

AZ ARKTISZ KÉK JEGÉN

Az elmúlt hetekben még zajlott a jég folyóinkon, hazánk vizein azonban hamarosan újra feleslegessé válnak a jégtörők. Az Északi-sarkvidéken viszont minden évszakban szüksége van az odalátogatónak jégtörő hajóra. Ám a zord időért kárpótlásul szolgálhat a sarki jég gyönyörű kék színe, aminek magyarázata a légbuborékmentes jég és a tiszta víz hullámhosszfüggő, szelektív fényelnyelésében rejlik. Ugyanezzel magyarázható a vízzel teli úszómedencék és az atomreaktorok fűtőelemeit körülvevő víz kék színe is.



2

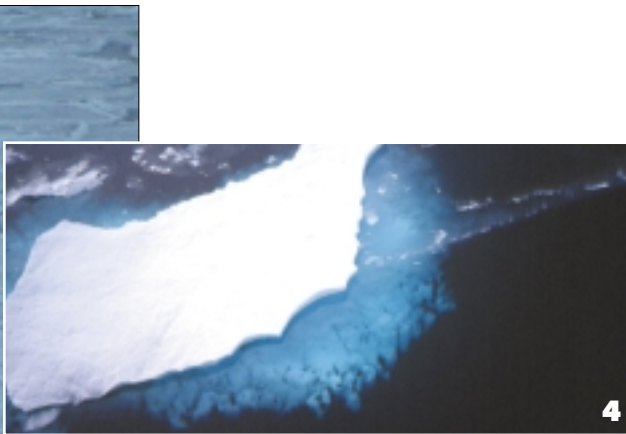


2005 augusztusában–szeptemberében a Svéd Sarkkutató Titkarság szervezte Beringia 2005 nevű nemzetközi sarkkutató expedíciójának egyik résztvevőjeként alkalmam volt az alaskai Barrow és a Spitzbergákon lévő Longyearbyen települések között átszeli az Arktiszt, és megfigyelni a jég színárnyalataiban a kék feltűnő dominanciáját. Amint Alaszkától távolodtunk, a jégtörő hajó kezdetben még teljesen jégmentes vizeken úszott. Ekkor figyeltem föl az első, feltűnően kék jelenségre: a hajó gyorsan forgó két propellere széles, kékesfehér sávot hagyott maga után a tengervízben. A fehér habokkal tarkított farokvíz világoskék színben játszott, pedig az eget felhő borította, a

farokvíz sávján kívül pedig a vízfelület többi része – a felhőzet miatt – sötétszürke volt.

Amint egyre északabbra haladtunk a Jeges-tengeren, fokozatosan megjelent a fehér felületű, hófedte jégmező, amit kisebb-nagyobb, sötétszürke vagy fekete vízfelületek szabdaltak. E sötét és nyugodt vizeket gyakran vékony, akár csak néhány milliméter vastag jégréteg, nilas* fedte. Ahol ez megrepedt, helyenként úgy torlódott egymásra a vékony jégtakaró két fele, mint két kezünk váltakozva egymásba kulcsolt ujjai. Ezáltal egy szabályos, négyszöghullám alakú vonalmintázatot formázott a nilas jég pereme. Annak ellenére, hogy az alul lévő tengervíz feketének látszott, a nilas jég a vas-

tagságától függően kékeszürke árnyalatúnak tűnt: minél vastagabb, annál világosabb szürkés-kék volt. Ha a tenger felszíne hullámzott, akkor a nilas nem tudott nagy, összefüggő rétegben kialakulni, hanem kisebb-nagyobb *jégpalacsintává* töredezett. E lapos jégdarabok széle enyhén felkunkorodott, mert állandóan egymáshoz ütődtek. Az ilyen palacsinta-jég színe ugyancsak kékeszürkés fehérnek látszott. Az árnyalatok magyarázatát a jégrétegek albedójában* (fényvisszaverő képességében) kell keresnünk. A nilas albedója a vastagság növekedésével nő: ez okozza a vastagabb nilas világosabb szürke tónusát. A 11 centiméternél nem vastagabb nilas albedója a spektrum kék tartományában kissé



