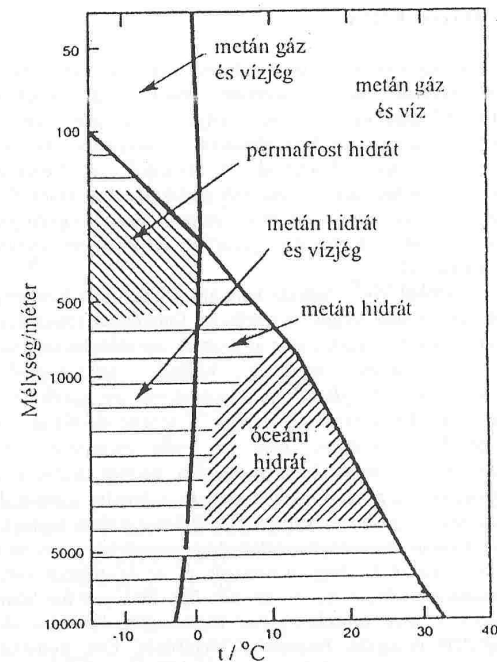
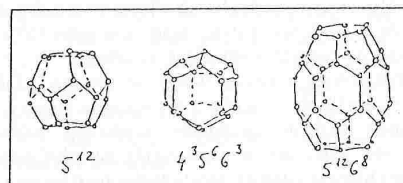
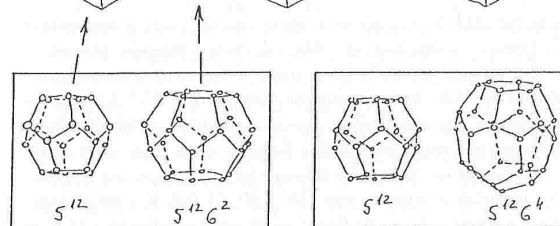
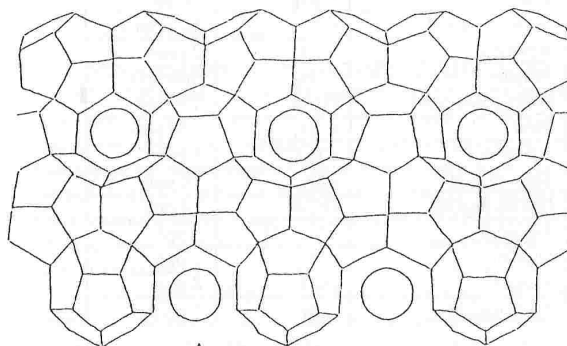
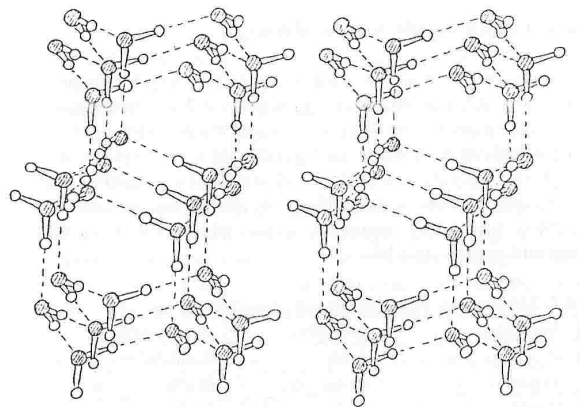
3.10 A zárvány-vegyületek egy fontos égitestfelszíni formája: gázhidrátok

A különböző bolygókon, ill. holdakon uralkodó felszíni viszonyok között olyan anyagformák is létrejöhetnek, amelyek földi körülmények között nem (vagy csak ritkán) figyelhetők meg. Ezek közé tartoznak a klatrátok, amiket magyarul zárványvegyületeknek neveznek. E vegyületek közül a gázhidrátok játszanak fontos szerepet a légkör és a hidroszféra határán. Gázhidrátok létezését leginkább a Jupiter-Európa holdján és a Szaturnusz-Titán nevű holdján valószínűsítik, ahol kéregalkotó mennyiségben fordulhatnak elő. A Földön a klatrátok a mélytengeri és a sarki különleges viszonyok között fordulnak elő.

Milyen szerkezetűek a klatrátok? Sok anyag kristályrácsában a molekulák közötti kötés irányfüggő. Egyes létrejövő elrendezéseknél nem biztos, hogy a molekulák szorosan illeszkednek s a köztük lévő üregekbe vendégmolekulák kerülhetnek. Példaként említjük a vízjég esetét (3.8. ábra felül). A vízjég azért nagyobb térfogatú, mint a víz, mert a jégben a molekulák között rögzülő hidrogénhidak kapcsolatok csak egy, a vízbelinél nagyobb térfogatú térbeli elrendezkedést valósíthatnak meg. Az így „kifeszített” jégmolekula vázban is üregek vannak.

Vizsgáljunk meg néhány gázhidrát szerkezetet (3.8. ábra). Egyik típusánál az ismétlődő egységben 46 vízmolekula úgy rendeződik el, hogy közté 8 üreg, két nagyobb és hat kisebb alakul ki (3.8. ábra középen). A klórmolekulák ezek közül csak a nagyobb üregeket képesek elfoglalni és ha minden ilyen nagyobb üreg foglalt, akkor megadható egy határozott kémiai összetétel a klórhidrát: $(\text{Cl}_2)_8(\text{H}_2\text{O})_{46}$, ami már 0 °C-on is szilárd. A környezeti viszonyoktól függően persze másféle, pl. változó összetétel is kialakulhat. Megjegyezzük, hogy a „klatrátosra” módosult vízjég szerkezetet is a hidrogénhidak tartják össze. A klatrát képződési folyamatot a hőmérséklet, a nyomás és a vendégmolekula mennyisége és mérete is befolyásolja.

Második példaként a metánhidrátot mutatjuk be. A metán, vízzel csak nagy nyomáson képez szilárd halmazállapotú klatrátot. Ennél a vegyületnél a metángáz molekulája a klórénál kisebb méretű, s ezért a vízmolekulák rácsának kisebb méretű üregeit is el tudja foglalni. Így fajlagosan több metán molekula esik egy vízmolekulára, mint a klórhidrátban, s ez a képletében jól látszik: $(\text{CH}_4)_8(\text{H}_2\text{O})_{46}$. (3.8. ábra középen). Telítettség esetén 1 m³ metánhidrát 175 m³ (standard nyomású, 25 °C-os) metánt és 0,87 m³ vizet tartalmaz. A földi óceánok mélyebb rétegeiben lévő hidrátból csak kb. 150 m³ metán nyerhető, mert a többi üreget más gázok foglalják el (H₂S, etán, stb.). Ezek jelenléte stabilizálja a



3.9. ábra. A metán-víz klatrát stabilitási tartománya

klatrátot, ami az óceánok 400 m alatti rétegében helyezkedik el. Egészen addig létezik a főleg metánhidrátból álló klatrát, amíg a mélytengeri rétegekben a hőmérséklet emelkedése miatt el nem bomlik. (3.9. ábra) A Naprendszer viszonyai közé kilépve fontos tudnunk, hogy a széndioxid is képezhet vízzel a metánhidráthoz hasonló klatrátot. A széndioxid-klatrát képlete, ha minden hely foglalt a módosult vízjég üregekben: $(\text{CO}_2)_8(\text{H}_2\text{O})_{46}$, vagy másként írva: $\text{CO}_2 \cdot 5\frac{3}{4}(\text{H}_2\text{O})$. Valószínűleg a Mars felszín közelében észlelt víz egy része széndioxid-klatrátként van jelen. A klatrátok más égitesteken is fontos szerepet játszanak a víz és egyes légköri gázok szilárd formában való megkötésében, stabilizálásában.

3.8. ábra. A jég szerkezete. Fent: Jól láthatók azok az üregek, amikben a vendégmolekulák helyet foglalhatnak. Középen: Kétféle üregméret az egyik klatrátban. A szerkezetben 5¹² típusú kisebb és 5¹²6² típusú nagyobb üregek találhatóak. Lent: a három leggyakoribb szerkezet a vízmolekulákból felépülő üregeknél

IV. FOTOKÉMIA

Az égitesteket érő sugárzás nemcsak az energia közvetítésében játszik szerepet, hanem az égitesteket körülvevő gázokkal, ill. ennek hiányában a felszín közetével is kölcsönhatásba lép. Erre példaként elsősorban a Föld, ill. a Szaturnusz egyik holdjának, a Titánnak a légkörben bekövetkező fontosabb fotokémiai átalakulásokat tekintjük át. Megjegyezzük, hogy gyakran a nyomnyi mennyiségben jelen lévő anyagok is fontos szerephez jutnak (pl. ózon, üvegház hatású gázok).

A Napból jövő sugárzás hatására a légkörben fotokémiai reakciók mennek végbe. A gázfázisú fotokémiai átalakulások során akár a molekulák, akár az atomok ionizálódhatnak, vagy a molekulákban meglévő kötések felszakadhatnak (disszociáció). Megfelelő magasságokban az ionok és a molekulák közti reakciók uralják a légkör kémiját, míg kisebb magasságokban, ahol az ionok mennyisége már elenyésző a gyökök és a molekulák közötti átalakulások jellemzőek. A sugárzás kölcsönhatása a légköri gázokkal a hőmérsékleti profilt is befolyásolja. Például a földi légkörben kb. 50 km-es magasságban található hőmérsékleti csúcs annak hatására alakul ki, hogy a nitrogén és az oxigénmolekula a napsugárzást elnyeli és ionizálódik. Egy bizonyos fotokémiai átalakulás, akár ionizáció, akár disszociáció kiváltása csak megfelelő energiájú fotonokkal lehetséges. Erre vonatkozó néhány adatot a 4.1. táblázat tartalmaz.

A Naprendszerben hozzánk legközelebbi lévő Vénusz és Mars légköre a Földéhez hasonlóan oxidáló sajátosságú (sok CO₂, SO₂, stb.), míg a külső bolygók légkörében redukált formában (CH₄, NH₃, stb.) vannak jelen az anyagok. A Vénusz légkörében kevés vízgőz és viszonylag sok kén-dioxid található. Ennek élettartama viszonylag rövid, fotokémiai oxidációval kén-trioxiddá, majd a vízzel kénsavvá alakul át. Ez utóbbi kicsapódik és felhőket alkot. A magas kén-dioxidtartalom azt jelzi számunkra, hogy a Vénuszon a kén-dioxidnak állandó forrása van.

4.1. Táblázat. Néhány fotokémiai folyamat és az ahhoz szükséges minimális energia, ill. maximális hullámhossz

Fotokémiai reakció	E (kJ/mol)	λ (nm)
O + hv → O ⁺ + e ⁻	1314	91
N ₂ + hv → 2N	950	126
O ₂ + hv → 2O	494	242
N ₂ + hv → N ₂ ⁺ + e ⁻	1503	80
O ₂ + hv → O ₂ ⁺ + e ⁻	1165	103
O ₃ + hv → O ₂ + O	386	310
CH ₄ + hv → CH ₃ + H	435	275

4.1 A Titán légkörének fotokémiája

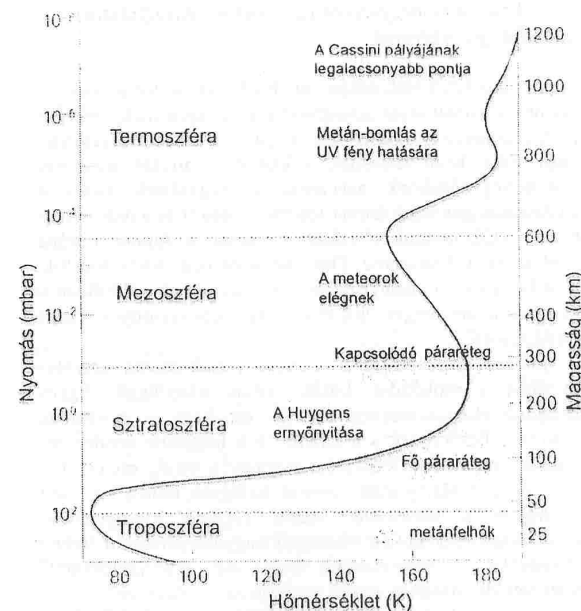
Először tekintsük át a Titán légkörének tulajdonságait. A Titán redukáló atmoszférája egyedülálló a Naprendszerben: a felszíni nyomás 1,46 bar, az átlagos hőmérséklet 93 K. A Titán légköre az égitest kisebb gravitációs ereje folytán a földi légkörnél jóval kiterjedtebb. Összetételét tekintve (4.2. Táblázat) a Titán légköre főleg N₂ gázból áll, és tartalmaz néhány százaléknyi metánt és egyéb gázt is (pl. CO₂, CO, szénhidrogének, nitrilek).

4.2. Táblázat. A Titán légkörének összetétele

Anyag neve	Képlet	menyiség
nitrogén	N ₂	90-97%
Argon	Ar	0-6%
Metán	CH ₄	2-5%
Hidrogén	H ₂	0,2%
Etán	C ₂ H ₆	10 ppm
Szén-monoxid	CO	10 ppm
Acetilén	C ₂ H ₂	2 ppm
Propán	C ₂ H ₈	500 ppb
Hidrogén-cianid	HCN	170 ppb
Etén	C ₂ H ₄	100 ppb
Acetonitril	CH ₃ CN	5 ppb
Szén-dioxid	CO ₂	10 ppb
Nitrilo-acetilén	HC ₂ N	10 ppb
1-propin	CH ₃ C ₂ H	5 ppb
Dicián	C ₂ N ₂	5 ppb
Vízgőz	H ₂ O	8 ppb
1,3-butadiin	C ₄ H ₂	1 ppb

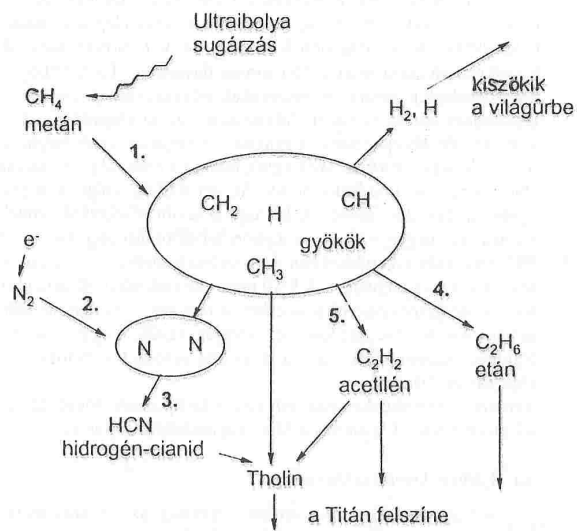
A hőmérsékleti profilról (4.1 ábra) látható, hogy a tropopauza kb 40km-es magasságban található, ahol a nyomás 140 mbar, a hőmérséklet pedig 70 K. A tropopauza felett a hőmérséklet növekszik, 320 km-es magasságban eléri a 177 Kelvint. A Titánon a mezoszférában ismét csökken a hőmérséklet. Alacsonyabb magasságoknál a fotonok ezen része nem képes az őrbe jutni de melegítő hatással van a környezetre. Ez alatt egy második minimum van (kb. 140 K) 600 km magasságában, s e fölött, a Nap UV fűtése miatt ismét emelkedik 175 K-re a hőmérséklet. A termoszféra hőmérséklete viszonylag alacsony marad a HCN sugárzasi hűtése miatt, ami ionoszféra kémiai átalakulásainak melléktermékeként keletkezik. Az exoszférában, 1000km felett, a hőmérséklet közel állandó (175K).

A Titán légkörében található nitrogéngáz éppúgy, mint a Földön inert gázként viselkedik. Eredetileg valószínűleg ammónia volt jelen, ami a napsugárzás hatására disszociált. A keletkező hidrogénatomok megtartására nem képes a Titán



4.1. ábra. A Titán hőmérsékleti profilja a Voyager 1 elhaladásakor mérve.

gravitációs ereje, ezért ezek kiszöknek a világűrbe. Végül nitrogénatomok maradtak, amelyek összekapcsolódásával (rekombinálódás) jöttek létre a molekulák. A néhány százaléknyi metán is az UV fotonok hatására könnyen disszociál és a keletkező hidrogénatomok a világűrbe távoznak. Az óriásbolygók hasonlóan redukáló légkörére szintén jellemző ez a folyamat, ott azonban a keletkezett szabad hidrogénatomok nem képesek elhagyni a légkört és így az ammónia nem bomlott el teljesen. A Szaturnuszon például ammóniájégből álló felhők vannak. A metán fotokémiai reakciójának (fotolízis) főterméke a metilgyökök (CH₃), de a hullámhossztól függően más gyökök (pl. metilén, CH₂) is keletkezhetnek. A metilgyökök egy része olymértékben gerjesztett állapotban keletkezik, hogy tovább bomlik metin gyökökre (CH) és hidrogénre. A jelenlévő gyökök egymással összekapcsolódnak (rekombinálódnak), ill. további fotokémiai reakciókban vesznek részt. Az átalakulások először két szénatomot tartalmazó szénhidrogéneket (C₂H₂, C₂H₄ és C₂H₆) eredményeznek. A leggyakoribb az etán (C₂H₆) és az acetilén (C₂H₂). Ezek további gyökös folyamatokban vesznek részt. Az etán fotolízise után több, nagyobb szénatomszámú szénhidrogén



4.2 ábra: A Titán légkörében végbemenő fotokémiai folyamatok vázlatja és néhány folyamat reakcióegyenlete

1	$\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{CH}_3^\cdot$
2	$\text{CH}_4 + h\nu \rightarrow 2\text{H}^\cdot + \text{CH}_2^\cdot$
3	$\text{CH}_3^\cdot + \text{H}_2 \rightarrow \text{CH}_4 + \text{H}^\cdot$
4	$\text{CH}_3^\cdot + \text{CH}_3^\cdot + \text{M} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_6 + \text{M}$
5	$\text{CH}^\cdot + \text{N}_2 \rightarrow \text{HCN} + \text{N}^\cdot$
6	$\text{C}_2\text{H}_6 + h\nu \rightarrow \text{C}_2\text{H}_5^\cdot + \text{H}^\cdot$
7	$\text{C}_2\text{H}_5^\cdot + \text{CH}_3^\cdot + \text{M} \rightarrow \text{C}_3\text{H}_8 + \text{M}$
8	$\text{CH}_2^\cdot + \text{CH}_2^\cdot + \text{M} \rightarrow \text{C}_2\text{H}_4 + \text{M}$

A * a gerjesztett részecskéket jelöli, a M bármilyen molekula, ami a felszabaduló kötési energiát elviszi.

is keletkezik (C₃H₈, C₄H₁₀, stb.). A nitrogénatom és a metánból származó gyökök közötti reakcióban HCN, CN-gyök, illetve alacsony hőmérsékleten még összetettebb molekulák, mint pl. a dician (C₂N₂), nitrilo-acetilén (HC₃N), stb. is létrejönnek. Ezek a reakciók a metánt már régen elfogyasztották volna, ezért feltételezhető, hogy a metánnak van valamilyen felszíni, vagy felszín alatti forrása, ami pótolja az elreagált gázt.

