

4. ábra. Az erősen kölcsönható anyag fázisdiagramja a kémiai potenciál (μ) – hőmérséklet (T) síkon.

juk meg). Véges térfogaton is megjelennek ilyen zérus helyek – Lee–Yang-zérók –, igaz ezek nem fizikai, komplex hőmérsékletekhez tartoznak. Amennyiben végtelen térfogati limeszben a rendszer valódi fázisátmeneteken megy keresztül, akkor a Lee–Yang-zérók a térfogat növekedésével ráhúzódnak a valós tengelyre. Amennyiben csak egy gyors, de analitikus átmenettel állunk szemben, akkor a Lee–Yang-zéróknak a végtelen térfogati limeszben is lesz nem eltűnő képzetes részük, az átmenet analitikus marad. A Lee–Yang-zérók képzetes részének vizsgálata így lehetővé teszi a szingularitásra vezető fázisátmenet és az analitikus átmenet megkülönböztetését.

A 4. ábra mutatja a végeredményt. Két fázist különböztetünk meg. Az alacsony hőmérsékletű fázist hadronikus fázisnak nevezzük (ebben a fázisban a tipikus szabadsági fokok a hadronok, kvarkokból és antikvarkokból álló kötött részecskék). A magas hőmérsékletű fázist kvark-gluon plazma fázisnak nevezzük (ebben a fázisban a tipikus szabadsági fokok a kvarkok és gluonok). A két állapot közötti átmenetet $\mu = 0$ esetén az irodalom részletesen tanulmányozta. Egészen a közelmúltig teljesen ismeretlen volt viszont az átmenet függése az anyagsűrűségtől, illetve az anyagsűrűség hangolására alkalmas kémiai potenciáltól. Ahogy a 4. ábrán láthatjuk, zérus és kis kémiai potenciál esetén a két fázis közötti átmenet egy gyors cross-over. Egy adott hőmérséklet (kb. 162 MeV) és kémiai potenciál (kb. 360 MeV) esetén a fázisátmenet másodrendű. A fázisdiagram ezen pontját hívjuk kritikus végpontnak. Ebben a pontban a kritikus opaleszcenciához hasonló jelenségek kísérleti megjelenését várjuk. Ennél is nagyobb kémiai potenciál, illetve kisebb hőmérséklet esetén a fázisátmenet elsőrendűvé válik.

A fázisdiagram kritikus pontjának tanulmányozása a németországi GSI (Darmstadt) kutatóintézetben épülő új részecskegyorsító egyik elsőleges célja.

Összefoglalva azt mondhatjuk, hogy az erős kölcsönhatás segítségével adhatunk arra a kérdésre választ, hogy mi történik bármilyen anyaggal, ha egyre jobban felmelegítjük, illetve egyre jobban összenyomjuk. Egy új rácstérelméleti módszer segítségével sikerült a fázisdiagram meghatározása, melynek kísérleti ellenőrzése a közeljövő feladata.

AMIT A CUNAMIKRÓL ÉS OKAIRÓL MA TUDUNK

Bárdossy György
ny. egyetemi tanár

A 2004. december 26-án bekövetkezett cunami óta rengeteg újságcikk, rádió- és tévéműsor látott napvilágot erről a természeti jelenségről és pusztító következményeiről. Sajnos számos téves és ellentmondásos értékelés is megjelent. Most, bő évvel e természeti katasztrófa után időszzerű objektív vizsgálat tárgyává tenni, hogy mi az, amit a cunamiról és ezek kiváltó okairól ma tudunk és mi az, amit nem. Ez tanulmányom célja. Értékelésben elsősorban az Egyesült Államok Földtani Szolgálatának (USGS), valamint a Nemzeti Óceán és Atmoszféra Adminisztráció (NOAA) jelentéseit, továbbá *Meskó Attila*, a Magyar Tudományos Akadémia főtitkára közelmúltban megjelent tanulmányát vettem alapul (*História* 2005. 8. szám), de felhasználtam minden, a szaksajtóban és az interneten elérhető szakmai információt is.

Tengeri hullámfajták

A cunami japán szó, a „cu” jelentése kikötő, a „nami” hullámot jelent. Az óceánokon és tengereken háromféle hullámot lehet megkülönböztetni. Leggyakoribb a szél

által keltett „normális” hullám, de az árapály jelensége is hullámot kelt. Végül maga a cunami is hullám, illetve hullámok sorozata. E három hullámfajta tulajdonságai alapvetően eltérnek egymástól.

