



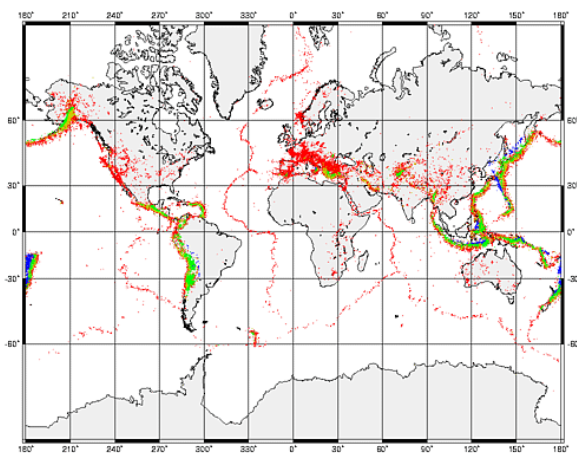
Tsunami – razorni morski val uzrokovan potresom

Snježana Markušić

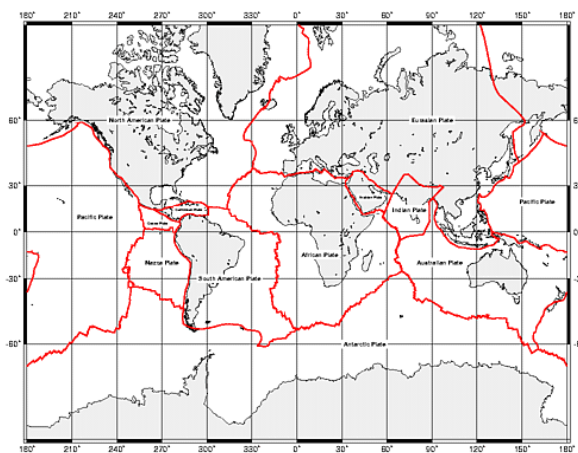
Geofizički odsjek, PMF, Sveuč. u Zagrebu, Horvátovac bb, Zagreb

O globalnoj seizmičnosti

Pod **seizmičnošću** (= seizmička aktivnost) podrazumijevamo prostornu razdiobu potresa u ovisnosti o njihovoj jakosti. Globalna razdioba potresa je prikazana na slici 13-1 (a). Možemo uočiti da Zemlja nije svuda jednako seizmički aktivna, te da se potresi uglavnom dešavaju duž točno određenih linija koje definiraju granice tektonskih ploča (slika 13-1 (b)). Pa tako već samo iz prikaza globalne razdiobe potresa možemo zaključiti da su oni povezani s aktivnom tektonikom ploča. Najveći broj potresa, kao i najjači potresi, vezani su uz dva vrlo uska seizmička područja. Prvi je **cirkumpacifički** seizmički pojas («The Ring of Fire») na kojeg otpada oko 77% ukupne svjetske seizmičnosti. Taj pojas se proteže uz obale Tihog oceana. Drugi je **mediteransko-azijski** seizmički pojas koji obuhvaća oko 18% svjetske seizmičnosti. Proteže se od Kanarskih otoka preko Sredozemlja prema Himalajima, gdje zavija prema jugu preko Sumatre i Jave do Tihog oceana.

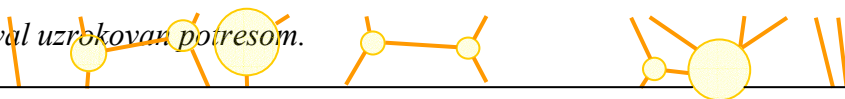


Slika 13-1: (a) Globalna razdoba epicentara potresa.



Slika 13-1: (b) Granice glavnih tektonskih ploča.

Globalnu statistiku potresa izražavamo brojem potresa unutar određenog intervala magnituda koji se dogode tijekom jedne godine (prosječno!) u svijetu (tablica 13-1.). Također je moguće na isti način promatrati statistiku potresa unutar manjih područja koja nas interesiraju, te na osnovu toga zaključivati o eventualnoj prognozi potresa, kao i probabilističkoj procjeni seizmičke ugroženosti datog područja.



Sam potres je jedna od najneugodnijih prirodnih pojava za čovjeka, a koja se očituje u ljuljanju tla, pri čemu čovjek osjeti da mu prestaje stabilnost uporišta, ili u snažnim trzajima Zemljine kore koji mogu razoriti gotovo sve ljudske tvorevine u određenom području. Kod potresa dolazi do naglog oslobađanja energije u unutrašnjosti Zemlje. Prema uzroku nastajanja i izvoru energije potrese dijelimo na tektonske, vulkanske i urušne. Izvor **tektonskih potresa** su elastičke napetosti u Zemljinoj kori. Potres nastaje onda kada te elastičke napetosti prijeđu granicu elastičnosti materije, pri čemu dolazi do naglog oslobađanja akumulirane elastičke energije. Na tektonske potrese otpada 90% svih potresa. Izvor **vulkanskih potresa** je naglo oslobađanje termokemijske energije iz magme i to kad ona prodire na površinu. No pri tome (erupcija vulkana) se samo malen dio ukupne energije pretvori u mehaničku energiju elastičkih valova. Glavni dio te energije je potreban za dizanje masa iz unutrašnjosti ili pak prijeđe u atmosferu. Prema tome vulkanski potresi nisu snažni, a pomaci tla su im reda veličine onih kod velikih eksplozija. Na vulkanske potrese otpada 7% svih potresa. **Urušni potresi** nastaju prilikom urušavanja šupljina u Zemljinoj kori, koje nastaju djelovanjem vode na materije topive u vodi. Izvor energije im potječe od polja sile teže, tako da kod urušavanja naglo opadne potencijalna energija postojeće raspodjele masa. Energija tih potresa je jako mala i analogna oslobođenoj energiji prilikom pada meteorita. Na urušne potrese otpada 3% svih potresa.