A sztratoszféra alacsony hőmérsékletén az etán és a többi nagyobb molekula lecsapódik és szmog, ill. pára (un. Tholin) keletkezik. Ettől a rétegtől vöröses-barna a Titán. A szmog részecskéi azután kiülednek, amiből a feltevések szerint, időszakosan átmenetileg létező tavak, vagy folyók keletkeznek. A hőmérsékletprofil alapján a középső troposzférában metán is kondenzálódik, s így ebből is keletkezhet köd.

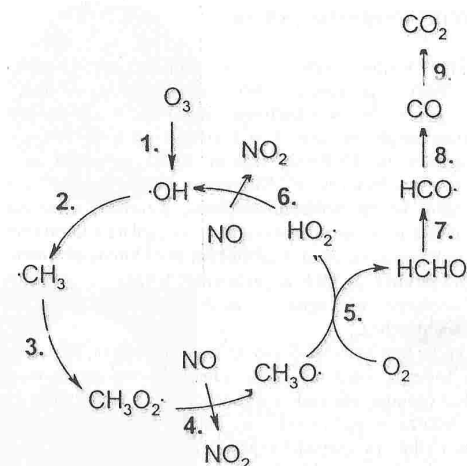
A Voyager űrszonda a Neptunusz egyik holdjánál, a Tritonnál is hasonló fotokémiai szmogot figyelt meg. A Triton légköre is főleg nitrogénből és metánból áll. Éppúgy, mint a Titánon, 50 km alatt a metán fotolízise a fő folyamat, ami végül nagyobb szénatomszámú szénhidrogéneket eredményez. A nitrogén bomlása és a HCN keletkezése szintén jellemző. 50 és 200 km között az ionok és a molekulák közötti átalakulások eredményeként a HCO⁺ a leggyakoribb ion, míg 200 km felett az atomos nitrogén, hidrogén, oxigén és szén, valamint a belőlük keletkezett ionok uralkodnak a légkörben.

4.2 A metán sorsa a Földön

Földi körülmények között, az oxidáló sajátosságú légkörben a metán élettartama rövid. Az ózon fotolízisével keletkező gerjesztett állapotú oxigénatom (O*) és a mindenütt jelenlévő vízgőz reakciójával keletkezik a szennyezőanyagok fő eltakarítója a hidroxilgyök. Ez egy hidrogén hasít ki a metánból és a keletkező metilgyök a levegő oxigénjével kölcsönhatva több lépésben formaldehidet (HCHO) keresztül végül gyorsan szén-dioxiddá oxidálódik. A részleteket a 4.3 ábra tartalmazza.

A hidroxilgyök a Marson is katalizátor szerepet tölt be és ilymódon fontos a légkör stabilitása szempontjából. A széndioxid fotobomlása során keletkező szénmonoxidot visszaalakítja széndioxiddá, majd a keletkező hidrogénatom a jelenlévő oxigénmolekulák, ill. atomos oxigén segítségével végül visszanyeri oxidáló képességét. A Vénuszon kevés a vízgőz, ezért itt a feltételezések szerint a klór, ill. a klórtartalmú gyökök (ClCO, ClO₂, stb.) játszhatják ezt a szerepet. Összehasonlítva a két égitest légkörének hőmérsékleti profilját mindkettőre elmondható, hogy a felszíntől távolodva a hőmérséklet csökken a tropopauzában lévő minimumig (10 km a Földön, 40 km a Titánon). A tropopauzában a gázok kondenzálódnak. Emiatt van a Földön a vízgőz nagy része 10 km alatt. A Titánon a metán játssza ezt a szerepet, ami üvegház hatású gáz is. Ezek komoly hatással vannak a klímára. A Titán felső légkörében lévő köd a földi ózonhoz hasonló hatású. Mindkettő az UV fény hatására alakul ki, bár az ózonképződés egy körfolyamat, míg a Titánon lévő pára kiüledése után nem tér vissza a folyamatba.

A fentiekből is látható, hogy a légkör összetétele, stabilitása



4.3. ábra. A metán fotokémiai oxidációjának sémája és az egyes reakciólépések itt a Földön

1.	$\text{O}_3 + h\nu \rightarrow \text{O}_2 + \text{O}^*$ $\text{O}^* + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{OH}^\cdot$
2.	$\text{OH}^\cdot + \text{CH}_4 \rightarrow \text{H}_2\text{O} + \text{CH}_3^\cdot$
3.	$\text{CH}_3^\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{CH}_3\text{O}_2^\cdot$
4.	$\text{CH}_3\text{O}_2^\cdot + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{CH}_3\text{O}^\cdot$
5.	$\text{CH}_3\text{O}^\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{HCHO} + \text{HO}_2^\cdot$
6.	$\text{HO}_2^\cdot + \text{NO} \rightarrow \text{NO}_2 + \text{OH}^\cdot$
7.	$\text{HCHO} + h\nu \rightarrow \text{H}^\cdot + \text{HCO}^\cdot$
8.	$\text{HCO}^\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{CO} + \text{HO}_2^\cdot$
9.	$\text{CO} + \text{OH}^\cdot \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}^\cdot$
10.	$\text{H}^\cdot + \text{O}_2 \rightarrow \text{HO}_2^\cdot$

összetett folyamatok során alakul ki. Ebben egyrészt a fotokémiai és az azt követő gázfázisú reakciók, másrészt a felszínen való kölcsönhatás (pl. mállás) és a transzport folyamatok játszanak szerepet. A fotokémiai folyamatokra vonatkozó modellszámításoknál a nyomás és a hőmérséklet mellett figyelembe kell venni a Nappól jövő sugárzás intenzitását és a hullámhossz szerinti eloszlását. Fontos a gravitációs cróteréből kiszökő, ill. a befejelegyekvő részecskék számbavétele is. A Triton esetében például az ionoszférában a Neptun magnetoszférájából származó elektronok is meghatározók.

V. LÉGKÖRI KÖRFORGÁSOK

A légkör kémiai összetételét a természet nagy anyagáramlása, a földi biogeokémiai – más bolygónál a geokémiai – ciklus szabályozza. Célunk e körforgás megértése, a legfontosabb ciklusok (szén, oxigén, nitrogén, kén, foszfor) leírása.

A biogeokémiai körforgás légköri ága a felszíntől indul (fórrás) és ott is záródik (nyelő). Kitérítetett szerepe van a felszín-bioszféra-légkör közötti kölcsönhatásoknak, a turbulens energia- és anyagáramoknak (v. fluxusoknak). Ezek vizsgálata a környezet-tudomány mikrometeorológiai, fizikai, kémiai és biológiai ismereteket igénylő területe. A földi anyagáramlás leírása, az analógiák keresése hozzásegít más égitestek fejlődésének, légköri összetételének megértéséhez.

A légkörbe más szférákból (litoszféra, hidroszféra, bioszféra) különböző anyagok kerülnek, szállítódnak, kémiai reakciókban vesznek részt (gondoljunk csak a légköri ózonra, vagy a villámlás hatására keletkező nitrogén-oxidokra), halmazállapot változásokat szenvednek (felhő- és csapadékképződés), s végül száraz- vagy nedves ülepedéssel (csapadék) kikerülnek a felszínre.

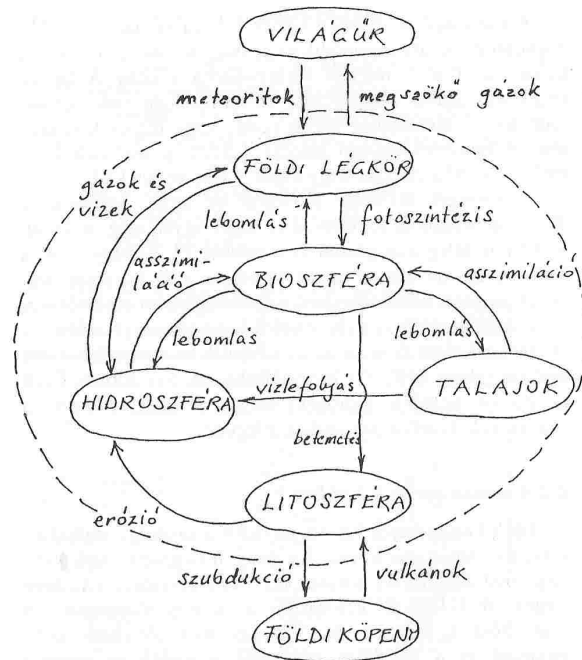
A légköri mozgások háromdimenziósak. A mérsékelt övben a nyugati szelekkel mozgó légréteg néhány hét alatt megkerülheti a Földet. A félgömbi keveredési idő hozzávetőlegesen egy év, míg a teljes légkörre vonatkoztatva néhány év. A légkör jól átkevert. Összetevői (gázok, aeroszol részecskék, felhő- és csapadékelemek) fizikai és kémiai tulajdonságaiknak megfelelően különböző időt töltenek a légkörben. Fő szabályként elmondható, hogy az egyes szférákban levő anyagok mennyisége (koncentrációja) annál kisebb tér- és időbeli változékonyságot mutat, minél nagyobb a tartózkodási idejük, vagyis minél kisebb az egységnyi idő (pl. 1 év) alatt kicserélődő – az adott szférában levő teljes anyagmennyiséghez viszonyított – relatív mennyiségük.

5.1. A légköri gázok

A szilárd Földet és a légkört – keletkezése óta – 92 kémiai elem atomjai és az ezekből felépülő molekulák alkotják. A légköri gázokat átlagos tartózkodási idejük (τ) alapján 3 csoportra osztjuk. Az állandó gázösszetevők tartózkodási ideje ezer, illetve millió években mérhető. Koncentrációjuk időben és térben állandó (N_2 , 78 tr%, $\tau_{N_2} \sim 10^6 - 10^7$ év; O_2 , 21 tr%, $\tau_{O_2} \sim 3500$ év; Ar, 1 tr%, $\tau_{Ar} \sim$ végtelen; tr% – térfogat százalék).

A légkör többi, mégoly fontos összetevőinek a mennyisége ppm, illetve ppb nagyságrendű. (A ppm – partes per million, illetve ppb – partes per billion, megadja, hogy 1 millió, illetve 1 milliárd levegő molekula közül hány tartozik az adott anyaghoz.) A változó gázösszetevők tartózkodási ideje éves-, százéves nagyságrendű. Ide tartozik pl. az üvegházhatású gázok közül a dinitrogén-oxid (N_2O), a szén-dioxid (CO_2), a metán (CH_4), illetve a freonok.

Az erősen változó gázösszetevők tartózkodási ideje néhány nap, illetve hét. Ide tartozik pl. a víz, a szén-monoxid (CO), az ózon (O_3) a nitrogén-dioxid (NO_2), a kén-dioxid (SO_2), a szénhidrogének, vagy a lúgos kémhatású ammónia (NH_3).



5.1. ábra. A Földi biogeokémiai ciklus nagy tározói. Az egyes tározók közötti főbb kicserélődési folyamatok. A szaggatott vonal határolja a belső tározókat. E folyamat-együttest vizsgálja a környezettudomány.

5.2. A légköri aeroszol részecskék

A légköri aeroszol részecskék (szilárd, vagy cseppfolyós) három alapvető módon keletkeznek: gőzök kondenzációjával, természetes és mesterséges égéssel, valamint a felszín mechanikus diszperziójával (pl. talaj részecskék, pollenek, tengeri só kristályok). Lehetnek természetes, vagy antropogén eredetűek, szerves, vagy szervetlen vegyületekből állók, vízben oldódók, vagy oldhatatlanok. Kiemelt szerepük van a felhő- és csapadékképződésben (a szilárd szemcsék elősegítik a túltelített vízgözből a víz kondenzálódását), illetve csökkentik az üvegházhatást a bejövő napsugárzás visszaverése révén. Ipari forrásoktól távoli óceáni területeken mennyiségük pár száz részecske/cm³, míg városi és ipari területek felett számuk meghaladhatja a 10⁵-10⁶ db/cm³-t. Az aeroszol nem korlátozó tényezője a felhőképződésnek (kivéve talán a repülőgépek utáni kondenzcsíkok jelentenek), óceáni területek felett azonban a felhők általában rövidebb élettartamúak, s kevesebb, de nagyobb méretű vízecspepecskékből állnak. Az aeroszol részecskék számának növekedése nem okoz kimutatható változást a csapadék mennyiségében.

A finom aeroszol részecskék 2,5 µm-nél kisebb méretűek. A durva részecskék (2,5-10 µm) általában a felszín elaprózódásából keletkeznek; ennél nagyobbak a por- és koromrészecskék. A keletkező választóvonal a 100 µm-es tartomány. Ez a felhő- és csapadékelemek határa. A részecskék növekedésével csökken a tartózkodási idő. A turbulens folyamatok (száraz ülepedés) mellett a részecskék növekedésével a gravitációs ülepedés válik meghatározóvá, a nagyobb részecskék egyre inkább a nehézségi erő hatása alatt mozognak (szedimentáció). Az aeroszolok közül a legnagyobb tartózkodási idővel (8-10 nap) a finom részecskék rendelkeznek. Ez megegyezik a víz légköri tartózkodási idejével. Így a légkörből való kikerülésükben meghatározó szerepe van a csapadéknak (nedves ülepedés). A 8-10 napos tartózkodási idő arra utal, hogy az aeroszol-koncentráció eloszlás regionális- és kontinentális skálájú folyamatok eredménye. Megjegyezzük, hogy a magas légkörbe (sztratoszféra, vagy a fölé) jutó aeroszolok tartózkodási ideje éves-évtizedes.

Aeroszol részecskékkel más bolygón is találkozunk. Meghatározó jelentősége van pl. a pornak a Mars sugárzástartásában.

5.3. A biogeokémiai ciklus elemei

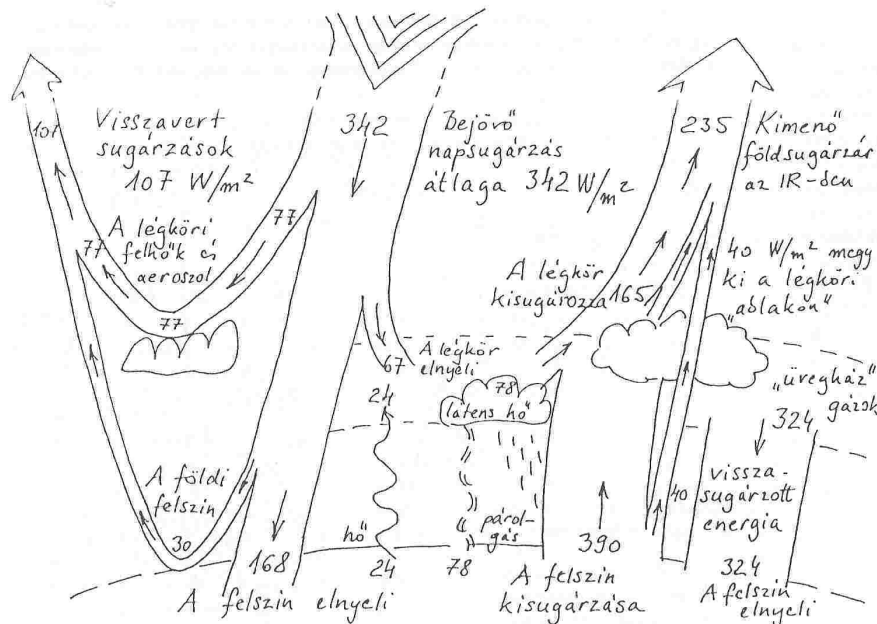
A biogeokémiai ciklus sematikus vázlatát az 5.1. ábra mutatja. Jól elkülöníthetők az egyes szférák. Látható a bioszféra kiemelt szerepe. A nyílak az anyagáramlás irányát szemléltetik. A rendszer külső határa a világűr, a belső a Föld mélye. Két energiaforrásunk van: a Nap sugárzása és a Föld belső hője. A többi energia, pl. mozgási, kémiai ezek átalakulásából származik, gondoljunk csak a fotokémiai folyamatokra, vagy a növények fotoszintézisére.

Az egyes szférák, tározók között folyamatos anyag- és energiaáramlás zajlik. Rövid távon egyensúly van. Hosszú távon az egyes tározókon átfolyó anyag és energia (a sugárzástartás esetén akár éves, a légköri szénforgalomnál néhány száz, a légköri oxigén esetén néhány tízezer év távlatban) már lényegesen meghaladja az ott tárolt mennyiséget. Változhat az egyes szférák szerkezete, a tárolt anyagmennyiség

5.4. A légkör energiaháztartása, az üvegházhatás

A légköri folyamatok „kifogyhatatlan” hajtóereje a Nap sugárzása. Közepes Nap-Föld távolság esetén a Föld külső határára érkező sugárzás a napállandó: értéke 1370 W/m². (Ez a sugárzás a Föld vetületére, az r_f Föld-sugarú korong felületére ($r_f^2 \pi$) érkezik.) A rövidhullámú napsugárzás tartománya: 0,15-4,0 µm, 0,47 µm körüli maximális intenzitással. Az élet számára veszélyes UVB sugárzás 0,28-0,32 µm-es hullámhosszú, amit gyengít az ózonréteg sugárzáselnyelése. A felső légrétegek (10 - 50 km) ózontartalma – ha azt a felszínre hoznánk, mindössze ~0,3 cm vastag lenne. Ez a vékony réteg védi a földfelszíni életet. A látható fény tartománya: 0,38-0,76 µm. A növényi élet számára fontos fotoszintetikus sugárzás: 0,4-0,7 µm. A felszínre jutó energia fele esik ide, aminek csak egy töredékét használja fel a növényzet.