A szél által keltett hullámok maximum 8–10 m mélyséig nyúlnak le, amplitúdójuk nem haladja meg a 20 métert, 100–500 méteres hullámhossz mellett 20–50 km/óra sebességgel terjednek.

Az árapályhullám 10–30 méter mélyre terjed, amplitúdója 2–10 méter, hullámhossza 1–2 km, terjedési sebessége 20–40 km/óra.

A fentiekől alapvetően eltér a cunami, hiszen az egész víztömeg mozdul meg, amplitúdója csupán 0,4–2 méter, hullámhossza viszont 100–300 km és terjedési sebessége 500–1000 km/óra.

Mind ezek az adatok a nyílt tengerre érvényesek. A partokhoz közeledve a szél által keltett hullámok feltorlódhatnak, átbuknak, és így érik el a partot. Egyes különösen erős szélviharok, például hurrikánok vihardagályt hoznak létre, amikor a hullámok mellett a tenger szintje is több méterrel megemelkedik. Ez történt 2005 augusztusában New Orleans térségében a Katrine hurrikán hatására.

Az *árapálybullámok* elsősorban tölcser alakú öblökben, a víztömeg fokozatos feltorlódása miatt érnek el a szokottnál nagyobb magasságot, például a Kanada keleti partján fekvő Fundy-öbölben (New Brunswick) a dagályhullám 14–16 m magasságot ér el.

A cunamikat, mivel itt az egész víztömeg megmozdul, sokan *tengerrengésnek* is nevezik. Kis amplitúdója miatt a cunamit a nyílt tengeren szabad szemmel nem is lehet észrevenni. Figyelemre méltó a cunamik nagy terjedési sebessége a nyílt tengeren. A partokhoz közeledve a cunami lefékeződik, és ennek következtében az egész víztömeg akár több tíz méter magasra torlódik fel. Különösen összeszűkülő öblökben érhet el nagy magasságot a cunami. A hatalmas víztömeg egyirányú mozgása miatt a cunamik hatása közismerten katasztrofális lehet. A cunamik a nyílt óceánon több ezer kilométerre is terjedhetnek, sőt diffrakció (hullámelhajlás) hatására kiszögellő partokat meg is kerülhetnek. Több esetben a cunami partra érkezése előtt a tenger „visszahúzódott”, azaz a vízszint 1–2 méterrel csökkent. Ilyenkor lapos partokon több száz méter széles sáv kerül szárazra. Ezt a jelenséget a cunamik nagy hullámhossza magyarázza.

Melyek e szembevetendő különbségek okai? A normális, szél által keltett hullámok esetében a szél erősségétől függ a hullámok mérete és sebessége. Az *árapálybullámok*at közismerten a Nap és a Hold gravitációs vonzása hozza létre. Jelenlegi ismereteink szerint *cunamik*at négyféle jelenség hozhat létre:

1. Tenger alatti földrengések.
2. Vulkáni szigeteken bekövetkező robbanásszerű vulkáni kitörések, amelyek következtében a vulkáni építmény összeomlik, és helyét tenger önti el.
3. Nagyméretű tengeralatti földcsuszamlások.
4. Különösen nagy meteorit vagy aszteroida becsapódása a tengerbe.

Tapasztalatok szerint a legtöbb cunamit tenger alatti földrengések hozzák létre. Ugyanakkor az is kiderült, hogy nem minden tenger alatti földrengés okoz cunamit. Úgy tűnik, ha a földrengés hatására a tengerfenék csak oldalirányban mozdul el, nem jön létre cunami. Ha viszont a földrengés alkalmával a tengerfenék több métert megemelkedik vagy lesüllyed, úgy kialakulhat a tengerrengés és ennek következtében a tengerparton a pusztító cunami.

Tenger alatti vulkáni kitörések is létrehozhatnak cunamikat. A tenger alatti földcsuszamlások szerepének mértéke még nem tisztázott. Valószínű, hogy ezeket is tenger alatti földrengések váltották ki.