Tablica 13-1: Globalna čestina potresa od 1900. godine.

Opis	Magnituda	Godišnji prosjek
Ogroman	>8	1
Velik	7–7.9	18
Jak	6–6.9	120
Umjeren	5–5.9	800
Slab	4–4.9	6,200
Malen	3–3.9	49,000
Vrlo slab	2–3	1,000 ¹
Vrlo malen	1–2	8,000 ¹

¹ Dnevno

O valovima u moru

Valovi u moru predstavljaju periodičku deformaciju granične površine. Površinski valovi se javljaju na granici atmosfera-more, dok se u moru još javljaju i **unutarnji valovi** koji nastaju na granicama različitih slojeva u moru. Osim toga,



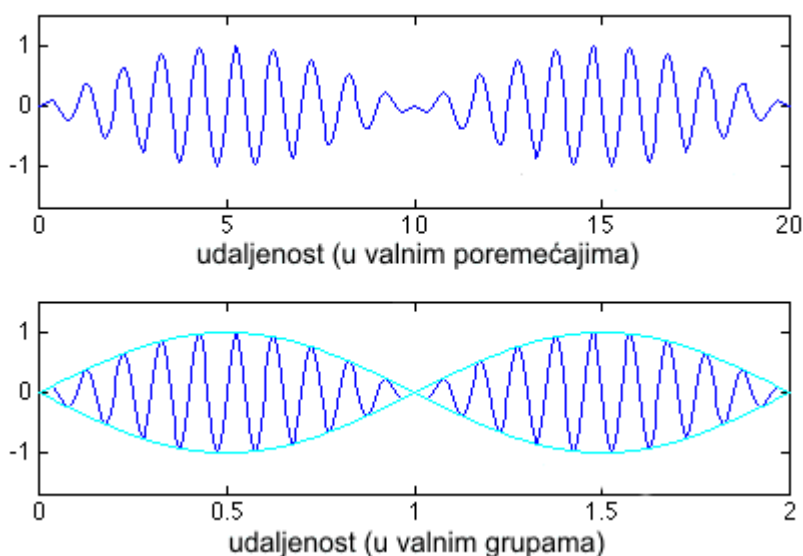
unutarnji i površinski valovi mogu se javljati na otvorenom oceanu, kao i zbog postojanja prostornih promjena u topografiji mora – tzv. **rubni valovi**.



Slika 13-2: Grafički prikaz vala u moru.

Valovi se gibaju određenom valnom brzinom, dok čestice u moru opisuju periodičko gibanje te se vraćaju na početni položaj tijekom jednog ciklusa. Kako vidimo na slici 13-2. valna visina je promjena u visini između brijega i dola vala, te iznosi dvije valne amplitude. Valna duljina pak je udaljenost između dva susjedna brijega ili dola vala, dok se period vala definira kao vrijeme potrebno da dva susjedna brijega ili dola vala prođu neku čvrstu točku. Broj brijegova ili dolova vala koji prođu pokraj čvrste točke u jedinici vremena predstavlja frekvenciju vala.

Valovi mogu biti progresivni, što znači da se njihova energija giba u određenom smjeru, ili stojni valovi koji predstavljaju dva progresivna vala koji se gibaju u suprotnim smjerovima. Primjer progresivnog vala su **plimni valovi**, dok su **slobodne oscilacije** - seši primjeri stojnih valova u moru.



Slika 13-3: Superpozicija dvaju valova slične valne duljine ima za posljedicu gibanje njihove ovojnice grupnom brzinom.

Sila uzročnica nastanka valova u moru može biti periodička i neperiodička, pa stoga razlikujemo valove uzrokovane plimotvornom silom - plimni valovi, valove uzrokovane vremenskim promjenama topografije dna - **tsunamiji**, te valove uzrokovane atmosferskim djelovanjem na površini mora - **površinski valovi uzrokovani vjetrom**, seši i drugi. Osim toga, na kraćim valnim duljinama (manjim od 1.7 cm) javljaju se kapilarni valovi, koji su pokretani (relaksirani) silom napetosti površine mora. Na kraju, činjenica da je Zemlja rotirajući elipsoid uzrokuje i pojavu