A Föld külső határa – éves átlagban – négyzetméterenként (felület egységenként) 1370/4 = 342 W teljesítményű sugárzás jut.



5.2. ábra. A Föld átlagos energiamérlege. Az egyes komponensek dimenziója W/m^2 .

Ez érthető, hiszen egy r sugarú gömb felülete ($4r^2\pi$) vetületének ($r^2\pi$) négyszerese. A bejövő sugárzás 31%-át a légkör, a felhőzet és a felszín visszaveri az űrbe. A megmaradó mennyiség ($235 W/m^2$) kisebb részben elnyelődik a légkörben; nagyobb részt ($168 W/m^2$, a beérkező napsugárzás 49%-a) pedig a Föld felszínét melegíti. A felszín ezt a hőt a 4-100 μm -es tartományban (~ 10 nm-es maximális hullámhosszal) visszasugározza, továbbá a turbulens örvények által szállított látható v. szénhidrogén hő, illetve a felszínről elpárologtatott vízgőz (v. latens hő) formájában juttatja vissza a légkörbe. A vízgőz a felhőképződés során kondenzálódik (5.2. ábra). A Föld felszíne és légköre közötti energiacsere a globális felszíni középhőmérsékletet jelenleg $\sim 14^\circ C$ -on tartja. Ez az érték a magassággal jelentősen csökken; a tropopauzánál (10-12 km) az átlagos hőmérséklet már csak $-58^\circ C$.

A bejövő napsugárzás és a világűrbe kibocsátott infravörös sugárzás között egyensúly van, ami $-19^\circ C$ -os effektív emissziós hőmérsékletnek (a közepes földrajzi szélességeken ~ 5 km-es magassági szint) felel meg. A $\sim 33^\circ C$ -kal magasabb felszíni hőmérsékletet azok a légköri gázok idézik elő, amelyek az infravörös kisugárzás nagy részét elnyelik, majd minden irányban (így a felszín felé is) ismét kisugározzák. Ez a természetes üvegházhatás.

Az éghajlati rendszer (légkör, talaj, bioszféra, hidroszféra, krioszféra) egy „hőerőgépként működik”.

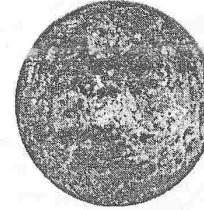
vegőbe juttatásával és a természetes felszínek átalakításával képes (nem szándékosan) módosítani a légkörön belüli sugárzásátvitelt.

Az üvegházhatású gázok koncentrációjának emelkedése megnöveli a légkör infravörös sugárzását. Így a világűr felé irányuló effektív kisugárzás nem az 5 km körüli szintről, hanem ennél nagyobb magasságból indul. Mivel nagyobb magasságban a hőmérséklet alacsonyabb, vagyis kevesebb energia sugárzódik ki, ezért a felszín-troposzféra rendszernek magasabb hőmérsékletűnek kell lennie. Ezt nevezük fokozott üvegházhatásnak, ami a tropopauza fölötti légkör termikus állapotára fordított hatást fejt ki: ott csökken a hőmérséklet. E változások azonban minden esetben egyensúlyi folyamatok során zajlanak le. Az aeroszolok sugárzás-elnyelő és visszaverő hatásuk miatt mérséklék az üvegházhatást. A földhasználat változása az albedó értékén keresztül módosítja az energiamérleget. A trópusi esőerdők kivágása, vagy az elszivatagosodással járó túllegeltetés növeli, a városiasodás pedig csökkenti az albedót.

A trópusi és szubtrópusi területeken (~ 35 szélességi körig) több energia érkezik be, mint amennyi távozik. Az energiamérleg pozitív. A szélességi körök szerinti differenciálisan érkező szoláris hő a légkör és az óceán különböző skálájú mozgásainak kinetikus energiájává transzformálódik. E mozgások együttese, az általános lég- és vízkörzés bonyolítja le az impulzus, a hő a víz, és a nyomanyagok átvitelét, ami az éghajlati rendszernek korlátos jellegét biztosítja: a Föld egyetlen pontján sem alakul ki progresszív (tartósan egyirányú) változás. A sűrűdés nyomán a mozgások energiája hővé disszipálódik. Így záródik az energiacyklus.

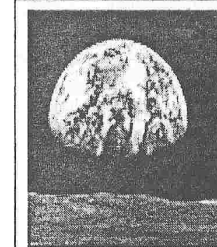
Az antropogén hatások az ipari forradalmat követően váltak regionális, illetve globális skálájú éghajlat alakító tényezőkké. Az emberi tevékenység a természetes üvegházhatást fokozó gázok kibocsátásával (5.1. táblázat), továbbá aeroszol részecskék le-

Vénusz – az „elszabadult” üvegház



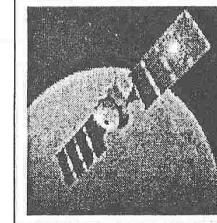
A $460^\circ C$ -os felszíni átlaghőmérsékletű bolygón az óceánok elforrtak. Nem számolhatunk a szilikátok mállásával. A vulkáni eredetű CO_2 a légkörben halmozódott fel. A Naptól vett kis távolság miatt a vízgőz fotodisszociációs folyamatok révén elvesztett. A keletkezett hidrogén a világűrbe távozott.

A Föld – a „jól működő” üvegház



Az üvegházhatás $\sim 33^\circ C$, az átlaghőmérséklet $\sim 14^\circ C$. Az óceánok, a hidrológiai ciklus, a bioszféra folyamatai alakítják és stabilizálják az éghajlatot. A mállás a litoszféra, míg a tektonikus és vulkáni folyamatok a légkörbe juttatják a CO_2 -t, ami hosszú távon (évmilliók) szabályozza az éghajlatot, mivel a mállás gyengül a hőmérséklet csökkenésével (CO_2 kivonás).

Mars a „gyenge” üvegház



A Naptól mért nagyobb távolság és a gyenge üvegházhatás ($\sim 10^\circ C$) miatt az átlaghőmérséklet $-55^\circ C$. Hiányzik a vízfázis, kevés a vízgőz, a légkör ritka, de a légköri CO_2 16-szorosa a földinek. A kicsi, hideg, geológiailag inaktív bolygón a szén-ciklus gyakorlatilag hiányzik. A CO_2 nagy része a kéregben és a fagyott felszínen van.

A napsugárzás 4,5 milliárd évvel ezelőtt a mai 70%-a volt. Hogyan hat a napállandó növekedése a bolygók felszíni hőmérsékletre?

5.1. táblázat. A legfontosabb üvegházhatású gázok fő természetes és antropogén forrásai, az emberi tevékenység hatására bekövetkező koncentráció-változások.

Gázok	Szén-dioxid (CO_2)	Metán (CH_4)	Freon-12 (CF_2Cl_2)	Dinitrogén-oxid (N_2O)
Természetes források és nyelők	Fotoszintézis, Bomlás	Oxigénmentes bomlás (forrás)	-	Nitrifikáció, denitrifikáció
Antropogén források	Tűzelés, ipar, az erdők kivágása	Ríztermelés, Állattenyésztés	Ipari termelés	Műtrágyázás
Ipari forradalom előtt	280 ppm	0,8 ppm	-	0,28 ppm
Jelenleg	365 ppm	1,7 ppm	0,48 ppb	0,31 ppm
Jelenlegi növekedés	0,5 %/év	0,9 %/év	3,2 %/év	0,25 %/év

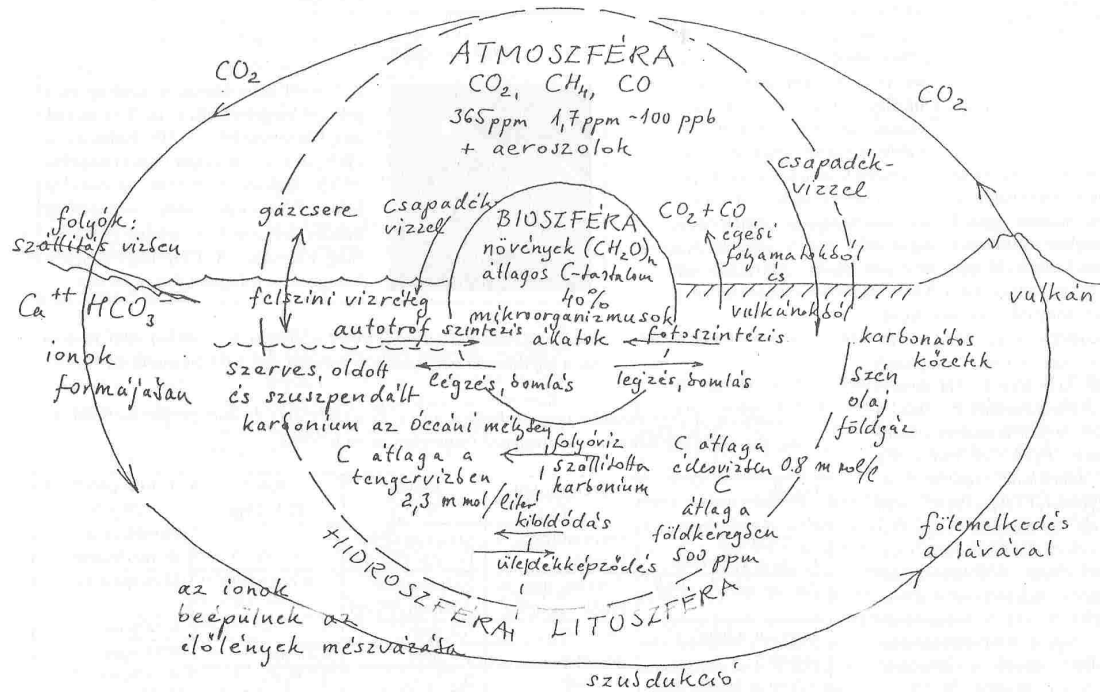
5.5. A legfontosabb biogeokémiai ciklusok

Az elemek, vegyületek biogeokémiai körforgalma alapvető fontosságú az élővilág, a környezet, és végső soron az éghajlat alakításában. A Föld élő és élettelen szférái egységes rendszert alkotnak. A körforgások között kitüntetett szerepe van a víz, a szén és a nitrogén ciklusának. Ezt egészíti ki a foszfor és a kén körforgása. Mind között, pedig az oxigén-ciklus teremt „összhangot”. A körforgások nemcsak a szférák között teremtenek kapcsolatot, hanem egységes rendszerré fűzik a kémiai, a biológiai (fotoszintézis, bomlás, légzés, tápanyagfelvétel) és geológiai folyamatokat (vulkánosság, mállás, talaj- és üledékképződés).

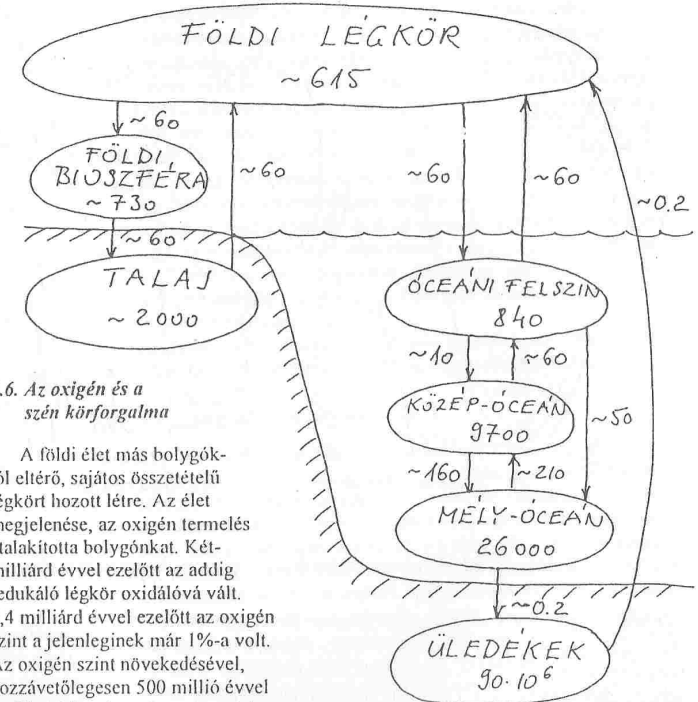
A víz a földi környezet talán legfontosabb vegyülete. Élettele az óceáni élőlényeknek. A fotoszintézis során belőle keletkezik az oxigén. Az oxigén-molekulák egy része a légkörben ózonná alakul, ami megvédi a szárazföldi életet a

Nap káros ultraibolya sugárzásától. Földi világunkban a víz a legfontosabb oldószer. Az oxigén és a szén körforgalmát, a fotoszintézis és a légzés teszi egységes egészzé. Légköri mennyiségüket hosszú távon a mállás és az üledékképződés szabályozza. Az élő szervezetek számára a szén a legfontosabb elem. A nitrogén a biológiai folyamatokban, az aminosavak felépítésében, a szárazföldi és a vízi növények (planktonok) fejlődésének szabályozásában játszik döntő szerepet. Ezen felül a földi légkör legnagyobb összetevője. A kén-vegyületeknek szintén fontos környezeti szabályozó szerepük van. Gondoljunk csak a kén-hidrogént felhasználó baktériumokra, a fehérjékre, vagy a szulfát-aeroszolok jelentőségére (mint cseppképző magvak, illetve az üvegházhatást mérséklő légköri összetevők).

5.3. ábra. A szén biogeokémiai ciklusa. Figyeljük meg az egyes szférák közötti anyagáramokat!



5.4. ábra. Az ipari forradalom előtti szén ciklus sematikus képe. A tározók Pg C egyenértékben, míg az éves kicsérlődő mennyiségek $Pg \text{ év}^{-1} C$ egyenértékben adottak. $1 Pg C = 10^{15} g$, $1 Pg$ azaz 1 peta gramm 1 milliárd tonna szénnek felel meg.



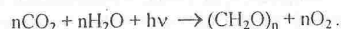
5.6. Az oxigén és a szén körforgalma

A földi élet más bolygótól eltérő, sajátos összetételű légkört hozott létre. Az élet megjelenése, az oxigén termelés átalakította bolygónkat. Kétmilliárd évvel ezelőtt az addig redukáló légkör oxidálónak vált. 1,4 milliárd évvel ezelőtt az oxigén szint a jelenleginek már 1%-a volt. Az oxigén szint növekedésével, hozzávetőlegesen 500 millió évvel ezelőtt kialakult az ózonréteg, biztosítva a szárazföldi élet lehetőségét. Ekkor már az oxigén mennyisége közel volt a jelenlegihez. Más változások is történtek a légkörben. Fokozatosan csökkent a CO_2 . Az elmúlt egymillió évben – az ipari forradalom utáni antropogén tevékenységtől eltekintve – a CO_2 koncentrációja 180-300 ppm között változott. Jelenleg már 365 ppm. Rövid távon a bioszféra (fotoszintézis és lebontás) hosszú távon, földtörténeti léptékben a geológiai folyamatok (üledés, mállás, vulkánosság) kapcsolják össze az oxigén és a szén ciklusát. Nézzük meg hogyan!

A szén kémiája

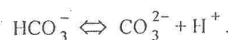
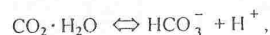
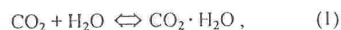
A szén-vegyületek vizsgálata (a szerves kémia) a vegyészet legszélesebb, leginkább kutatott területe. Ez érthető, hiszen az élethez is szorosan kapcsolódik. A szén különböző oxidációs állapotban, számtalan vegyület formájában található. A szén-dioxid (CO_2) oxidációs száma 4, a formaldehid (CH_2O) nulla, az üvegházhatású metán (CH_4) pedig -4. A szén a Földön leginkább stabil oxidációs állapotban – mint légköri szén-dioxid (CO_2), illetve mint mészkő (kalcium-karbonát, $CaCO_3$) – található. A Marson és a Vénuszon is szinte maradéktalanul oxidálódott. A szénhez – elektron-szerkezeti szempontjából – a szilícium (Si) áll legközelebb, ami a földkéreg, a kőzetek és a láva fő alkotóeleme. Részt vesz a geológiai skálájú szén körforgalomban is.

A bioszféra rövid távon a *fotoszintézis* és a *lebontás* (légzés, bomlás) folyamatán keresztül szabályozza a szén, s ezzel együtt az oxigén ciklusát. A fotoszintézis lényege, hogy a fotoszintetizálásra képes baktériumok és növények, a napsugárzás energiáját (hv) felhasználva olyan nagyobb energiatartalmú szén-vegyületeket állítanak elő, amelyek később lebonthatók. Ez biztosítja az élet számára szükséges kémiai energiát, lehetővé teszi bonyolult szervezetek felépítését és működését. A fotoszintézis alapegyenlete:



A fotoszintézis eredménye a molekuláris oxigén (O_2) és a biomassza (CH_2O)_n, ahol n a folyamatról függő sztöchiometriai együttható. A „vizes közegben” keletkező oxigén a „szén-dioxidból származik”. A légzés a fotoszintézissel ellenkező irányú folyamat. Ehhez hasonló reakció megy végbe az oxidatív (aerob) körülmények között történő bomlásnál. Anaerob feltételek mellett a bomlás eredményeként metán is keletkezik. Az elhalt szerves anyagok egy része eltemetődik. E folyamat kivonja a rendszerből a szenet, ami a kevesebb lebomlás miatt az oxigén szint növekedésével jár.

Az *óceánokban* a szén-dioxid oldott állapotban van. A tenger víz pH-ja az oldott gyenge savak erős bázisokkal való semlegesítésének eredményeként alakul ki. A gyenge savak oldják a velük érintkező kőzeteket. Az alkalinitását elsősorban az Al_2O_3 , SiO_2 és CaCO_3 -t tartalmazó kőzetek a felelősek. Összességében a tenger víz pH-ja $\sim 8,4$ – enyhén lúgos. Számunkra a légköri CO_2 elnyeléséből származó szénsav a fontos. A CO_2 oldódását az 1. egyenlet mutatja.



Végezetül lássuk a geológiai időskálát! Hogyan működik a *szilikát termosztát*? Hogy stabilizálódik a légköri CO_2 ? Hogyan vonódik ki a rendszerből a vulkánosságból származó és folyamatosan növekvő szén-dioxid? A folyamat kulcsa a kőzetek mállása.