Meteorit- vagy kisbolygó-becsapódások az emberi történelem folyamán bizonyítottan nem hoztak létre cunamikat, de földtani megfigyelések arra utalnak, hogy a földtörténet során ilyenekre többször is sor került. Amerikai szakértők számításai szerint egy 300 m átmérőjű aszteroida becsapódása a tengerbe 11 m magas cunamit keltene (*Perkins, 2004*). Az utóbbi évtizedek földtani kutatásai kiderítették, hogy a földtörténet során ismételten sor került nagyméretű aszteroidák becsapódására, például a triász és jura, valamint a kréta és harmadkor határán (*Pálfi, 2000*). Amennyiben a becsapódás tengerbe

történt, hatalmas – több száz méteres – cunamik jöhetnek létre. Ilyen földtörténeti korú cunamik egyértelmű bizonyítása azonban még a jövő kutatások feladata.

Az írott történelem legnagyobb cunamijai

– Kr. e. 1650 körül az Égei-tengeri Thera (más néven Szantorini) vulkáni szigete egy rendkívüli méretű kitörés során felrobbant. A nyomában létrejött cunami elpusztította a Therától mintegy 100 km-re délre fekvő Kréta szigetének északi partmenti városait, az ott kialakult minoszi kultúrát. A vizsgálatok szerint a cunami magassága közel száz métert érhetett el.

– 1755-ben tenger alatti földrengés hatására cunami érte el Lisszabon városát és közel 100 000 ember halálát okozta. A cunami érkezését a tenger visszahúzódása előzte meg. A cunami magasságát a korabeli megfigyelők 5–10 m-re becsülték.

– 1883-ban a Jáva közelében levő Krakatau (más néven Krakatoa) vulkáni sziget kitörés során felrobbant, a vulkáni építmény beomlott, ami cunamik egész sorát hozta létre. A legmagasabb 40 m-t ért el, és a közeli Jáva és Szumátra szigetén mintegy 36 000 ember életét oltotta ki. A cunamik a Hawaii-szigetek partjait is elérték, sőt Dél-Amerika nyugati partján is észlelték azokat. A sztratoszférába felkerült vulkáni hamu és por több éven át csökkentette a Föld felszínére jutó napsugárzás erősségét és körülbelül egy fokkal csökkentette az átlagos hőmérsékletet.

– 1896-ban egy Japán partjai előtt kipattant tenger alatti földrengés több mint 20 méter magas cunamit keltett. Az áldozatok száma meghaladta a 26 000-et.

– Rendkívüli figyelmet érdemel az 1958-ban Alaszkában a Lituya-öbölben egy földrengés és földcsuszamlás nyomán létrejött cunami. A terület lakatlan, tehát áldozatok nem voltak. Viszont az alapos földtani megfigyelések és vizsgálatok szerint a cunami magassága a 200 métert is elérhette. Ezt jelezte a parti növényzet pusztulása eddig a magasságig.

– 1960-ban Chile partjai közelében a tengerfenék alatt kipattant földrengés hatására létrejött cunami mintegy 6 000 ember halálát okozta. A cunami magassága meghaladta a 25 métert. Ezt a cunamit órákkal később Japánban is észlelték.

– 1998-ban Pápua Új-Guinea partjaitól 24 km-re kipattant földrengés hatására egy körülbelül 12 m magas cunami keletkezett, amely a parti területen körülbelül 2 200 ember halálát okozta. A feltűnő az, hogy a földrengés csak 7,1 magnitúdójú volt, ilyen magnitúdó mellett pedig nem szoktak nagyobb cunamik létrejönni. A szakemberek véleménye szerint a földrengés egy tenger alatti földcsuszamlást indított meg, és az hozta létre a cunamit. A csuszamlásban részt vett üledék mennyiségét körülbelül 4 köbkilométerre becsülik a szakértők.

– A 2004. december 26-án Szumátrától nyugatra létrejött cunami több mint 30 méter magasságot ért el, és közel 300 000 életet követelt. A halottak pontos számát nem lehetett megállapítani, mert a visszahúzódó hullám a tetemek ezreit sodorta a tengerbe. Kétségtelenül ez volt a



1. ábra. Szumátra szigetének északi végén, Banda Aceh helysége nál a 2004. december 26-i cunami elpusztította a partvonalat.

történelem legnagyobb emberáldozatot követelő cunami-ja, amely Szumátra szigetén kívül Thaiföld és Malajzia partjain, a Maldív-szigeteken, Sri Lankán és India délkeleti partjain is pusztított. A cunamit egy, a Szumátra északnyugati partjaitól körülbelül 160 km-re nyugatra, a tengerfenék alatt kipattant földrengés hozta létre. A cunami a földrengés kipattanása után 15 perccel érte el Szumátra partjait, Thaiföldet 60, Sri Lankát pedig 90 perc alatt. Szumátrán a hullám érkezését a tenger visszahúzdása előzte meg. Ahol a part lapos volt, a hullám 1–2 km-re hatolt be a szárazföldre (1. ábra).