1. A svéd Oden jégtörő hajó farokvize a Jeges-tengeren

(A SZERZŐ FELVÉTELE)

2. Fókával éppen jóllakott jegesmedve egy jégtáblán a Jeges-tenger kékeszürke palacsinta-jéggel fedett vízében

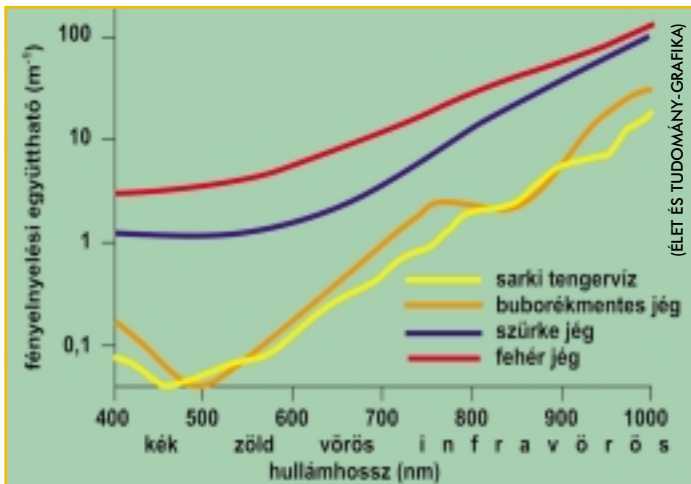
(HAKAN KARLSSON FELVÉTELE)

3. A Jeges-tenger fehér jégtábláin nyáron az olvadékvízből számos tavacska keletkezik, melyek színe kék

(A SZERZŐ FELVÉTELE)

4. Az északi-sarki fehér jégtáblák víz alatti része annál kékebbnek tűnik, minél mélyebbre merül a vízben

(A SZERZŐ FELVÉTELE)



1. ábra Különböző jégfajták és a tiszta sarki tengervíz fényelnyelési együtthatója a hullámhossz függvényében

nagyobb, mint hosszabb hullámhosszakon: ezért tűnik enyhén kékesnek.

Amint egyre északabba haladtunk a jégtörővel, fokozatosan vastagodtak az arktiszi jégtáblák, melyek felületét fehér hó fedte. Nyár lévén, a Nap egész nap nem süllyedt a horizont alá, a jégtáblák felülete pedig helyenként megolvadt. Az olvadékvíz kisebb-nagyobb tavacskáiban gyűlt össze a jégen, melyek feltűnően világoskék színűnek látszottak, függetlenül attól, hogy az égbolt tiszta vagy felhős volt. Ha a felszínük jéggé fagyott, vagy ha fenéig befagytak, e tavak továbbra is kékek maradtak. Mintha a fehér jégtáblákon megannyi kék vízű úszómedence lett volna elszórva.

A jégtáblák egymásra torlódásakor vagy hajónk jégtörő munkája eredményeként kisebb-nagyobb jégtömbök kerültek az egyébként viszonylag sima felszínű jégre. E jégtömbök sokszor egész tömegükben kék színben tündököltek, áteső napfényben kékesen világítottak, olykor fehéren szórták a fényt, s csak egy vékony rétegük pompázott kéken. Habár a jégtáblák sokszor teljes tömegükben fehér jégből álltak, a víz alatti részük még ezeknek is mindig kékeknek látszott. A kék árnyalat annál erősebb volt, minél mélyebbre merült a tengervízbe az egyébként fehér jég.