A mállást a wollasztonit (CaSiO_3) példáján szemléltetjük, ami vulkáni folyamatok során magas hőmérsékleten keletkezik és a magma egyik alkotója. Mállásakor a szén-dioxid elnyelődik:



Nézzük a visszacsatolást! Induljunk ki egy fagyott, hideg földi klímából. A vulkáni tevékenység folyamatosan emeli a légköri CO_2 szintet. A fagyott, havas felszín és óceán gyenge nyelőként viselkedik. Nő az üvegházhatás, melegszik a légkör. A jégsapka visszahúzódása, a kőzetek felszínre kerülése viszont megindítja a mállást; nő az óceán CO_2 elnyelő képessége is. Magasabb hőmérsékleten a bioszféra szénmegkötő képessége is nagyobb. E folyamatok viszont már csökkentik a légköri CO_2 mennyiségét, amit tovább erősíthet az üledékképződés. Beáll egy „dinamikus egyensúly”.

A különböző időskálájú folyamatok vázlatos áttekintése után talán érthetőbbé válik az 5.3. ábra szén-ciklusa, illetve az 5.4. ábrán

közölt számértékek a széntározók nagyságáról és a közöttük levő kölcsönhatásokról. A széntározók és a szénforgalom összevetéséből a szén tározóbeli tartózkodási idejére következtelhetünk. A légköri szén tartózkodási ideje pl. 5 évnek adódik. Jól látszik a több nagyságrendnyi különbség az üledékekben tárolt és a légkörben levő szén között. Jól elválnak a geológiai folyamatok (pl. üledékképződés) és a bioszféra folyamatai mind nagyságrendben, mind a rendszer állapotára gyakorolt hatás tekintetében.

A magyarországi szénmérleg, erdeink szénkészlete

Vázlatosan tekintünk át a hazai szénmérleget, ill. az erdők széntárolását és szénforgalmát! E vizsgálatot nemzetközi együttműködésben végzett méréseken és becslési eljárásokon alapulnak. Az ökoszisztémák állapotát, a légoszlop teljes széntartalmát egyre inkább műholdas megfigyelések alapján határozzák meg, vagyis a világűrrel oly távoli felszíni méréseink (mint pl. Bugacpuszta) referenciaként szolgálnak a műholdas adatok feldolgozásához.

Jelenleg 3 helyszínen folynak szénmérleg mérések hazánkban az EU6 CarboEurope program keretében, többek között a Kiskunsági Nemzeti Park területén, ahol 2006-tól a nitrogén-háztartás komponenseit is tanulmányozzuk (EU6 NitroEurope program). E kutatásokhoz a felszíni információkat (a növényzet állapota, albedó) nagyrészt már a nagyfelbontású műholdas mérések adják.

Forrás/nyelő	Forrás-erősség	Nyelő-erősség
Növényzet	28,8 millió t	57,2 millió t
Emberek és állatok	1,8	-
Talaj	40,9 – 50,0	-
Energia-termelés	15,1 – 16,6	-
Sztratoszféra	-	6,3
Összesen	86,4 – 97,0	63,5

A hazai szénmérleg az 1992-es évről vonatkozó becslés alapján.

A kilencvenes évek elejére vonatkozó becslések szerint hazánk nettó szénkibocsátó. Az energia-termelésből származó kibocsátás egy főre vetítve 1,4-1,8 tonna szén volt, ami közel kétszerese a világszámoknak. Ez az arány lényegesen mára sem változott.

A Erdészeti Tudományos Intézet munkatársai az elmúlt évek kutatásai alapján elkészítették erdeink szénmérlegét. Eredményeik jól illeszkednek a növényzet szénháztartására vonatkozó korábbi becslésekhez.

Éves szénmegkötés [millió t]	Fa	Levélzet	Tuskó, gyökérzet	Összesen
Éves szénforgalom	1,49	2,4	0,97	4,86
Tartósan beépülő	-	-	-	2,04
- faipari termékek	0,91	-	-	-
- erdőben	0,80	-	0,33	-
Éves szén beépülés	3,20	2,40	1,30	6,90

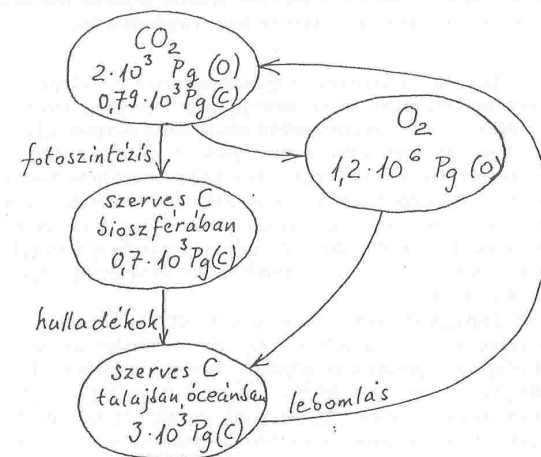
A magyarországi erdők fakészletének éves szénmérlege millió t.

Dendromassza [millió t]	136	Talaj [millió t]	241
-levélzet	3	-avarszint	5
-vágásalap feletti élőfa	87	-humuszos talaj	
-tuskó, gyökérzet	46	40 cm-ig	236

A hazai erdőkben felhalmozott 337 millió t szénkészlet felosztása.

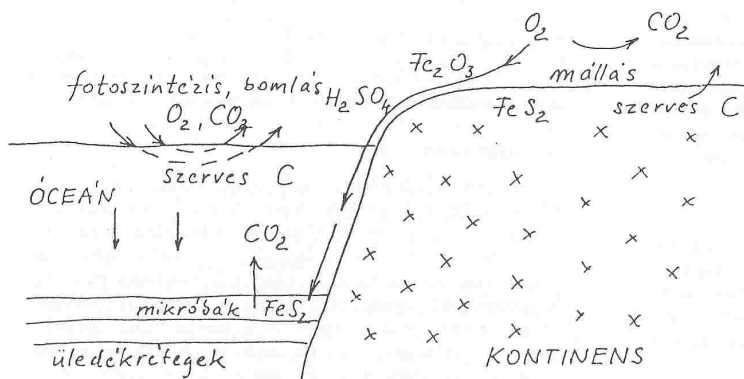
Az oxigén-ciklus

A szén-ciklushoz hasonlóan az oxigén-ciklus vizsgálatánál is két időskálán kell gondolkodnunk. A rövid távú, akár ezer-százezer éves folyamatokat elsősorban a bioszféra alakítja. Ezt szemlélteti az 5.5. ábra. A légkörben $1,2 \cdot 10^6$ milliárd tonna oxigén van, míg az üledékes kőzetek széntartalma ennél egy nagyságrenddel nagyobb. A fotoszintézis évente ~ 315 milliárd t oxigént termel, amit a légzés és a bomlás teljes egészében kiegyenlít. Valamennyi O_2 a víz fotokémiai bomlásából is keletkezik. Kis időskálán elhanyagolható a felszínre kerülő kőzetek oxigént fogyasztó mállása (eloxidálása). Korábban már említettük, hogy az ipari forradalom óta a CO_2 koncentráció közel 30%-kal emelkedett, ami évente $\sim 9,6$ milliárd t oxigén megkötését jelent, ami megdöbbentően nagy érték, de elhanyagolható a fotoszintézishez képest. Ha a teljes fosszilis tüzelőanyag készletet elhasználnánk – ami nyilván képtelenség – akkor is mindössze 2%-a fogyna el a légköri szabad oxigénnek (O_2).



5.5. ábra. Az oxigén-ciklus az egész Földre. 1 Peta gram (Pg) 10^{15} g, azaz 1 milliárd tonna. A fotoszintézis és a légzés különbsége az ökoszisztéma nettó szén-cseréje, angol rövidítéssel: NEE.

Figyeljük meg a szén- és oxigén-ciklus együttes változását, a bioszféra szerepét! Becsüljük meg a légköri oxigén éves cseréjét! Hogy kapcsolódik ez a CO_2 éves légköri kicserélődéséhez? A becsléshez használjuk fel a légköri CO_2 és O_2 tartózkodási idejét!



5.6. ábra. A litoszféra oxigén-ciklusa – millió éves változások. Fe_2O_3 és a H_2SO_4 mikrobiális redukciója FeS_2 -vé az óceáni üledékekben. Jelenleg az üledék mennyisége $1,2 \cdot 10^7$ Pg org C (szerves szén). Mennyi oxigén szabadult fel az eltemetett szerves üledék képződése során az elmúlt geológiai időszakban, ha az üledékben levő minden C atomra $1 O_2$ molekula keletkezése jutott? Hol van a keletkezett oxigén, hisz ennyi nem lehet a légkörben?

Az emberi tevékenység „nagy szerencsénkre” nem képes lényegesen befolyásolni az O_2 mennyiségét. A bioszféra azonban sérülékeny. Szervesanyag-tartalma mindössze 20-szorosa a fotoszintézis által termelt évi mennyiségnek. A táplálék a bőséges oxigén- és vízkészlet ellenére is csak kis mennyiségben áll rendelkezésre. Az oxigén a vizekben oldott állapotban van. A vízfelszín és a légkör közötti O_2 kicserélődés erősen függ a környezeti tényezőktől, pl. a hőmérséklettől, vagy az óceáni keverő mozgásoktól, áramlásától. Az oxigénellátás a vízi ökoszisztémák egyik kritikus eleme.

Geológiai időskálán (5.6. ábra) az üledékképződés, a szerves anyagok betemetődése a légköri O_2 szint emelkedéséhez vezet. A növekvő O_2 mennyiséget a bomlás (aerob környezetben), ill. a kéregmozgásoktól és a felszíni hatásoktól függő mállás során bekövetkező oxidációs folyamatok (pl. vas, kén) csökkentik. Az egyensúly néhány millió éves időskálán jelentősen megváltozhat. A szárazföldi élet megjelenésével – az elmúlt 600 millió évben – meglepően stabilnak bizonyult az oxigén szint (a vártnál kisebb fluktuációkkal változott).

5.7. A nitrogén biogekémiai körforgalma

A nitrogén a bioszféra számára létfontosságú elem. Az aminosavak alkotó eleme. A foszforral együtt az egyik limitáló tényezője a szárazföldi és a vízi növények fejlődésének.

A nitrogén a földi légkör legfontosabb összetevője, mennyisége $3,9 \cdot 10^6$ milliárd t, tartózkodási ideje ~ 1-10 millió év. Légköri kicserélődése évente ~ 0,4-4 milliárd t; százada, ezrede az oxigénnek. A nagyon stabil, N_2 átalakítását, megkötését a bioszféra speciális életközösségben élő baktériumai végzik (5.7-5.8. ábra). Ammóniát (NH_3) termelnek, amit a nitrifikáló baktériumok, illetve gazdanövényeik (gondoljunk csak a pillangósokra, a lucernára, vagy a kertünkben levő borsóra) alakítanak át szerves nitrogénné, ami más növények és állatok számára biztosítja a táplálékforrást.

A baktériumok termelik az ammóniumot (NH_4^+). Ez a nitrifikáló baktériumok oxidációs energiatermelésének kiindulása. Ezt alakítják át nitrít- (NO_2^-) és nitrát- (NO_3^-) ionokká.

A nitrát a talaj „mobil” ionja, amit a növények és a baktériumok felvesznek és beépítenek a szer-

5.7. ábra. Az ammónia képződése, a nitrifikáció és a denitrifikáció. (Savas közegben az ammónia protont vesz fel és NH_4^+ ammónium-ion formájában van jelen)

NH_3	NH_2OH	N_2	N_2O	NO_2^-	NO_3^-
-3	-1	0	+1	+3	+5

5.8. ábra. A nitrogén különböző (-3, +5) oxidációs állapotai. A külső elektron-pályán 5 elektron helyezkedik el.

vezetükbe. Az energiatermelésnek – oxigénhiányos környezetben – egy másik formája is van. Ez a denitrifikáció. Energiaforrása a talajba, illetve az üledékbe eltemetett nitrát. Ezt bontják le a baktériumok, s visszajuttatják az N_2 -t a légkörbe. E folyamat egyik „mellékterméke” az üvegházhatású dinitrogén-oxid (N_2O). A nitrogén-vegyületeknek légköri forrása is van. A kémiai átalakuláshoz magas hőmérséklet kell. Az égetés és a villámlás hatására nitrogén-oxid (NO) keletkezik, ami részben tovább oxidálódik, részben vízgőz jelenlétében salétromsavvá (HNO_3) alakul, ami a csapadékkal kimosódik a légkörből.

Az Országos Meteorológiai Szolgálat villámdetektáló rendszere, az időjárás-megfigyelés és a balatoni viharjelzés fontos eszköze; alkalmas a zivatarok során (villámlás) keletkező NO becslésére is.

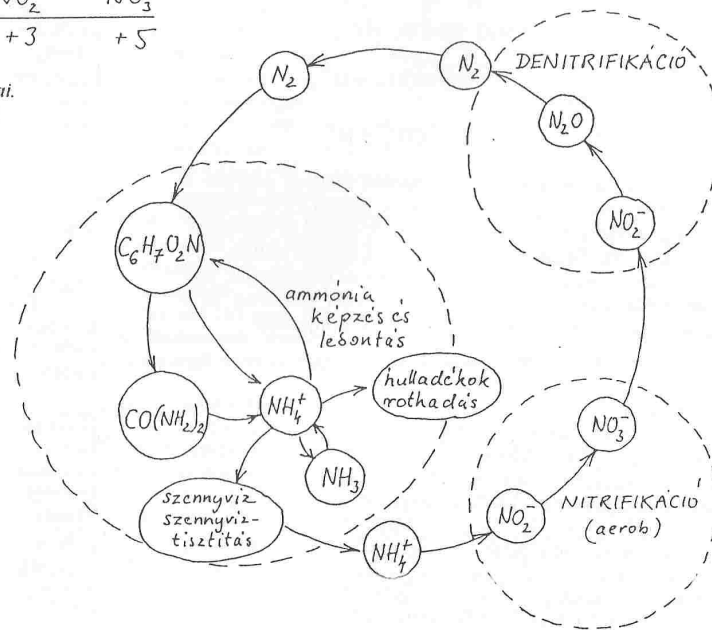
Az emberi tevékenység hatására – N-tartalmú műtrágyák (NH_4^+), közlekedés, az ipar energiatermelés (NO_x) – a természetes forrásokkal összemér-

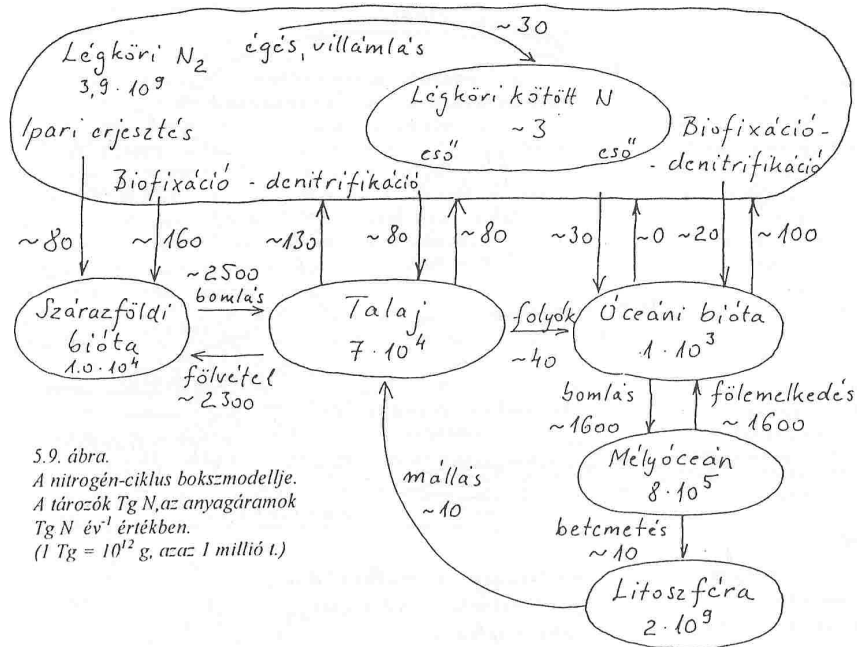
hető mennyiségű nitrogén-vegyület kerül a légkörbe (5.9. ábra), ami a növényzet számára egy pótlólagos, nem várt nitrogénforrásként jelentkezik, s kárt okozhat a természetes vegetációban.

Az óceánokban több formában találkozhatunk a nitrogénnel. Az N_2 oldott állapotban van, mennyisége azonban kevesebb mint 1%-a a légkörben levőnek. Jelentős az óceán nitrát-ion (NO_3^-) tartalma. A szerves nitrogén döntő többsége – a szárazföldi környezethez hasonlóan – az elhalt szervezetekben és a belőlük átalakult szerves anyagban található. Ehhez képest az élő óceáni bioszféra kevés szerves-nitrogént tartalmaz.

Az egyes tározókban levő nitrogén mennyiségét és a közöttük levő anyagáramlást az 5.9. és az 5.10. ábra szemlélteti. A legfontosabb felszíni folyamatok a nitrogén-megkötés, a denitrifikáció és az N_2 vízben való oldása. Ehhez kapcsolódik a folyóvizek nitrogén-szállítása, illetve az üledékképződés.

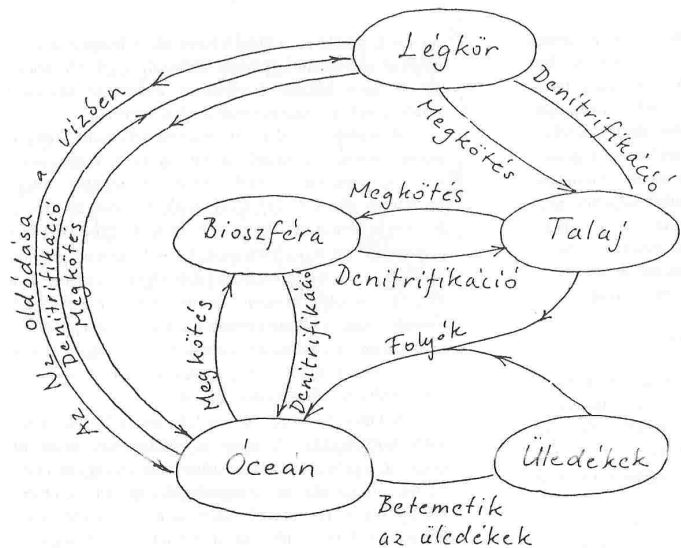
Két nagy tározó van: a légkör és a litoszféra. A légköri N_2 mennyisége a mai érték alig másfél szerese lenne, ha a litoszférában tárolt teljes mennyisége oda kerülne. A légköri N_2 nagy része már 4 milliárd évvel ezelőtt is ott volt. A legnagyobb anyagáramlás a bioszféra és a talaj, illetve az óceáni bioszféra és a mélyóceán között figyelhető meg.