A fenti legnagyobb cunamik mellett a huszadik század során még 140, emberi életet is követelő cunamit jegyeztek fel. Továbbá közel ezer olyan kisebb cunamit is megfigyeltek, amelyek nem okoztak károkat. A legtöbb a Csendes-óceán térségében jött létre. A tapasztalatok szerint a cunamik amplitúdója, hullámhossza és sebessége elsősorban a kiváltó földrengés paramétereitől függ. Általános szabály, hogy minél nagyobb az adott földrengés magnitúdója, annál nagyobb cunami keletkezik. A 7,0-nál kisebb magnitúdójú földrengések általában nem hoznak létre károkat okozó cunamikat.

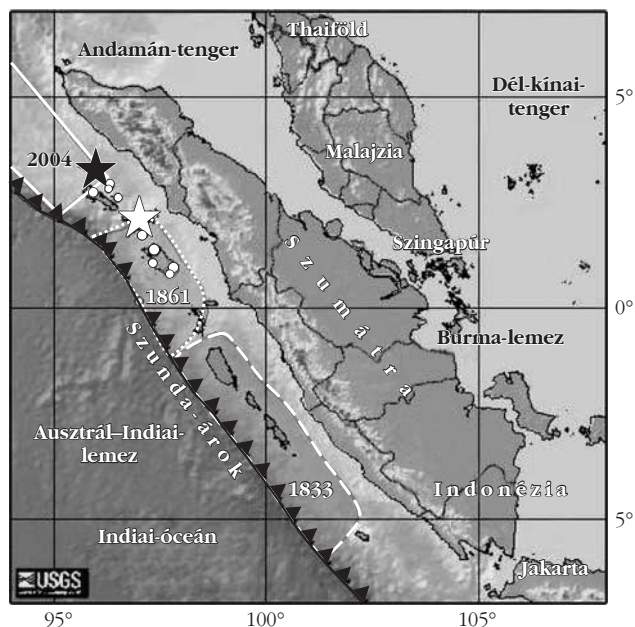
A kontinensvándorlás elméletét az olvasók nyilván ismerik, annyi szó volt már róla a sajtóban, a rádióban és a tévében. A legtöbb földrengés ott keletkezik, ahol az egyik litoszférelmez a másik alá bukik. Ezt a jelenséget nevezik *szubdukciónak*. Földrengésektől kísért szubdukció történik ma is az Indonéz-szigetív külső, délnyugati oldalán és Japán keleti partjai mentén. Ez az oka annak, hogy itt jött létre eddig a legtöbb cunami. A 2004. december 26-i cunamit egy rendkívüli erejű – 9,3 magnitúdójú – földrengés váltotta ki, melynek epicentruma körülbelül 30 km-rel a tengerfenék alatt helyezkedett el. A mérések szerint a földrengés során $2 \cdot 10^{18}$ joule energia szabadult fel. Az azóta elvégzett tengeri mérések szerint a tengerfenéken egy fő törésvonal mentén körülbelül 15–20 m-es oldalirányú elmozdulás történt, továbbá a tengerfenék körülbelül 5–10 m-rel megemelkedett. Ezt a nagy földrengést

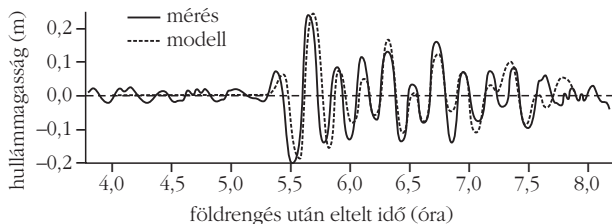
2005 áprilisáig számos gyengébb utóregés követte, amelyek nyomán azonban újabb cunamik nem keletkeztek. A főbb utóregések epicentrumai az elsőtől délkeletre helyezkedtek el (2. ábra). Az ábrán az USGS értelmezése szerinti szubdukciós övet is feltüntették, melynek hossza mintegy 1200 km. E mentén tolódik az Indiai-óceán litoszférelmeze az Indonéz-szigetív alá, mintegy 40–45 fokos szög alatt. Ebben az övben a szubdukció ma is folytatódik, tehát a jövőben is várhatók újabb földrengések, és cunami keletkezése sem zárható ki. Hogy mikor, azt ma nem tudjuk megmondani. A 2. ábrán Szumátra délnyugati oldalán húzódó hegyvonulat ma is működő vulkánok sora. Ezek a szubdukció során alábukó és fokozatosan megolvadó litoszférelmezből származnak. Könnyen illó vegyi komponenseik hatására tör fel a megolvadt kőzetanyag (láva) a felszínre. Ez a vulkáni ív Jáva szigetén is folytatódik. Szumátrán a vulkáni ívtől északkeletre zavartalan kőzetekből álló síkság következik.