Az Arktisz jégtakarójának vastagsága nyáron csak néhány méteres, és csak ott sokkal vastagabb ennél, ahol a Jeges-tenger vizének áramlásai, a szél és a Hold árnyéke által állandóan mozgatott jégtáblák egymásra torlódnak. De még így sem haladja meg a néhány száz méter vastag szárazföldi eredetű, édesvízi gleccserjégből keletkeznek, azáltal, hogy annak folyama eléri a tengert és beleömlik annak vizébe.

A jég Északi-sarkon tapasztalt optikai jellemzőinek magyarázatát a víz és a jég hullámhosszfüggő fényelnyelési együtthatója adja (1. ábra). A tömény sós tengervízből és/vagy levegőből,



KISLEXIKON

albedó: fényvisszaverő-képesség = a visszaverődő és a beeső fény intenzitásának hányadosa

nilas jég: a vékony (másképp dm-nél nem vastagabb), új jég orosz eredetű glaciológiai elnevezése

valamint sókristályokból álló zárványokat nagy koncentrációban tartalmazó, néhány deciméternél vastagabb tengeri jég erősen szórja a fényt, fényelnyelési együtthatója pedig a hullámhossz 1000 nanométerről 400 nanométerre csökkenésekor közel másfél nagyságrenddel csökken. Az emberi szem számára az ilyen jég *fehérek* tűnik. A *szürke* jégben már sokkal kisebb koncentrációban fordulnak elő a fényelnyező zárványok, ezért a fehér jégnél jóval kevesebb fényt ver vissza. Fényelnyelési együtthatója az előbb említett hullámhosszcsökkenéskor közel két nagyságrendet csökken. Ezzel magyarázhatók a sarki jég fehér és szürke megjelenési formái.

A fényelnyező zárványoktól mentes jég és a tiszta sarki tengervíz fényelnyelési együtthatója 460 nanométeres hullámhosszon minimummal rendelkezik, amit kék színűnek látunk. Ha tehát összetett (többféle hullámhosszú összetevőket tartalmazó) fény halad át tiszta vízen vagy jégen, a fény eredeti spektrumától függetlenül a 460 nanométernél rövidebb és hosszabb hullámhosszú összetevők egyre jobban elnyelődnek – ezt nevezzük *szelektív fényelnyelésnek* –, és egyre egyszínűbb (monokromatikus) kékké válik a fény.

A jégtörő hajó mögött a vízben kavargó légbuborékokról visszaszórtó fényt (függetlenül az ég felhőfedettségétől) azért vált kékké, mert a vízfelszíntől a buborékokig és vissza megtett úton a kéknél rövidebb és hosszabb hullámhosszak elnyelődtek a tengervízben. A vízfelszínre jutó buborékok képezte habról visszaszórtó fény fehér, mert ekkor nincs szelektív fényelnyelés a vízben. A fehér jégen lévő, olvadékvízből álló tavak azért kékek, mert a beléjük jutó, majd a fenékről visszaverődő fény a tiszta olvadékvízben vagy annak megfagyásakor a tiszta jégben a szelektív fényelnyelés miatt kékké válik. Ha egy jégtömb buborékmentes, akkor a rajta át-

haladó fény a szelektív elnyelés miatt kékké válik. Ugyanezért látszik kéknek a szárazföldi eredetű gleccserjég is. A jégtörő hajó által földarabolt jégtömbök némelyike buborékos fehér jégből állt, de a közepükön húzódó kék csíkok arra utaltak, hogy a jég korábban megolvadt, az olvadákvíz buborékmentes lett, majd a megfagyás után tiszta jéggé vált, ami már szelektíven nyelte el a fényt, bekékitve azt. A későbbi havazások eredményeként aztán fehér jég és hóréteg rakódott a kék színű tiszta jégrétegre. A fehér jéggű jégtáblák víz alatti részei megint csak a vízbéli szelektív fényelnyelés miatt látszottak annál kékebbnek, minél mélyebben merültek a vízbe, vagyis minél hosszabb utat tett meg a fény a vízben.