5.9. ábra.
A nitrogén-ciklus boksmodellje.
A tározók Tg N, az anyagáramok
Tg N év⁻¹ értékben.
(1 Tg = 10¹² g, azaz 1 millió t.)

5.10. ábra. A nitrogén-ciklus. A fontosabb tározók és folyamatok.
A szárazföldi és az óceáni bioszféra együtt van ábrázolva.



A nitrogén természetes (antropogén tevékenység nélküli) légköri tartózkodási idejét légköri tömege és az évi kicserélődő mennyisége alapján becsülhetjük. Ennek értéke:

$$3,9 \cdot 10^9 / (80 + 160 + 30 + 20) \approx 13 \text{ millió év.}$$

Megjegyezzük, hogy az összes nem N₂ és N₂O légköri nitrogén tömege hozzávetőlegesen 2 Tg. Érdekes adat az is, hogy a szárazföldi növények N tartalma (10⁴ Tg) legalább egy nagyságrenddel meghaladja a vízben élőket. A szárazföldi és a vízi állatokban összességében ugyanolyan nagyságrendű, ~10² Tg nitrogén van.

Az 5.9. ábrából az is kiderül, hogy egy nitrogénmolekula átlagosan 10-szer járhatna végig az óceán-légkör-óceán körforgást, míg el nem temetődne a litoszférában. Ha figyelmesen nézzük az ábrát észrevehetjük, hogy az egyes szférák közötti anyagáramok nem minden esetben egyenlítik ki egymást. Ennek oka az egyes tagok becslésében rejlő bizonytalanság, a tározók és a kicserélődő mennyiségek közötti nagyságrendi különbségek, valamint az antropogén hatásokból származó bizonytalanság (pl. a bioszféra össztömegének becslése, esetleges változása). A légkör nagy N₂ tartalma és a kis évi kicserélődés becslési bizonytalansága miatt az N₂ tartózkodási idejére 1-10 millió éves



„Az ezeréves tölgy” Zsennyén.

Határozzuk meg az 5.9. ábra alapján az egyes nagy tározókban levő nitrogén tartózkodási idejét és hasonlítsuk össze a szénével (5.4. ábra)!

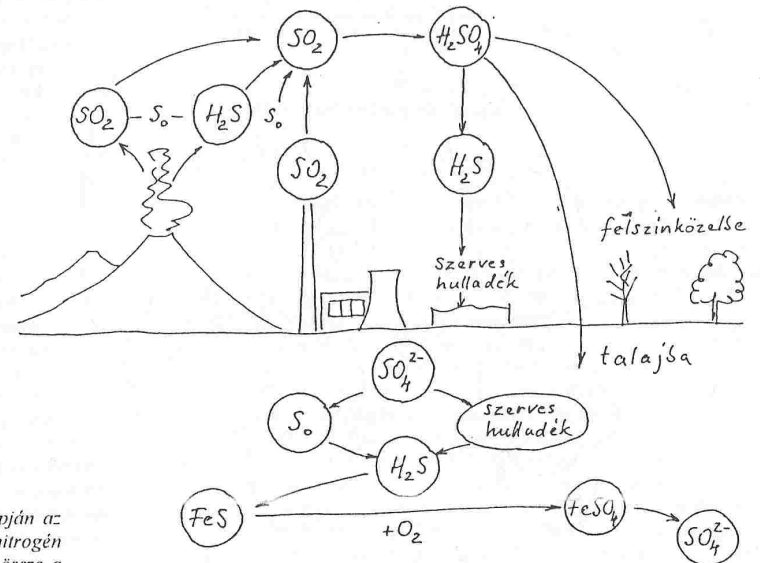
értékekkel találkozhatunk. A nitrogén-háztartás megértése további kutatásokat igényel.

5.8. A kén-körforgalom

A kén a földkerekség tizennegyedik leggyakoribb eleme. Fontos szerepe van a környezeti folyamatok szabályozásában, az élő szervezetek felépítésében (fehérjék). Mind redukált (pl. kén-hidrogén, H₂S) mind oxidált formában megtalálható. Antropogén forrásai közül az ipari termelés és a fűtés a legfontosabb.

A légkörbe kerülő biológiai és vulkáni eredetű kén-gázok (pl. SO₂) kénsavvá oxidálódnak. A szulfát részecskék (SO₄²⁻) megtalálhatók a légkörben (aeroszol), de fontos szerepet játszanak a talajban, és az óceánokban is. Felelősek az élővizek savasodásáért. Befolyásolják a csapadék pH-ját. Semlegesítődésként a légkörben, illetve a talajban levő pozitív ammónium ionok koncentrációjától függ. A kénvegyületek – növelve a környezet savasságát – fontos szerepet játszanak a mállási folyamatokban is (5.11. ábra).

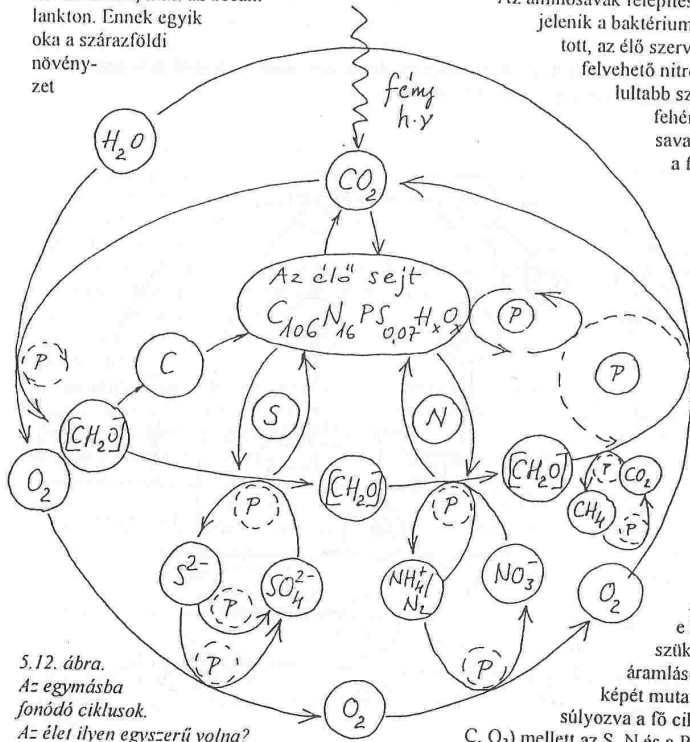
5.11. ábra. A kén-ciklus. A természetes és az antropogén eredetű kén-vegyületek forrásai, nyelői és legfontosabb reakciói.



5.9. A foszfor-ciklus

Az elemek, vegyületek földi biogeo-kémiai körforgalmának bemutatását a foszforral (P) zárjuk. Meghatározó szerepe van a bioszféra felépítésében (fehérjék, nukleinsavak). A nitrogénnel együtt szabályozza a növények növekedését. A légkörben nagyon kis koncentrációban fordul elő. Egyetlen természetes forrása a talaj eróziója. A foszfort tartalmazó talajszemcsék azonban – méretüknél fogva – nagyon hamar kiülepednek. Átlagos tartózkodási idejük 5 óra.

Legfontosabb tározója az üledékes kőzetek után a talaj, illetve a mélyóceánok. A talaj átlagos foszfortartalma, 0,1%. Egy-egy P-atom átlagosan 1000 évet tölt a talajban. A szárazföldi bioszférában a foszfor-nitrogén arány 1,8/16, amiből a P mennyisége kiszámítható. Megjegyezzük, hogy a szárazföldi növények összességében 30-szor annyi P-t tartalmaznak, mint az óceáni lankton. Ennek egyik oka a szárazföldi növényzet



5.12. ábra. Az egymásba fonódó ciklusok. Az élet ilyen egyszerű volna?

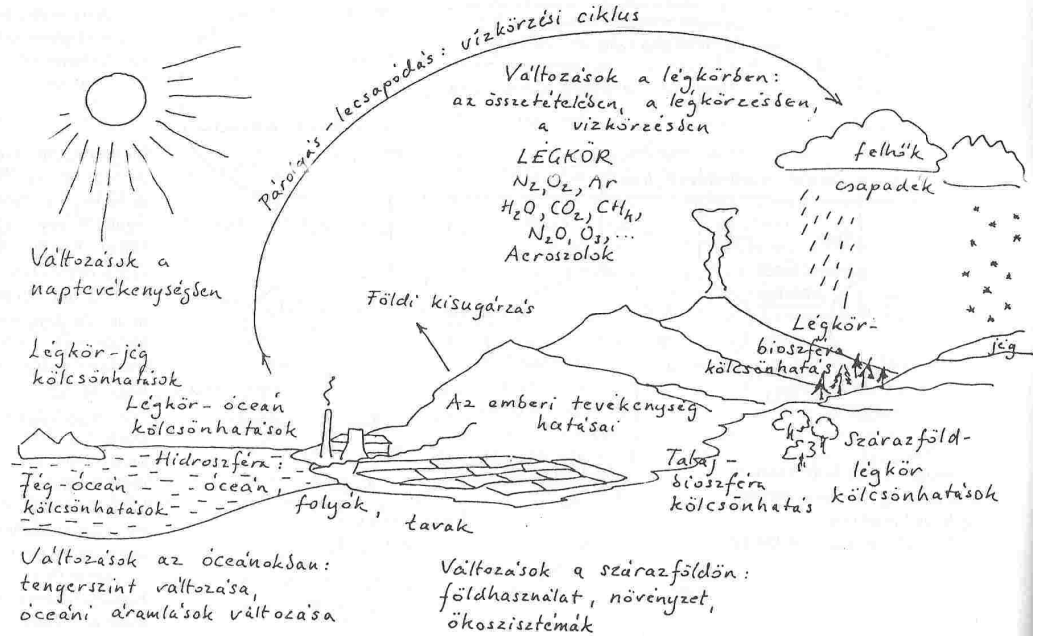
(mint pl. az erdők) hosszabb élettartama. Fontos műtrágya és mosószer alapanyag. A kibányászott foszfor évi mennyisége ~12 ezer tonna, ami végül is a talajba, ill. a vizekbe kerül. Ez jelentős mennyiség. Hozzávetőlegesen 6-7%-a a szárazföldi élővilág P forgalmának, illetve ~2,5-szer akkora mint a légkörbe kerülő foszfor évi mennyisége. A túlzott foszfor felhasználás – pl. a növényi növekedés szabályozásán keresztül – bizonyos zavarokat okozhat a szárazföldi és a vízi ökoszisztémákban.

5.10. A anyagciklusok egymásba ágyazódása, az élő szervezet

Az élethez szükséges elsődleges energiát a fotoszintézis szolgáltatja. Baktériumok, és a növények a Nap energiáját használják fel szerves anyagok felépítéséhez. Talán a legismertebb energiatároló a cukor-molekula.

Az aminosavak felépítésében már megjelenik a baktériumok által előállított, az élő szervezetek számára felvehető nitrogén. A bonyolultabb szerves anyagok, fehérjék és nukleinsavak felépítésében a foszfor és a kén is fontos szerepet kap. Az egymásba kapcsolódó anyag-áramok lehetőséget adnak egy máig sem teljesen ismert új dimenzió, az élet megszületésének.

Az 5.12. ábra e körforgáshoz szükséges anyag-áramlások sematikus képét mutatja be. Hangsúlyozva a fő ciklusok (H₂O, C, O₂) mellett az S, N és a P fontosságát.



5.13. ábra. Az éghajlati rendszer sematikus rajza. A folyamatokat és kölcsönhatásokat a vékony nyilak, a változásokat, kényszerhatásokat a vastag nyilak jelölik.

A Föld-légkör rendszer anyag- és energiaáramlása, a geokémiai ciklusok az „élő szervezethez” hasonlóan visszacsatolások sorozatán át képesek fenntartani a rendszer állapotát, csökkenteni entrópiáját. Lovelock 1979-ben publikált, mára széles körben ismert Gaia hipotézise szerint a bioszféra és a geoszféra egyenrangúak az egységnek a részei. Nemcsak elviselik a környezeti hatásokat, hanem képesek azokat szabályozni, aktívan visszahatni, illetve alkalmazkodni hozzá, mintegy optimális szinten tartva a környezetet az élet számára. E gondolat nincs ellentétben a változás lehetőségével, az evolúcióval.

5.11. Az éghajlati rendszer és változásai

Az előző részekben megismerkedtünk a nagy földi ciklusokkal. Most térjünk vissza az alapokhoz! Tekintsük át az éghajlati rendszert, nézzük meg az üvegházhatású gázok és a hőmérséklet múltbeli folyamatait és lehetséges jövőbeli antropogén eredetű változásait!

Éghajlati rendszerként a légkör és a vele érintkezésben álló négy felszíni geoszféra – a hidrosz-

féra a krioszféra, a talajfelszín és a bioszféra által alkotott interaktív együttest definiáljuk (5. 13. ábra). Az éghajlat tágabb értelemben ennek az összetett rendszernek a szokásos viselkedési formája.

A légkör az éghajlati rendszer központi komponense, annak leginkább instabilis és a legnagyobb változékonyságot mutató része. A légköri üvegházhatású gázok (CO₂, CH₄, N₂O, freonok és az O₃) bár teljes térfogatuk kevesebb, mint a légkör 0,1%-a – alapvető szerepet játszanak a rendszer energiaháztartásában. A legváltozékonnyabb légköri összetevő a vízgőz, amely szintén természetes üvegházgáz. További fontos alkotóelemek a szilárd és cseppfolyós részecskék (aeroszolok), valamint a felhők, amelyek mind a beérkező, mind a kimenő sugárzásátvitellel bonyolult kölcsönhatásban állnak.

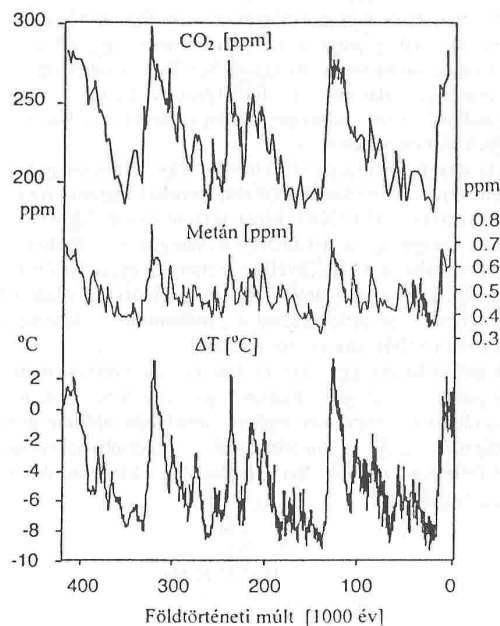
A hidroszféra az összes felszíni és felszín alatti vizet tartalmazza. A nagy a hőkapacitás miatt az óceánok egyben hatalmas hőtárolók is; így a lassú óceáni vízkörzés (a világméretű „óceáni szállítószalag”) a teljes meridionális hőátvitel közel felét bonyolítja. Fontos részese a globális energiagyen-

súly kialakításának. Például a 10 km h^{-1} sebességű Golf-áramlás ~ 55 millió $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ meleg és sós vizet szállít észak felé. Mintegy 5 fokkal melegítve a környezetét – létrehozója Nyugat-Európa csapadékban gazdag, enyhe telű óceáni éghajlatának. A globális óceáni szállítószalag Atlanti-óceán északi peremén elhelyezkedő lezálló ága a légköri szén-dioxid kitüntetett nyelője.

A *krioszféra* a Föld édesvíz-készletének 80%-át tartalmazó grönlandi és antarktisi jégmezők, a kontinentális gleccserek, a felszíni hótakaró és a tengerjég alkotják. Jelentőségét a rendszerben nagy albedója (sugárzás-visszaverő képessége), termikus tehetetlensége, alacsony hővezető képessége, továbbá a mélytengeri cirkuláció kormányzásában játszott szerepe biztosítja.

A *kontinentális felszín* vegetációja és talajállapota határozza meg az albedót. A felszín alakjától és borítottságától függő érdeség dinamikailag hat a légmozgásokra, az időjárási folyamatokra.

A *bioszféra* az élet színtere. Az a szerveződési szint, amely magába foglalja az élőlényközösséget kölcsönhatásaikkal és az anyagmozgásokkal együtt. Jelentősen befolyásolja az üvegházgázok biokémiai körforgalmát, mindemellett a légkör és az óceán szén-dioxid háztartását; hatással van az aeroszol-képződésre is.



5.14. ábra. A szén-dioxid, a metán és a hőmérséklet változása az elmúlt 400 ezer évben. Figyeljük meg a hosszú glaciálisok és a rövid meleg időszakok periodikus váltakozását!

Az éghajlati rendszer komponensei között különböző tér- és időskálákon számos fizikai, kémiai és biológiai kölcsönhatás alakul ki. Ezek eredménye a klímaállapot természetes belső változékonysága. Az időskála növelésével mind markánsabbá válik a légkör állapotának visszahatása a hosszabb igazodási idejű szférák állapotára: az egyirányú hatás (éghajlati kényszer) helyébe a *kölcsönhatás* lép. Egy példát említve: az óceán felszíni hőmérsékletének már kialakult anomáliái az egy hónapos nagyságrendű időskálán a légkör havi középhőmérsékletének változását előidéző külső kényszer szerepét játsszák. A trópusi óceánok vízének melegedése megnöveli a trópusi ciklonok pusztító erejét is.

Hosszabb időskálákon viszont a légkör hőmérséklete és a felszíni vízhőmérséklet már egymással kölcsönhatásban alakul. Ennek a légkör-óceán kölcsönhatásnak az egyik jellegzetes megnyilvánulása az óceán vízének Dél-Amerika nyugati partvidékénél időszakosan (2 és 7 év közötti periódusidővel) bekövetkező nagymértékű felmelegedése, az El Niño-déli oszcilláció (ENSO) néven ismert jelenség, amely aztán különböző távkapcsolatok útján az egész globális éghajlati állapotra jelentős hatást gyakorol. A légkör-óceán kölcsönhatás szerepet kap Európa klímájának kialakításában is, elsősorban a télen.