A cunamik elleni védekezés

A cunamik kialakulását megakadályozni nem lehet, de katasztrófális következményeik miatt több érintett ország nagy erőfeszítést tesz a közelgő veszedelem jelzésére. Sajnos ma még azt sem lehet megmondani, hogy mikor pattanhat ki valahol cunami létrehozására képes földrengés. Az e téren erősen érintett Egyesült Államok, Japán, Kína és Oroszország óriási erőfeszítéseket tesznek a földrengések minél pontosabb előrejelzésére. Eddig azt sikerült meghatározni, hogy melyek a földrengésekkel leginkább veszélyeztetett területek. Nagy valószínűséggel meghatározható

2. ábra. A 2004. december 26-i cunami földtani–geofizikai értékelése a USGS szakemberei szerint. Jól láthatók Szumátra hegyei, mely aktív vulkáni öv, mögötte a zavartalan kontinentális kéreg. A Szunda-árok (fekete vonal háromszögekkel) a szubdukciós öv kezdete, mögötte a folytonos, a pontozott és a szaggatott fehér vonalak által határolt területek a szubdukciós nyírású övek, a fekete és fehér csillag a 2004-es és az 1863-as földrengés epicentrumai, a körök az utóregések helyét jelzik.





3. ábra. A számított és a ténylegesen mért cunamihullám amplitúdója a nyílt tengeren a földrengés kipattanásától számított órák függvényében (Rat Island cunami, 2003. november 17.)

a földrengések gyakorisága évtizedes időintervallumokon belül. Sajnos egy adott területen a földrengés pontos előrejelzése – beleértve a várható magnitúdót – eddig még nem sikerült.

Korábban főként gyenge előrengések regisztrálásával próbálták adott földrengés várható kipattanását meghatározni, de ez a metodika eddig nem vezetett sikerre. A legutóbbi években különböző elektromágneses jelenségekre terelődött a figyelem, melyek a földrengéseket néhány nappal vagy órával megelőzik. Így például igen rövid frekvenciájú (< 1 Hz) rádióhullámokat észleltek amerikai kutatók Kaliforniában néhány órával egy földrengés kipattanása előtt. Egy másik ígéretes módszer a készülő földrengés körzetében kibocsátott infravörös kisugárzás mérése műholdakról. A NASA mérései szerint a 2001. évi gujarati (India) földrengést néhány nappal megelőzően jelentősen felerősödött az infravörös kisugárzás, ott ahol a földrengés későbbi epicentruma elhelyezkedett. Mindez ma még kísérleti szakaszban van, de a szakemberek szerint megalapozott remény van arra, hogy egy-két évtizeden belül a földrengések előrejelzése érdemben pontosabbá válik (*IEEE Spectrum*, 2005. december).

Napjainkban a reális cél csak a már létrejött cunami minél gyorsabb és pontosabb jelzése, és az érintett lakosság riasztása. Ilyen irányú kutatások és fejlesztések elsősorban az Egyesült Államokban és Japánban folynak 1946 óta. Kiderült, hogy cunamik érkezését a tengerfenéken lehorgonyozott nyomásmérő készülékekkel lehet előre jelezni. Ezek nagy pontossággal mérik a vízoszlop nyomását. Földrengés során a nyomás megváltozik, és a változás mértékét a készülék egy felszíni bójához továbbítja. A készülékek még a cunami hullám átvonulásakor fellépő kis nyomásnövekedést is észlelni tudják, így a cunami előrehaladását a nyílt tengeren is követni lehet. A bójáról az információk műholdra kerülnek, onnan pedig az adott ország cunamiriasztó központjába. A riasztást rádióval és TV-n keresztül azonnal közléstesznek. 1965-re épült ki a PTWC-nek nevezett riasztó-rendszer (Pacific Tsunami Warning Center). Ehhez természetesen földrengésjelző szeizmológiai állomások is tartoznak. Japán partjai mentén jelenleg 80 víz alatti nyomásérzékelő állomás működik folyamatosan.