Mikor a jégtörő hajóról helikopterrel a jégmezőre szálltunk, azt figyeltük meg, hogy tiszta égbolt alatt a jégfelszín árnyékos részei kéken tündököltek, felhős ég alatt viszont az árnyékok szürkék voltak. A jég- és hómező kék, illetve szürke árnyékai nem a fényelnyeléssel függenek össze, hanem azzal, hogy a fehér jégnek és hónak igen nagy, 1-hez közeli az albedója, miáltal a közvetlen napfényt nem kapó, árnyékos részokról az azokat megvilágító, kiterjedt égbolt fényének nagy hányada verődik vissza. Ekkor az árnyékok olyan színűek, amilyen az égboltfény.

Az úszómedencék vize általában világoskék színű, amit gyakran egyszerűen azzal magyaráznak, hogy a fény Rayleigh-szóródik* a vízben, vagy a kék égboltfény verődik vissza a vízről, vagy a medence fala és fenéke kék. Az utóbbi kettő esetben nem kielégítő a magyarázat, mivel az uszodavíz akkor is kék, ha teljesen felhős az ég, vagy zárt az épület és a fényforrások sem kék, illetve a fehér vagy szürke aljú medencékben is kéknek látszik a víz. A Rayleigh-szóródáson alapuló érvelés is sántít: a fény valóban Rayleigh-szóródik a tiszta vízben, hasonlóan a



5. A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem atomreaktorának radioaktív fűtőelemeit körülvevő vízben kékesen derengő Cserenkov-sugárzás
(<http://www.reak.bme.hu>)

légköri fényszóráshoz. A víz levegőhöz képesti közel 770-szeres sűrűsége miatt a vízbéli Rayleigh-szórás is ennyivel erősebb. Megfelelően nagy víztömegben, többször tíz méteres vízvastagság mellett a Rayleigh-szórás tényleg jelentősen hozzájárul a víz kék színéhez a tiszta égbolt kékségéhez hasonlóan. Azonban már néhány deciméter vastag víz is enyhén kéknek látszik, ezért a Rayleigh-szórás nem lehet e jelenség egyedüli oka.

Az úszómedencékbeli víz kék színének is a legfőbb oka a fény vízbéli szelektív elnyelődése: miközben az uszodavízre eső fény eljut a medence faláig/aljáig, majd onnan visszaverődve kijut a vízből, a vízben megtett több deciméteres vagy méteres úton a kéktől eltérő hullámhosszú összetevők elnyelődnek, kiszűrődnek, miáltal végül csak a 460 nanométer körüli hullámhosszakban feldúsult kék fény marad.

Az atomreaktorok radioaktív anyagot tartalmazó fűtőelemeit körülvevő víz kék derengésének oka részben a Cserenkov-sugárzás (lásd ÉT 2005/14 – *A szerk.*) rövidebb hullámhosszakon nagyobb intenzitásában rejlik, zömében pedig a víz szelektív fényelnyelésében. A hullámhossz csökkenésével a Cserenkov-sugárzás intenzitása rohamosan nő. Az emberi szem érzékenységi tartományában, 400 és 750 nanométer között azonban a Cserenkov-spektrum változása nem túl nagy, ezért az ilyen spektrumú Cserenkov-fényt szemünk enyhén kék árnyalatú fehérnek érzékelné. Az atomreaktorokban azonban a Cserenkov-fény a fűtőelemeket közrefogó, több méter vastag vízen át jut a szemünkbe, miközben a víz szelektív elnyelése miatt kékké válik.

HORVÁTH GÁBOR
(ELTE Biooptika Laboratórium,
Biológiai Fizika Tanszék)



KISLEXIKON

Rayleigh-szórás: A fény Lord Rayleigh (John William Strutt, 1842–1919) Nobel-díjas angol fizikus által felfedezett azon szóródása, mikor a szóró részecskék mérete sokkal kisebb a fény hullámhosszánál. Ekkor a szórt fény intenzitása fordítottan arányos a hullámhossz negyedik hatványával.