5.12. Hírek az üvegházból. Milyen volt?

A jégmezők mélyebb rétegeibe záródott levegőbuborékok kémiai analízise régmúlt korok légkörének összetételét tárja elénk, a jégben levő oxigénizotópok (O^{18} és O^{16}) aránya pedig az összetételhez tartozó hőmérsékletet adja meg. Az 5.14. ábra az elmúlt 400 ezer év éghajlati történetét mutatja be két üvegházhatógáz (CO_2 , CH_4) és a hőmérséklet változásain keresztül antarktisi jégminták alapján. Hasonló eredményeket szolgáltattak a grönlandi mélyfúrások is. A főmegállapítás, hogy az éghajlat és a levegő összetétele, illetve az összetételt szabályozó bioszférikus folyamatok, szoros kölcsönhatásban változtak.

Az utolsó jégkorszak végén, 20 ezer évvel ezelőtt pl. a CO_2 és a CH_4 légköri koncentrációja 200 ppm, illetve 0,4 ppm volt szemben az ipari forradalom előtti 280 ppm és 0,8 ppm értékkel. A jégkorszak utáni hőmérsékletemelkedés megdöbbentően nagy, majd 10°C -os volt és alig ezer év alatt játszódott le. A hőmérsékletemelkedéshez gyorsan növekvő CO_2 és CH_4 koncentráció társult. A három adatsor nagyon szoros kapcsolatban áll egymással. Az éles hőmérsékletemelkedések hozzávetőlegesen 100 ezer évenként követték egymást. Az emelkedő szakaszok sokkal gyorsabbak voltak, mint a csökkenők. Érdekes, hogy az elmúlt 10 ezer évben a korábbiakhoz képest meglepően sokáig tart – a 130 ezer évvel ezelőttihez hasonló – magas felszíni hőmérséklet.

Elemezzük a jégmintákban a szulfát aeroszol részecskék mennyiségét is. Ez a várakozásnak megfelelően (hisz a besugárzás csökkentésén keresztül mérsékli a felmelegedést) az üvegházgázokkal ellentétesen változott. Nagy értékek glaciálisok idején fordultak elő. A jégkorszakok kialakulásának megmagyarázása a tudomány nagy kérdései közé tartozik. De ugyanígy válasra vár a jövőnk, a lehetséges változások becslése.

Mi várható?

Egy biztos, a üvegházhatású gázok koncentrációjának növekedése, a környezet megváltoztatása kockázattal jár. A tudomány feladata e kockázat becslése. A döntéshozók felelőssége pedig a kockázat mérséklése. A modellszámítások megegyeznek abban, hogy az üvegházhatású gázok koncentrációjának megduplázódása ($2\times\text{CO}_2$) a Földi hőmérséklet $3\text{--}5^\circ\text{C}$ -os emelkedésével járhat.

Az óceáni cirkulációt, a nagy óceáni szállítószalag működését azonban nem ismerjük kielégítően. Ennek változása, pl. a Golf-áram gyengülése a földi átlaghőmérséklet csökkenésével is járhat. Két dolgot azonban nem árt leszögezni. Egy ilyen változás nem holnap lesz, s az éghajlat megváltozásához az első lépés – akár a következő nemzedék életében is – a felmelegedés lehet.

A globális modellszámítások eredményeit dinamikai és statisztikai módszerekkel regionalizálják. Ez a leskálázás.

Számba vették egy lehetséges globális éghajlatváltozás magyarországi hatásait is (5.2. táblázat). Növekvő évi középhőmérséklettel és csökkenő csapadék mennyiséggel számolhatunk. Nő az aszályhajlam. Kutatások folynak az extrém időjárási helyzetek (szélsőségek) lehetséges megváltozásával kapcsolatban is.

Globális változás	$+0,5^\circ\text{C}$	$+1^\circ\text{C}$	$+2^\circ\text{C}$
Helyi változás			
Hőmérséklet: nyár/nyári félév	$+1,0^\circ\text{C}$	$+1,3^\circ\text{C}$	$+2^\circ\text{C}$
Hőmérséklet: tél/téli félév	$+0,8^\circ\text{C}$	$+1,7^\circ\text{C}$	$+3^\circ\text{C}$
Csapadék: évi összeg	-40 mm	-65 mm	bizonytalan

II. táblázat. A hőmérséklet és a csapadék várható változása hazánkban adott globális melegedés esetén.

5.13. Miért foglalkozunk annyit a Földdel? Hogy kapcsolódnak a földi biogeokémiai ciklusok a planetológiához?

A Föld része a Naprendszernek, annak egyik bolygója. Mindenütt ugyanazok a fizikai és kémiai törvények érvényesek. Más bolygókon „egyszerűsíti a helyzetünket” az oxigén és a víz hiánya, de nehezíti a távolság, a mérések kis száma. Nem kell számolnunk a bioszférával, az étellel – bár szeretnénk valahol megtalálni. Ugyanazokat az okokat, magyarázó tényezőket kell keresnünk, hogy leírjuk a folyamatokat, legyen az a Mars szén-ciklusa, vagy a Vénusz kén-körforgása (pl. annak megértése, hogy a pirit miért instabil e bolygó felszínén). Ehhez tanulmányozni kell a sugárzási folyamatokat, a légkör szerkezetét és áramlásait, a potenciális kémiai reakciók körét, az ülepedést, a mállást, a kéregmozgásokat, vagy a vulkánosságot. El kell különíteni a rövid és a hosszú időskálájú folyamatokat.

VI. VÍZ - AMMÓNIA TÜKÖR AZ AMINOSAVAKNÁL

A földi sejt alapú élet alapegységei az aminosavak. Az aminosavakra jellemző sokoldalúságot megmagyarázhatjuk, ha megkeressük azokat a primordiális folyadékokat, amelyek oldószereik lehetnek. Két ilyen folyadék van: a víz és az ammónia. Mindkettő jó oldószer, de az aminosavak más gyökeiket használják, amikor a folyadékokban létrejövő reakcióknál a kémiai sajátosságukat kialakítják. Ezért az aminosavak „Janus-arcú” vegyületek, melyek gyökei ellenpároként találhatók meg a „vizes világban” és az „ammóniás világban”.

Az aminosavak kétarcúsága a vizes világ és az ammóniás világ között egy bizonyos szimmetriaként is felfogható. Ez a szimmetria akkor válik észrevehetővé, amikor az aminosav molekulákat körülvevő folyékony oldószert átváltjuk vízről ammóniára vagy fordítva. Az aminosav molekulák jellemző gyökei közé tartoznak a hidroxil, a karboxil, az amin és az amid gyökök is. Sok reakcióban ezek a gyökök a vízzel és az ammóniával hasonló módon reagálnak. A földi élet azonban nem V-A szimmetrikus.

6.1 A szerves kémia alapjai

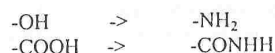
Kis atlaszunknak ebben az utolsó epizódjában felmérjük bizonyos szerves vegyületek keletkezésének kémiai lehetőségét egy „A” kémiában (ahol az „A” ammóniát jelent oldószerként). E gondolatmenet során azt is szeretnénk megállapítani, hogy ezek a folyamatok mennyire lehetnek természetesek akkor, ha a „V” kémiában jelentős mennyiségű NH_3 is jelen van (a „V” vizet jelent oldószerként). A biokémia bizonyos részei rendkívül bonyolultak. Amint látni fogjuk azonban, a biokémia alapvetően a szerves kémiából ered. Ezek a kezdeti lépések egyszerűek, és könnyen megérthetők. Azt, hogy a keletkezett molekulák beépülnek-e az élőlényekbe, a természetes kiválasztás folyamata és más összetevők, pl. enzim hatások, stb. döntötték el.

A szerves kémia módszeres bemutatásához általában a metánból indulunk ki, vagy általánosabb módon a $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$ paraffin sorozatból, és számba vesszük a többi egyszerű és alapvető vegyületet, mint a H atomok helyettesítésével létrejövő származékokat. Nem minden illeszkedik simán ebbe az „osztályozásba”, de ezzel a módszerrel elég messzire eljuthatunk.

A továbbiakban minden lépésnél megadunk egy „tükör” formulát a hipotetikus szerves „A” kémiához. Meg kell

jegyezni, hogy az ammónia-alapú szerves kémia még nincs olyan részletességgel kidolgozva, mint a vizes kémia. Az általunk megemlített tükörmolekulák viszont léteznek, és a vegytanban jól ismertek. A $-40\text{ }^\circ\text{C}$ hőmérsékletű NH_3 esetén várható reakciósebességek, egyensúlyi arányok, stb. viszont többnyire ismeretlenek.

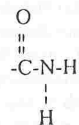
A tükör-molekulák megállapítására használt szabályok eléggé egyszerűek. Csak a bázis és a szerves-sav gyökök változnak a következők szerint:



Ebben a fejezetben az ilyen kapcsolatos elvégzett „átcserelési” műveleteket V-A tükrözésnek nevezzük. A szerves savnak a földi vizes kémiában általában nem a szerves kémiából ismert egyszerű -H gyöke van, hanem -COOH karboxil gyöke, mivel a paraffin láncok eléggé apolárisak, ezért egy H ion nemigen válik le egy paraffin szénatomjáról. A -COOH karboxil csoportnak a szerkezete megközelítőleg a következő:



s ez tartalmazza a könnyen leváló -H atomot. Most nem foglalkozunk azzal, hogy ez a bonyolult gyök miért hatékony H donorként. A -COOH karboxil csoportnak a legtermészetesebb megfelelője a V-A „tükörben” -CONHH, vagyis az amid csoport:



Később mutatunk példákat arra, hogy ilyen csoportot tartalmazó molekulák valóban léteznek. A kémiában másutt is előfordul az O atom és az NH imino gyök közötti kvantummechanikai és vagy kémiai analógia. (Az összehasonlított molekulák másik O atomja változatlanul marad.)

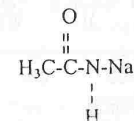
A szimmetria észrevehetővé tételéhez olyan elrendezésben mutatjuk majd be az egymással V-A „fölcserelési” viszonyban lévő molekulákat, amely kiemeli a V kémia és az A kémia közötti „tükörszimmetriát”. Megjegyezzük azonban, hogy a szerves kémia nevezékét a V kémiára határozták meg.

Ezért az analógiák nincsenek meg a megfelelő párt képező „aquo” ill. az „amino” molekulák között, hanem csak a C és N atomokban, illetve metánban és ammóniában. Ezért bizonyos nevek nem illeszkednek a rendszerbe, amit végig szem előtt kell tartanunk. Megjegyezzük azt is, hogy ismertek bizonyos molekulák, amelyekben az oxigént teljes mértékben aminosavak helyettesítik. Időnként csak ezeket az analógokat említjük meg. Kezdjük a metánnal. Nem tartalmaz O és N atomot, ezért független az oldószertől; és sem a víz, sem az ammónia nem oldja hatékonyan. A paraffin sorozat többi tagja is hasonló, de az egyszerűség kedvéért maradjunk az első tagnál. Metánból kialakíthatunk egy (vizes) szerves gyököt, ha egy H atomot egy -OH-val helyettesítünk. Az így nyert molekula egy alkohol, esetünkben a metilalkohol, CH_3OH . A hosszabb szénláncú alkoholok nem nagyon oldódnak vízben, ezért az -OH gyöktől várható sajátosságuk, „lúgos természetük” nem nagyon jelentkezik. A szerves savakkal történő reakciókban azonban vízkilépéssel reagálnak, amit felfoghatunk egy speciális semlegesítési reakciónak.

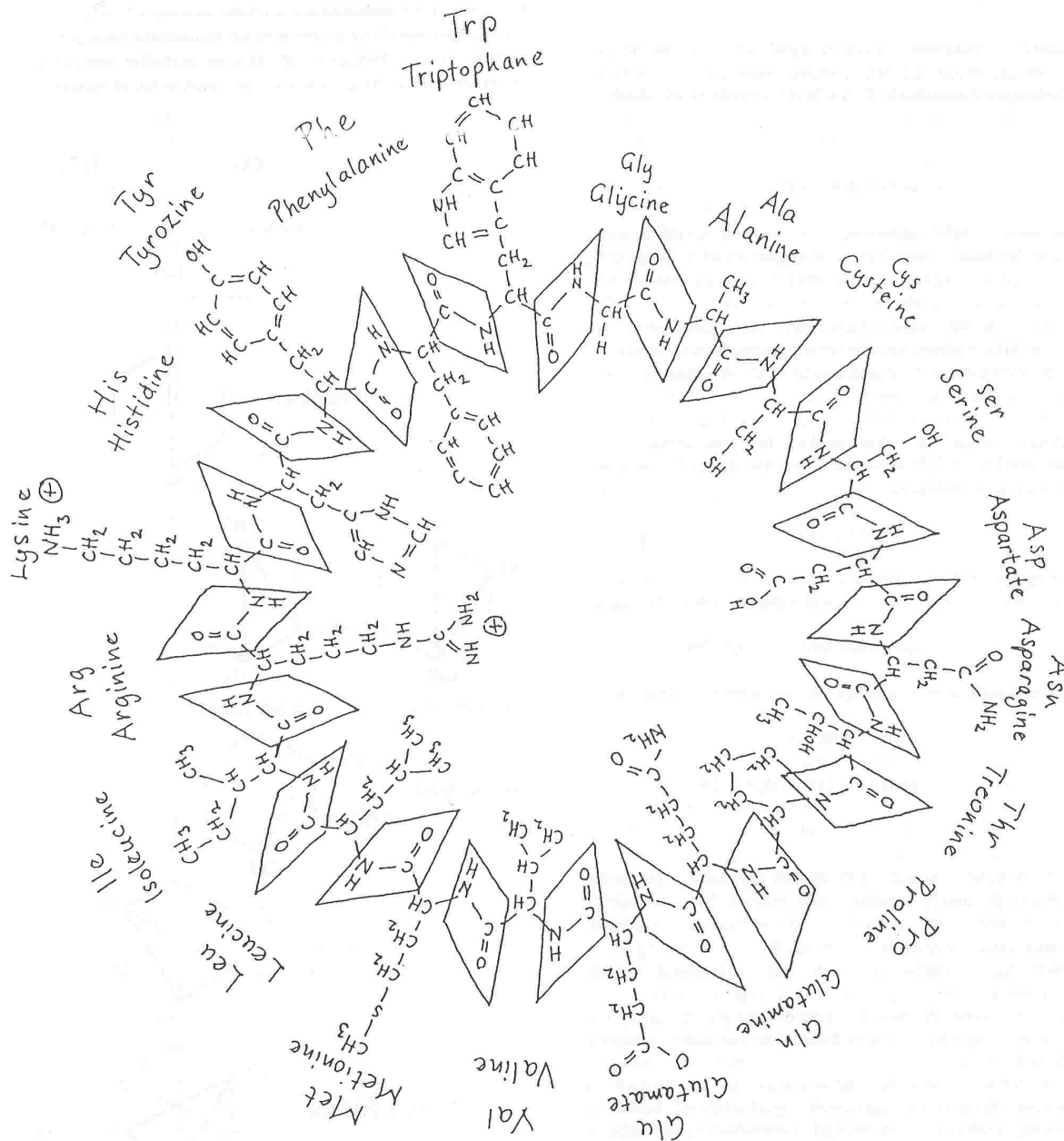
A metilalkoholnak a bemutatott V-A fölcserelés szerinti ammóniás analóg párja a CH_3NH_2 , amely egy jól ismert molekula, a metil-amin. Növényekben (Mercurialis perennis & annua), valamint a feldolgozott hering levében megtalálható. Vizes savakkal bizonyos szerves sókat alkot, amelyek vízben oldhatók.

Ha egy paraffin egy -H atomját egy karboxil gyökkel helyettesítjük, akkor szerves (vizes) savakat kapunk. Az első tag az ecetsav, CH_3COOH . Most viszont egy nulladik tag is létezik, mégpedig a HCOOH , a hangyasav. Ezeknek a tükörmolekulái a CH_3CONHH , acetamid, és a HCONHH , formamid. Ezek a vegyületek mesterséges ipari termékek. (Az O teljes helyettesítésével acetamidin keletkezik, $\text{CH}_3\text{C}(\text{NH})(\text{NHH})$, ami szintén létezik.)

Kipróbálhatjuk egy szerves sav és egy szerves bázis semlegesítő reakcióját. Vízben egy egyszerű reakció a nátriumhidroxid + ecetsav reakció, amelyben nátrium-acetát keletkezik. A tükörbázissal nátrium-acetamidot, CH_3CONHNa -t kapunk. Ezt a molekulát a következőképpen ábrázolhatjuk:



Ilyen típusú nátriumsókat ténylegesen is megfigyeltek, amikor egy szénsavas amid, éterben reagált nátrium-amiddal (NaNH_2). Az A-kémiában irreleváns, hogy ezek a vegyületek vízben nem stabilok, mert vízben hidrolizálnak.



6.1. ábra. Az aminosavak kördiagramon és peptid-kötési helyzetben elrendezve.

Egy szerves sav és egy szerves bázis (vagyis alkohol) esetén ez a reakció szintén egy semlegesítés; csak a V-kémiában ez lassú és általában kismennyiségű szerves savra van szükség a stimuláláshoz. Ennek oka valószínűleg az alkoholok gyenge disszociációja. A metil-amin (CH_3NH_2) ugyanazon $-\text{NH}_2$ gyököt tartalmazza, mint a nátrium-amid (NaNH_2), ezért a reakció minden bizonnyal ugyanazt a mintát követi.

6.2 A biokémia kezdete

A szerves savak és alkoholok külön-külön nem jó építőkövek egy nagyobb, sokoldalúan építkező molekulához. Építőköcként céljára olyan molekula felelhet meg, amely egyszerre több funkciós csoportot tartalmaz pl.: az egyik végén szerves sav, és a másik végén bázis vagy alkohol. Az ilyen molekulák ismétlődő elemekből álló láncot alkothatnak egymást semlegesítő lépésekben. Amikor az érintkező végeken oldószeresztés történik, akkor a termék egy hosszabb molekula, amelynek ismét savgyök van az egyik végén és bázikus gyök van a másik végén. Ez az új molekula azután hasonló összekapcsolási és semlegesítési folyamatban vehet részt, melynek az egyedüli mellékterméke maga az oldószer. Ezért az oldat hígabb lesz, de kvalitatív értelemben nem változik és így a végtermék nem gátolja a reakciót.