Az Egyesült Államokban a NOAA felelős a cunamiriasztásért. A NOAA irányításával 2003-ban egy olyan új, számítógéppel vezérelt riasztó-rendszert helyeztek üzembe, amely a szeizmométerekről kapott adatok alapján modellezi a cunami várható paramétereit (Real-Time Tsunami System). A rendszer jelenleg hat, az óceánfenéken elhelyezett szenzorból áll: három az Aleuti-szigetektől dél-

re, kettő az Egyesült Államok nyugati partjai előtt és egy félúton Chile és a Hawaii-szigetek között. A rendszert először 2003. november 16-án alkalmazták, amikor az Aleuti-szigetektől délre egy 7,5 magnitúdójú földrengés pattant ki. A 3. ábra a földrengés kipattanásától számított idő függvényében mutatja be a számított (szimulált) és a ténylegesen mért cunamiamplitúdókat. A két görbe egybeesése az új módszer eredményességét igazolta. A NOAA szakértői azt remélik, hogy ezzel a rendszerrel a korábbinál jóval gyorsabb és pontosabb előrejelzés, illetve riasztás érhető el. Ennek érdekében 2003-ban egy cunamiveszélyt csökkentő programot indítottak meg, melynek keretében számos új szenzort kívánnak a Csendes-óceán térségében elhelyezni. A rendszer általános alkalmazhatósága természetesen attól is függ, hogy mennyire tudják a számítógépes modellezés során az adott terület rész szeizmológiai és földtani adottságait figyelembe venni.

Az Indiai-óceán partvidékén a 2004. évi nagy cunami létrejöttkor cunamiriasztó-rendszer nem működött. Szakértők véleménye szerint megfelelő riasztó-rendszer működése esetén az áldozatok nagy részét volna lehetett volna menteni. Ezért most az Indiai-óceán körül a fenti-ekhez hasonló riasztó-rendszer kiépítését tervezik.

Japán cunamiknak leginkább kitett partjai mentén kőből és betonból védőgátakat is építettek a károk csökkentése érdekében. Ezek azonban csak kisebb cunamik esetében nyújtottak hatékony védelmet. Így például az Aonae kikötőben kiépített védőgáton az 1993-ban keletkezett cunami átcsapott és megrongálta a mögötte levő épületeket. A védőgát mégis hasznos, mert lelassítja az érkező víztömeget és csökkenti annak pusztító hatását.

Végül nem elhanyagolható védekezési módszer a cunamiknak kitett tengerpartokon élő lakosság felvilágosítása és oktatása. Ebbe tartozik a riasztás módjának ismertetése, az optimális menekülési útvonalak kijelölése és bemutatása, és a legveszélyeztetettebb helyeken építkezés betiltása vagy korlátozása. Az Egyesült Államokban úgynevezett *cunamikockázat-térképeket* szerkesztenek és bocsátanak a helyi önkormányzatok rendelkezésére. (A NOAA értékelése szerint az Egyesült Államokban körülbelül 3 millió ember él nagyobb cunamik által veszélyeztetett parti területeken.)

A földrengések keletkezésével, mérésével és geofizikai értékelésével a *szeizmológia* tudománya foglalkozik. Ezt a kérdéskört Meskó akadémikus fent említett cikke részletesen tárgyalja, ezért ennek megismétlését feleslegesnek tartom.

Összefoglalva, a földtörténet során rendszeresen létrejöttek cunamik és megjelenésükkel a jövőben is számolni kell. Megakadályozni nem tudjuk őket, de megfelelő riasztással pusztító következményeiket csökkenteni lehet.

Cunamikkal kapcsolatos információkat közlő és rendszeresen megújított internetes honlapok:

- <http://www.sciencenews.org/scripts/>
- <http://en.wikipedia.org/wiki/Tsunami>
- http://en.wikipedia.org/wiki/2004_Indian_Ocean_earthquake
- <http://www.tsunami.noaa.gov/tsunami.story.html>
- <http://www.ess.washington.edu/tsunami/index.html>
- <http://www.geophys.washington.edu/tsunami/general/physics/physics.html>
- http://upload.wikimedia.org/wikipedia/en/1/1f/USGS_Sunda_Trench.jpg