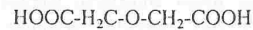
Építőköcként szerepű, amfoter molekulákat kaphatunk akkor is, ha a V-A helyettesítő műveleteket elvégezzük. Vegyünk egy paraffint, és helyettesítsünk egy H atomot egy savas gyökkel, és egy másik H atomot egy bázisos gyökkel. A V-kémiában ezen oxisavaknak a nulladik és az első tagja a következő:



vagyis „oxi-hangyasav” és „oxi-ecetsav”. A hipotetikus „oxi-hangyasav” annyira tükörszimmetrikus, hogy a két végét nem lehet megkülönböztetni – talán csak spontán szimmetriasértés esetén. De működik egy olyan elv a kémiában, hogy két $-\text{OH}$ gyököt nem hordozhat egy C atom. (Másképp, általában a karboxil csoport $-\text{O}-\text{H}$ részét nem is tekintjük hidroxil gyöknek, és vizes oldatban nem is működik akként, mert a karboxil csoport $-\text{H}$ -t veszít és nem $-\text{OH}$ -t.) De nem csak a képletben megfigyelhető szimmetria okozza azt, hogy az első molekula tiszta állapotban nem létezik, hanem az, hogy „önmagával reagálva” vízvesztéssel elbomlik ez a molekula. Megjegyezzük azonban, hogy az „oxi-hangyasav” (a mindennapi életben a szénsav, a szódavíz), vizes oldatban

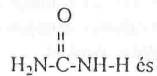
mégis létezik. (Két -OH csoport létezhet átmenetileg más molekulákban is: például a formaldehid hidrátban. Ebből a vizes oldatból, idővel, egy polimer, a poli-oximetilén hidrát válik ki.)

Az **oxi-ecetsav** (más néven glikolsav) kétségtelenül létezik, és megtalálható néhány szőlőben. Általánosságban azonban nincs a földi élet építőkövei között, valószínűleg azért nincs, mert nem képes duplázódni oxisav létrehozására. Ehelyett az egyik duplikációs reakciója a diglikolsav ikermolekuláját hozza létre:

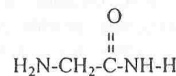


ahol a reakció során egy H₂O molekula kilép. Úgy tűnik tehát, hogy valamilyen kvantummechanikai okokból eredően oxisav modulokból sokoldalú makromolekulákat nehéz felépíteni, az oxisavak amfoter természeté ellenére is.

A fenti V-A szabályok szerint a nulladik és az első oxisav tükörmolekulái az A-kémiában a következők:



karbamid



glicin-amid

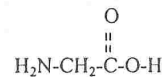
Az első molekula a **karbamid**, amely kulcsszerepet játszik a magasabb rendű állatok metabolizmusában. A V-analóg változatnál (oxi-hangyasav) megfigyelhető bomlékonyság itt nem jelentkezik, ez a molekula stabil. Itt is kétarcú a szénatom két oldalán helyet foglaló hasonló alakú két gyök és különböző szerepet játszanak a molekula oldószeres kémiájában. Ez a stabilitás ugyanakkor arra is figyelmeztet, hogy óvatosan kell bánni a V-A tükörszimmetria felvázolásánál, mert a V-kémiával ellentétben két amino-gyök kapcsolódhat ugyanazon C atomhoz. (Ha az összes O-t NH-ra cseréljük ki, akkor karbamid helyett az eredmény guanidin, ami szintén egy teljesen stabil molekula.)

A második A-molekula neve glicin-amid, amely egy ritka de fontos építőköve a földi biológiának: glicin-amidot találtak a hormon-típusú peptidokban (oxitocin és vasopressin). A -CONHH gyök problémájára később térünk vissza.

Úgy tűnik, hogy az oxisavak nem működnek megfelelően a V-makromolekulák építőelemeiként; ezért természetesen a földi biológia nem épülhetett föl ezek A-tükör molekuláin, mivel az oldószer a víz. Egy közbülső megoldás valósult meg.

Két lehetséges **metán-eredetű hibrid V-A amfoter** van. Az oxi-ecetsav hidroxil-ionja helyettesíthető egy aminosavakkal, vagy a karboxil-ionja helyettesíthető az „A-karboxil-

ionnal”. Gyakorlati okokból most az első lehetőséget tárgyaljuk, majd később röviden elemezzük a második lehetőséget. A megfelelő V-A hibrid a következő molekula:



amelynek a neve **amino-ecetsav**, vagy a rövidebb nevén **glicin**. Ez bizonyosan létezik, s egyike annak a 20 standard aminosavnak, amelyekből a fehérjék fölépülnek. (Ebben a V-A sorozatban egyébként a nulladik tag a H₂N-COOH, amelynek a neve amino hangyasav, vagy karbaminsav. Ez nem stabil a V-kémiában, de néhány származéka jól ismert, pl. a poliuretánok (A karbaminsav kálium sója a lovak vizeletében található meg.)

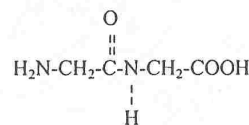
A glicin nem tekinthető formálisan V-A amfoternek egy oldószerben sem, de „iker ionokat” hoz létre legtöbb vizes környezetben. A 2,34 és 9,60 közötti pH-érték tartományban a szerkezete a következő:



és (legalábbis formálisan) két ilyen glicin iker-ion képezhet egy dupla molekulát víz elvesztése mellett. Az új molekula, az



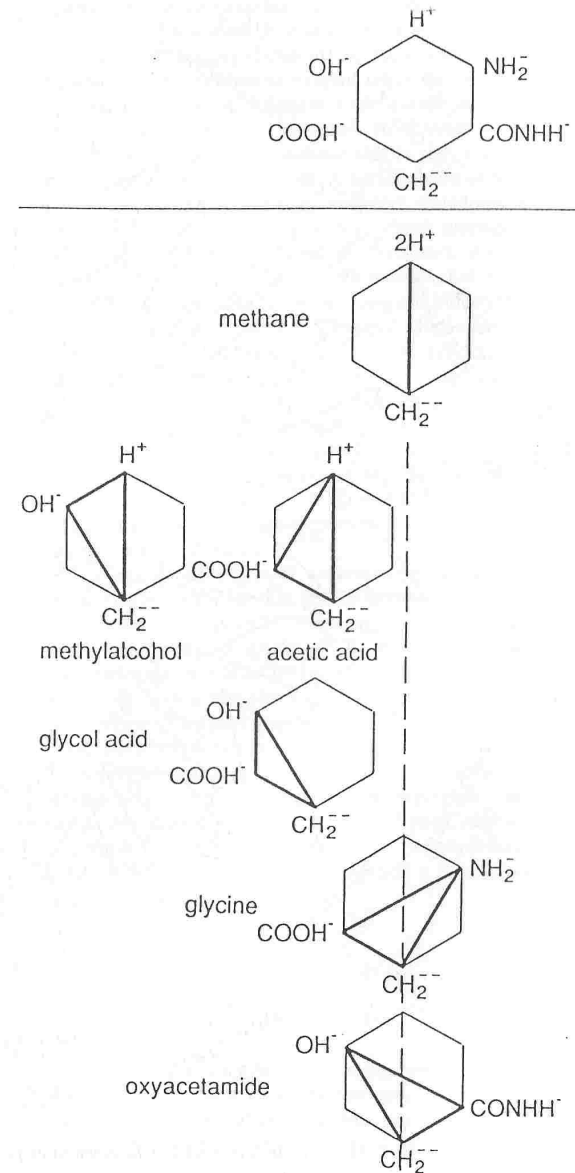
szintén létezik, a neve: **glicilglicin**. Részletesebb szerkezete:



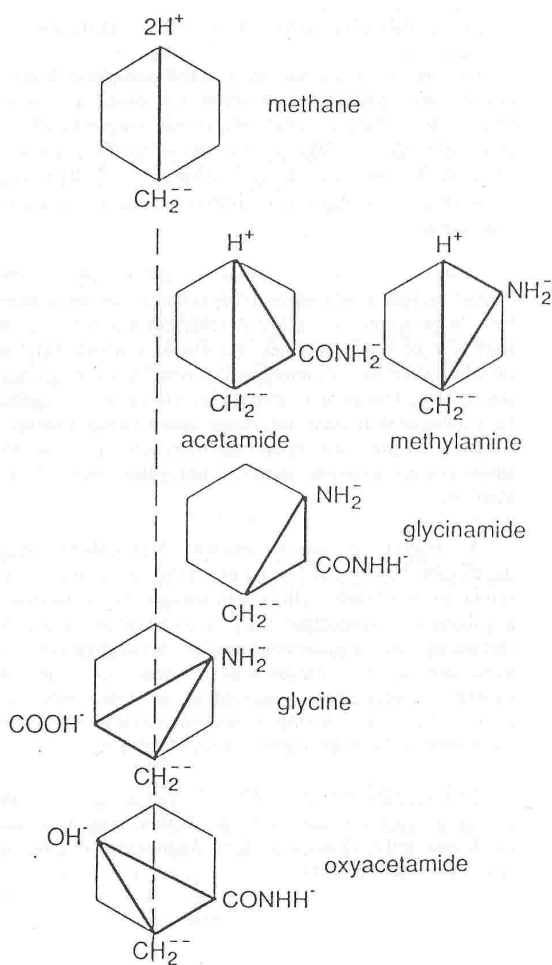
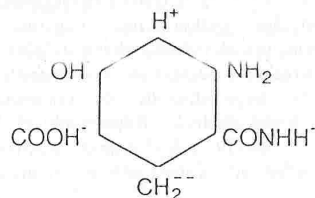
Ez a glicilglicin és a C és N közötti kapcsolat a jól ismert **peptidkötés**, amely a polipeptidek és ezen belül a fehérjék jellemző kötési módja. V-A rendszerünkben ez a kapcsolat automatikusan megjelent a fent említett A-kémia egyszerű semlegesítési reakciójában. A lánc korlátozás nélkül ismétlődő, mivel a glicilglicin két vége ugyanaz mint a glicin. Ílymódon épülnek fel a földi fehérjék, de az építési folyamat eléggé bonyolult és katalizátor enzimeket igényel a V-kémiában.

A Miller kísérletben aminosavak is keletkeznek: a szintézis az első öt legnagyobb gyakorisággal keletkező terméke, csökkenő gyakoriságú sorrendben a következő: hangyasav > glicin > glikolsav > alanin > tejsav.

6.2. ábra. A víz-ammónia tükör az aminosavak alkotó molekuláira. A hatszöges molekula-térkép szerinti aminosav elrendezést a hátsó borítón színesen ábrázoltuk. A kék színű esetekben vizes, a sárga színű esetekben ammóniás gyökök vannak a molekulán túlsúlyban.



Az aminosavak főbb molekula-komponenseiből ill. győkeiből összeállított hatszög: ennek bal oldalán a két "vizes" gyök, jobb oldalán a két "ammóniás" gyök szerepel.



A tejsav a V ellenpárja a V-A alaninnek. A kihozatal csökken a molekulatömegével (ami természetes), és V-A molekulák gyakoribbak, mint a V molekulák (ami érdekes és fontos). Létezik egy spontán aminálásnak nevezett folyamat (Bailar, 1973). Ha vízben oldott hidroxil-gyökökkel rendelkező molekulákat ammóniával „szennyezzük”, akkor az -OH molekulák nagy része kicserélődik -NH₂-vel katalizátor nélkül. (Ez is a Miller szintézis része.) Ezért az ammónia jelenlétében az aminosavak előfordulása valóban nyilvánvaló. És most ejtsünk néhány szót az "A-karboxil" létezéséről, és az „inverz V-A hibridek” lehetőségéről is.

A bal oldali ábra mutatja a „tükröszimmetriát” a V- és az A-kémia bizonyos egyszerű szerves molekulái között. A rendszer bemutatja a metánból származó savakat és bázisokat (alkoholokat).

A vízszintes vonal fölött lévő hatszög nem vegyület, hanem az építő egységek egy készlete. A függőleges szaggatott vonal elválasztja a V- és az A-világokat. Figyeljük meg a szerkezet tükröszimmetriáját.

A metán (1. sor) egy függőleges vonal az elválasztó vonalon. Ez közös mindkét világban. Az itt tárgyalt többi vegyületet háromszögek jelzik.

A 2. sor bázisokat vagy alkoholokat (kívül), és szerves savakat (belül) tartalmaz. A 3. sor adja az amfotereket („oxisavak”). Végül a 4. sor és az 5. sor a logikailag lehetséges amfoter V-A hibrideket tartalmazza. Ezek nem önmagukban tükröszimmetrikusak, hanem a tükrözés (és vele a megfelelő gyökök A-V átcserélése) viszi át az egyik hibridet a másikba. Az aminosavak a „választó vonalon vannak”, mindkét világban azonos területtel. A első ilyen hibrid éppen a glicin, amely a legegyszerűbb létező földi aminosav. (A többi a hátsó borítón mutatjuk be.) Ebben az elrendezésben a glicin az egyik legegyszerűbb szerves vegyület. Az aminosavak kialakulása a Miller kísérlethez hasonló ősföldi folyamatokban történt, amikor egyszerre volt jelen víz, ammónia és az egyszerű karbon vegyületek sokasága, melyeket bizonyos energia bevitel – Nap UV sugárzása, villámlások - gerjesztett.

Még a bonyolultabb aminosavak is "fél úton vannak a V és az A világok között". Nevezetesen, néhány közülük többlet bázikus vagy savas gyököket tartalmaz az egy pár -NH₂ és -COOH mellett. Az élő szervezetek 20 aminosavja közül (lásd a körábrát) 8 ilyen többlet-gyök található, és ezek közül négy V-kémiával rendelkezik (-COOH és -OH), négy pedig A-kémiát mutat (-CONHH, -CNH₂ és -NH₂).

1) Amint láttuk, a szerves sav-amidok valóban semlegesítődnek alkáli-amidokkal, még bizonyos földi körülmények között is. Ekkor az amid-ionnal szemben ezek savként viselkednek, vagyis a (CO)NHH csoportot protont ad át.

2) A bonyolultabb aminosavaknál lehetnek többlet hidroxil-, karboxil- vagy amino-gyökök bizonyos ágakon. Erre két példa az aszparaginsav és a glutaminsav, amelyeknek két -COOH gyökük van; de csak az egyik vesz részt a peptidkötésben fehérjék létrehozásakor. Mindkettőnek van közeli rokona, az aszparagin és a glutamin, amelyeknél az egyedüli különbség az, hogy -CONHH-val rendelkeznek a második karboxil-ion helyett. Nem meglepő, hogy ez az ág nem képez peptidkötést; ebből peptidkötés esetén NH₃ keletkezne, ami nem a legtermészetesebb végtermék lenne a V-kémiában.

3) Inverz hibrideknek, az oxisav-amidoknak a lehetőségével kapcsolatban azt állapíthatjuk meg, hogy mivel a „savas” végük -CONHH és a „lúgos” végük -OH, ezért ezek nem szerepelnek a földi életben, tudásunk szerint. Két analóg vegyület viszont megjelenik. Az oxo-amidok egy egyszerűbb sorozatának első tagja a metanol-amin, HO-CH₂-NHH. Ez nem szerepel a földi életben. Viszont a második tag, az etanol-amin (amely kolamin néven is ismeretes), előfordul bizonyos biológiai foszfatidokban. Egy másik előfordulás az oxitocin, amely nem egészen polipeptid, mivel ciklikus az amino végén. A tirozin -OH győke viszont szabad, és a másik vég szabad, ez elején glicin-amiddel, vagyis egy -CONHH gyökkel.

Nem igényel túl sok magyarázatot az a tény, hogy a biológiai oxisav-amidok a gyakorlatban nem fordulnak elő a földi életben. Aminosavak és oxisav-amidok alternatív megoldások lehetnének ugyanarra a problémára. Az egyik önmagában is el tudja végezni a munkát. A kölcsönös jelenlét olyan vegyületekből származhat, amelyek nem lehetnek amfoterek, hanem dupla savak vagy dupla "amino bázisok". Bizonyos értelemben az egyik kiküszöbölése segít, és ez egy spontán szimmetriasértés jelent.

Az elemzést a nukleinsavakra vonatkozó rövid megjegyzéssel zárjuk. A földi élet ezeket a genetikai információ céljára alkalmazza. Nagyon eltérnek a fehérjéktől; az építőköveik, a nukleotidok, egy -PO(OH)OH gyökkel rendelkeznek a savhoz és egy -OH gyökkel a bázishoz. A kezdeteknél viszont volt bizonyos kapcsolat az aminosavak építőkövei és a nukleotidok között. A részletek bonyolultak és csak egy példát említünk meg demonstrálás céljából. Az uridilsav (UMP), az RNS egyik építőköve, bioszintézissel indul karbamil foszfáttól és aszpartáttól. A második egy

kanonikus aminosav, míg az első szintetizálással keletkezik ATP-ből, széndioxidból és ammóniából. Valóban, az UMP bázisában egy peptidkötés látható.

6.3 A fehérjék szerkezetének alapjai

A fehérjék szerkezete nagyon bonyolult, nem minden részletük ismert, és fontos az enzim funkciókhoz. A jelek szerint viszont négy fő tényező határozza meg a fehérje térbeli szerkezetét. (Dickerson & Geis, 1969). Ezeket a tényezőket felsoroljuk a következőkben az előfordulások és jelentőségük sorrendjében. (Az itt használt fogalmakat nem szabad összekeverni a szokásos biokémiai fogalmakkal.)

1) A **peptidkötés**. Ez építi fel a fehérje polipeptid láncát; minden láncformáló kapcsolat peptidkötés, a prolin N-jének kis módosításával, amely nem tartalmaz H-t. A peptidkötés nem egy egyenes vonal, hanem egy cikk-cakk van a láncban, és ezért a molekula igyekszik feltekeredni. Minden aminosav földi biokémiájában csak egy -COOH tud kötés alkotni, ezért nincs leágazás a láncban. Ez a kötés kovalens, és olyan erős, mint a szokásos vegyértékkötés.

2) Az **S hidak**. A ciszteinben előforduló -SH gyök kapcsolatra alkalmas. Ezért ha két ilyen aminosav közel kerül egymáshoz, akkor egy S-S híd köti össze őket. A kötés kovalens, és olyan erős, mint a szokásos vegyértékkötés.

3) A **H hidak**. Kvantummechanikai okokból az O vagy az N atommal vegyértékkötésben lévő H egy gyenge ($E \sim 0.03$ eV) kötést hozhat létre egy másik O vagy N atommal is. Ugyanez a helyzet, amikor a cikk-cakk vagy spirál következtében két peptidkötés közel kerül egymáshoz (a prolin N-jét kivéve); ekkor a H hidak megváltoztathatják a térbeli szerkezetet. Ez a kötés gyenge és megszakadhat jóval a lánc bomlási pontja alatt.

4) Elektrosztatikus kölcsönhatások. Bizonyos gyökök (pl. -COOH, -OH és -SH) disszociálhatnak, majd a szabad töltések vonzást vagy taszítást eredményeznek. A kötés nem túl erős; a szilárdsága függ az oldószerből, a disszociációs sebességtől és a dielektromos állandótól, és természetesen a gyökök természetétől is.

A fenti megállapítások alapján ha az összetevők és az oldószer megfelelnek a peptidlánchoz; jó esély van arra, hogy a lánc és az alapvető szilárdsága gyakorlatilag azonos lesz a V- és az A-kémiai esetén. Mivel az S-hidak kovalensek, a szilárdságuk is azonos lehet. A H-hidak esetén az alapvető

kvantummechanikai hatás független az oldószerből, és az oldószer csak kis zavaró hatást okozhat. Végül pedig, amint már fent említettük, az ionok elektrosztatikus kölcsönhatásai függenek az oldószerből.

Következésképpen, még ha elő is lehetne állítani az alapvető fehérje láncot az A-kémiában, és a primer, szekunder és tercier szerkezetek hasonlóak lesznek, mint a V-kémiában, a negyedfokú kölcsönhatások különbözni fognak s ezért bizonyos föltekereedéskor-összehajtogatódáskor létrejövő térbeli szerkezetek eltérőek lesznek.

Ezen túlmenően, a földi fehérjékben a H-hidak főleg a peptidkötésben képződnek; az N-hez kapcsolódó H az N és az O között képez hidat, és egyenértékű kapcsolódása van a C-hez is. Így a szerkezet azonos mindkét kémiában, ha a peptidkötés azonos. Ha viszont ezt az O-t is NH-val cseréljük le, akkor az már nem képez hidat egy másik NH-val. Vagyis ha az O-t teljesen kiküszöbölnénk az aminosavak „tükörképeiből”, akkor a tercier szerkezet, és a tükör peptidok térbeli formája, teljesen eltérhetne a földiétől.

6.4 Az A-fehérjék lehetőségeiről

Az ammónia oldószerben való fehérjeképződés nagyon sok részletből tevődik össze, amelyek közül sok az ismeretlen. Itt csak találgatásokra tudunk hagyatkozni. Először kipróbálhatjuk a V aminosavakat építőköveként. Elvileg két glicin kapcsolódhat ammónia vesztés mellett, aminek az eredménye a következő:



ami a glicilglicin analógja, de a kötés biztosan nem peptidkötés. Ez a molekula nem ismerős a V-kémiában; különböző környezetekben lehet stabil vagy instabil.

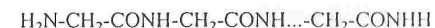
Vizsgáljuk meg most azt a lehetőséget, hogy mi történik akkor, ha két glicin-amid reagál ammónia kilépése mellett: az eredmény a következő molekula:



A reakció egy egyszerű semlegesítési folyamat az A-kémiában. Ilyen folyamatokat megfigyelték már földi körülmények között más egyéb analóg molekulák között is.

Nem ismerjük ezt a molekulát, de ez az ikerpárja a glicin-amidnak. Ez is szabályos A-amfoter, és tartalmazza a szabályos peptidkötést.

Emellett vegyük számításba az aminosavak analóg molekuláit, de felecsérelt -COOH és -CONHH egységekkel. A peptidok kötési energiája gyakorlatilag független az oldószerből; a H disszociációjának mértéke eltér a -COOH és a -CONHH esetén és ez a reakciósebességeket is befolyásolja. A fentiek alapján látható, hogy di-, tri- és polipeptidok tükörmolekulákból is kialakulhatnak. Képzeljünk el egy hipotetikus polipeptidet, amely nagy számú, egymással összekapcsolt glicin-amidból áll, és mást nem is tartalmaz. A képlete a következő:



Ez a molekula ugyanaz, mint a földi poli-glicin, kivéve az utolsó három atomot a jobb végen. Így ennek a módosított fehérjének az általános tulajdonságai csak nagyon kicsit térnek el a V-ellenpárja tulajdonságaitól, amivel az ilyen láncok elvi lehetőségét demonstráltuk. (És néhány a -CONHH véggel rendelkező peptidláncok közül létezik is: emlékezzünk a földi oxitocinra.)

Tehát az aminosav amidok (amelyek egy -CONHH "savas" véggel rendelkeznek) képeseknek látszanak nagyon hasonló polipeptidok (és így A-fehérjék) kialakítására, mint amik a V-kémiában léteznek. Az alacsony hőmérséklet nem zavarja a stabilitást, és ammonolízis nem látszik elég erősnek ahhoz, hogy felbontsa a láncokat (ez kísérletileg vizsgálható, ha V-fehérjéket teszünk folyékony ammóniába). Emellett az A-kémia a földi szobahőmérsékleten kb. 10 atm fölött lehetséges, ami nem lehetetlen más bolygókon (például a korai Marson).

A fejezet gondolatmenetének lezárásaként vegyük figyelembe, hogy a glicin-amid egy természetes amfoter az A-kémiában (miközben a glicin nem szerepel a V-kémiában; ott a glikolsav = oxiecetsav lenne a természetes; lásd a V-A tükör-ábrát, ahol a glicinamid csak az A-világban van). Ezen túlmenően, az A-kémiában a peptidkötés megjelenhet még egyszerű semlegesítési reakciókban is. Talán még az is előfordulhat, hogy biológiai makromolekulák könnyebben épülhetnek fel az A-kémiában, mint a V-kémiában.

Ez a kutatási irány gyümölcsöző lehet az egyetemi tanuló ifjúság számára is, és betekintést adhat abba, hogy az urkutatás és a kémia milyen különleges formákban termékenyítheti meg egymás kutatási területét.

Irodalom:

- Arvidson, R. E.; Poulet, F. et al (2005): Mars Express OMEGA Observations over Terra Meridiani. *36th LPSC*, #1934; LPI, Houston;
- Arvidson, R. E.; Squyres, S.W., et al (2005): Recent Results from the Opportunity Mars Exploration Rover Mission. *36th LPSC*, #1958;
- Bérczi Sz. (1991): *Kristályoktól bolygóestekig*. Akadémiai K. Bp.
- Bérczi Sz., Lukács B. (1995): Solvent Liquids on Planets. *Acta Climatologica, Szeged*, 28-29. p. 5-22.
- Bérczi Sz., Lukács B. (1996): The Water-Ammonia Symmetry of Amino Acids: Constraints on Paleoatmospheres. *Acta Climatologica, Szeged*, 30. p. 5-30.
- Bérczi Sz., Lukács B. (1997): Water-ammonia Ice Meteorites and/or Ammonia(tum)-Silicates from the Early Solar System: Possible Sources of Amino-Radicals of Life-molecules on Earth and Mars? *28th LPSC*, Houston, p. 97.
- Bérczi Sz. (2000): *Holdközvetek, meteoritek*. Kis atlasz a Naprendszerrel (1). ELTE TTK KAVÜCS, UNICONSTANT
- Bérczi Sz., Hargitai H., Kereszturi Á., Sik A. (2001): *Bolygóestek atlasza*. Kis atlasz a Naprendszerrel (2). ELTE TTK KAVÜCS, UNICONSTANT, Budapest, Püspökladány;
- Bérczi Sz. Hargitai H., Illés E., Kereszturi Á., Sik A., Földi T., Hegyi S., Kovács Zs., Mörtl M., Weidinger T. (2003): *Bolygófelszíni mikrokörnyezetek atlasza*. ELTE TTK KAVÜCS, UNICONSTANT, Budapest, Püspökladány;
- Bogard, D. D.; Johnson, P. (1983): Martian gases in an Antarctic meteorite? *Science*, 221, Aug. 12, 651-654;
- Christensen, P. R.; McSween, H. Y., Jr. Et al (2005): The Igneous Diversity of Mars: Evidence for Magmatic Evolution Analogous to Earth. *36th LPSC*, #1273; LPI, Houston,
- Brückner, J.; Dreibus, G.; Jagoutz, E. et al (2005): Hematite on the Surface of Meridiani Planum and Gusev Crater. *36th LPSC*, #1676;
- Fairén, A.G.; D. Fernández-Remolar, D.; J. M. Dohm, V. R. Baker, R. Amils (2004): Inhibition of carbonate synthesis in acidic oceans on early Mars *Nature*, 431, 423-426;
- Fegley, B. Jr. (1997) Why pyrite is unstable on the surface Venus. *Icarus* 128, 474-479.
- Friedman, R. C.; Taylor, G. J.; Treiman, A. H. (1998): Nakhilites and Theo's Flow: Formation of Extrusive Pyroxenites. *29th LPSC*, #1190; LPI, Houston, CD-ROM;
- Führer E. (2004) Az erdő és a meteorológia. A hazai erdők szénforgalma. *Egyetemi Meteorológiai Füzetek*, No. 19, 119-126.
- Glavin, D.P.; Aubrey, A.; Dworkin, J.P.; Botta, O.; Badá, J.L. (2005): Amino Acids in the Antarctic Martian Meteorite MIL03346. *36th LPSC*, #1920; LPI, Houston, CD-ROM;
- Götz G. (2004) *A klímadinamika alapjai*. Kézirat, Budapest.
- Harvey, R. P.; Hamilton, V. E. (2005): Syrtis Major as the Source Region of the Nakhilite/Chassigny Group of Martian Meteorites: Implications for the Geological History of Mars. *36th LPSC*, #1019;
- Haskin, C.A. et al (2005): Water alteration of rocks and soils on Mars at the Spirit rover site in Gusev crater. *Nature*, 436, 7047, 66-69;
- Hogenboom, D. L.; Dougherty, A. J.; Kargel, J. S.; Mushi, S. E. (2005): Volumetric and Optical Studies of High-Pressure Phases of MgSO₄-H₂O with Applications to Europa and Mars. *36th LPSC*, #1825; LPI, Houston, CD-ROM;
- Illés-Almár E., Almár I., Bérczi Sz., Lukács B. (1997): On a Broader Concept of Circumstellar Habitable Zones. (In: *Astronomical and Biochemical Origins & Research for Life in the Universe*, IAU Coll. 161. C. B. Cosmovici, S. Bowyer, D. Wertheimer, Eds.) 747-754;
- Jacobson, M. C., Charlson, R. J., Rodhe, H. (2000) *Introduction: biogeochemical cycles as fundamental constructs for studying Earth system science and global change*. In: Earth System Science (eds: M. C. Jacobson, R. J. Charlson, H. Rodhe, G. H. Orians). Acad. Press;
- Kargel, J. S. (2005): Aqueous Chemistry, Physical Chemistry, and Sedimentology of Rocks at the Mars Rover Landing Sites. *36th LPSC*, #2149; LPI, Houston, CD-ROM;
- King, P. L.; Lescinsky, D. T.; Nesbitt, H. W. (2005): Comparison of Predicted Salt Precipitation Sequences with Mars Exploration Rover Data. *36th LPSC*, #2300; LPI, Houston, CD;
- Kinman, W. S.; Neal, C. R. (2005): Petrology of Nakhilite MIL 03346. *36th LPSC*, #1660; LPI, Houston, CD-ROM;
- Lentz, R. C. Friedman; Taylor, G. J.; Treiman, A. H. (1999): Formation of a martian pyroxenite: A comparative study of the nakhilite meteorites and Theo's Flow. *Meteoritics & Planetary Science*, 34, no. 6, pp. 919-932;
- Madden, M.; Bodnar, R.; Rimstidt J. (2004): Jarosite as an indicator of water-limited chemical weathering on Mars *Nature*, 431, 821-823;
- Marion, G. M., Kargel, J. S. (2005): Stability of Magnesium Sulfate Minerals in Martian Environments. *36th LPSC*, #2290; LPI, Houston;
- McKay, G.; Schwandt, C. S. (2005): Mineralogy and Petrology of New Antarctic Nakhilite MIL 03346. *36th LPSC*, #2351; Houston;
- McSween, H. Y., Jr.; Milam, K. A. (2005): Comparison of Olivine-rich Martian Basalts and Olivine-Phyric Shergottites. *36th LPSC*, #1202; LPI, Houston, CD-ROM;
- Mészáros E. (1997) *Levegőkémia*. Veszprémi Egyetemi Kiadó;
- Mészáros E. (2002) *A környezettudomány alapjai*. Akadémiai K Bp;
- Mikouchi, T. et al. (2003): Mineralogical Comparison of Y000593 with Other Nakhilites: Implications for Relative Burial Depths of Nakhilites. *34th LPSC*, #1883; LPI, Houston, CD-ROM;
- Mikouchi, T.; Monkawa, A.; Koizumi, E.; Chokai, J.; Miyamoto, M. (2005): MIL03346 Nakhilite and NWA2737 "Diderot" Chassignite: Two New Martian Cumulate Rocks from Hot and Cold Deserts. *36th LPSC*, #1944; LPI Houston, CD-ROM
- Ming, D. W. et al. (2005): Geochemical and Mineralogical Indicators for Aqueous Processes on the West Spur of the Columbia Hills in Gusev Crater. *36th LPSC*, #2125; LPI;
- Molnár, K., Mika, J. (1997) Climate as a changing component of landscape: recent evidence and projections for Hungary. *Z. Geomorph.* N.F., Suppl. Bd. 110. pp. 185-195.
- Monders, A. G.; Médard, E.; Grove, T. L. (2005): Primary Martian Basalts at Gusev Crater: Experimental Constraints. *36th LPSC*, #2069; LPI, Houston, CD-ROM;
- Moser M. (1998) *Kőforgások a természetben és a társadalomban*. Dürer Nyomda, Gyula;
- Möhlmann, D. T. (2004): Mars: Sorption water driven chemical and biological processes. *35th COSPAR*, 18-25 July 2004, Paris, p.769;
- Möhlmann, D. T. F. (2005): The Importance of Adsorption Water in the Upper Martian Surface. *36th LPSC*, #1120; LPI, Houston;
- Papanastassiou, D. A.; Rajan, R. S.; Huneke, J. C.; Wasserburg, G. J. (1974): Rb-Sr Ages and Lunar analogs in a Basaltic Achondrite; Implications for Early Solar System Chronologies. *5th LPSC*, page 583, LPI, Houston, CD-ROM;
- Rost, D.; Vicenzi, E.P.; Pauli, E.C. (2005): Halite, Sulfate, and Clay Assemblages in the Nakhla Martian Meteorite. *36th LPSC*, #2306;
- Rutherford, M. J.; Calvin, C.; Nicholis, M.; McCanta, M. C. (2005): Petrology and Melt Compositions in Nakhilite MIL 00346. *36th LPSC*, #2233; LPI, Houston, CD-ROM;
- Schlesinger, W. H. (1997) *Biogeochemistry* 2nd ed., Acad. Press;
- Stopar, J. D.; Lawrence, S. J.; Lentz, R. C. F.; Taylor, G. J. (2005): Preliminary Analysis of Nakhilite MIL 03346, with a Focus on Secondary Alteration. *36th LPSC*, #1547; LPI, Houston, CD-ROM;
- Squyres, S. W., The Athena Science Team (2005): Recent Results from the Spirit Mars Exploration Rover Mission. *36th LPSC*, #1918; LPI, Houston, CD-ROM;
- Takács-Sánta A. (szerkesztő) (2005) *Éghajlatváltozás a világban és Magyarországon*. Alinea Kiadó, Budapest.
- Treiman, A. H.; Norman, M.; Mittlefehldt, D.; Crisp, J. (1996): 'Nakhilites' on Earth: Chemistry of Clinopyroxenites from Theo's Flow, Ontario, Canada. *27th LPSC*, 1341, LPI Houston, CD-ROM
- Yen, A. S. et al. (2005): Subsurface Weathering of Rocks and Soils at Gusev Crater. *36th LPSC*, #1571; LPI, Houston, CD-ROM;
- Yen, A. S. et al. (2005): An integrated view of the chemistry and mineralogy of martian soils. *Nature*, 436, 7047, pp. 49-54.
- Vaniman, D. T.; D. L. Bish, S. J. Chipera, C. I. Fialips, J. W. Carey, W. C. Feldman (2004): Magnesium sulphate salts and the history of water on Mars. *Nature*, 431, 663-665;
- Warren, P. H.; Bridges, J. C. (2005): Geochemical Subclassification of Shergottites and the Crustal Assimilation Model. *36th LPSC*, #2098; LPI, Houston, CD-ROM;
- Weidinger T., Bartholy J., Matyasovszky I. (2000) A globális éghajlatváltozás lokális hatásainak vizsgálata hazánkban. *Földrajzi Közlemények CXXIV (XLVIII)* kötet, 1-4 szám, 72-92.
- Wentworth, S. J.; Gibson, E. K.; Velbel, M. A.; McKay, D. S. (2005): Antarctic Dry Valleys and indigenous weathering in Mars meteorites: Implications for water and life on Mars. *Icarus*, 174, No. 2. p. 383-395.

Tartalomjegyzék:

- I. Magmás kőzetek (marsi meteoritek) - B. Sz.
- II. A Mössbauer mérés (marsi példákkal) - H. Z.
- III. A kőzetek kémiai mállása (marsi példákkal) - M. M., B. Sz.
- IV. Fotokémia - M. M.
- V. Légköri körforgások - W. T., M. M.
- VI. Víz-ammonia tükör az aminosavaknál - L. B., B. Sz.

E munka megjelentetését a Magyar Űrkutatási Iroda az ELTE TTK / MTA Geonómia Bizottság Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport TP-154/2005 számú támogatásával támogatta. E támogatásért a MŰI-nek köszönetet mondunk.

Kiadja az ELTE/MTA Kozmikus Anyagokat Vizsgáló Űrkutató Csoport és az UNICONSTANT, Püspökladány, Honvéd u. 3.
Kis Atlasz a Naprendszerrel (8): Űrkutatás és kémia
ISBN 963 00 6314 XÖ
963 86401 9 7

Hexagon of the components