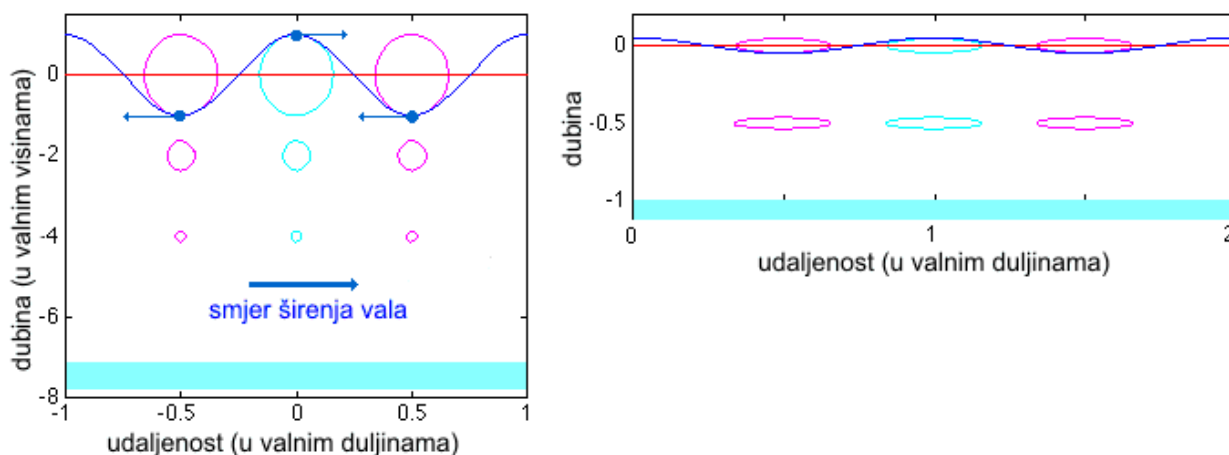


inercijalnih oscilacija i **Rossbyjevih valova**, koji se mogu manifestirati kao površinski ili unutarnji valovi.

Superpozicija više valnih poremećaja koji se gibaju u istom smjeru predstavlja valnu grupu ili valni paket. Pojedinačni valovi u valnoj grupi gibaju se valnom brzinom c , dok valna grupa c_g putuje brzinom:

$$c_g = c - \lambda \frac{dc}{d\lambda} = \frac{d\omega}{dk}, \quad \omega = \frac{2\pi}{T}, \quad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

gdje je λ valna duljina, ω kružna frekvencija, k valni broj, te T period vala. U moru je za većinu valova valna brzina proporcionalna valnoj duljini, odnosno dulji valovi se brže gibaju i obrnuto. Stoga je grupna brzina manja od pojedinačne brzine valova koji sačinjavaju grupu (slika 13-3.). Energija valnog poremećaja se giba grupnom brzinom, a skupina valova kod kojih se razlikuju valna i grupna brzina nazivaju se disperzivni valovi.



Slika 13-4: Gibanje čestica mora kod kratkoperiodičkih (lijevo) i dugoperiodičkih (desno) valova.

Naposljetku, valove dijelimo na **valove dubokog mora**, za koje vrijedi da je valna duljina mnogo manja od dubine mora, te na **valove plitkog mora**, za koje je dubina mora bitno manja od valne duljine valnog poremećaja (slika 13-4.). Primjeri valova dubokog mora su **površinski valovi uzrokovani vjetrom**, dok su **tsunami** predstavnici valova plitkog mora.

Što uzrokuje pojavljivanje potresnih valova – tsunami?

Tsunami su **dugi valovi** uzrokovani tektonskim pomicanjem ploča morskog dna, odnosno podmorskim potresima. Naziv potječe iz japanskog jezika (tsuo-NAH-mee) te znači "val u luci". Često ih se pogrešno naziva **plimnim valovima**, no nemaju nikakve veze s plimnim oscilacijama.



Uzroci nastajanja tsunamija su: potresi (više od 80% slučajeva), odroni (npr. Aljaska, 1958.), vulkanske erupcije (npr. Krakatau, 1883.), eksplozije (npr. Halifax, 1917.) i udari meteorita (npr. Karibi, prije oko $65 \cdot 10^6$ godina).

Najrazorniji poznati tsunami u povijesti je bio uzrokovan erupcijom vulkana Krakatau na Sundskim otocima 1883. godine. Najviša zabilježena visina vala tada je iznosila 35 m, dok se broj žrtava popeo na 36830. Osim toga, na Pacifiku su zabilježena 4 tsunamija viša od 30 m u razdoblju nakon 684. godine.

Dugi valovi putuju brzinom c koja iznosi:

$$c = \sqrt{gH}$$

gdje je g ubrzanje sile teže, a H dubina mora. Iz navedenoga vidimo da je brzina širenja tsunamija ovisna samo o dubini oceana. Lako je izračunati da će brzina c , za prosječnu dubinu mora od 4000 m, iznositi približno 200 m/s, što je oko 700 km/h.

Kako uobičajeni periodi tsunamija (T) iznose od 10 do 100 minuta, a ovise o prostorno-vremenskim karakteristikama pomicanja morskog dna u zoni epicentra, tako možemo izračunati da će uobičajene duljine valnih dužina ($\lambda = c \cdot T$) biti od 100 do 1000 km.

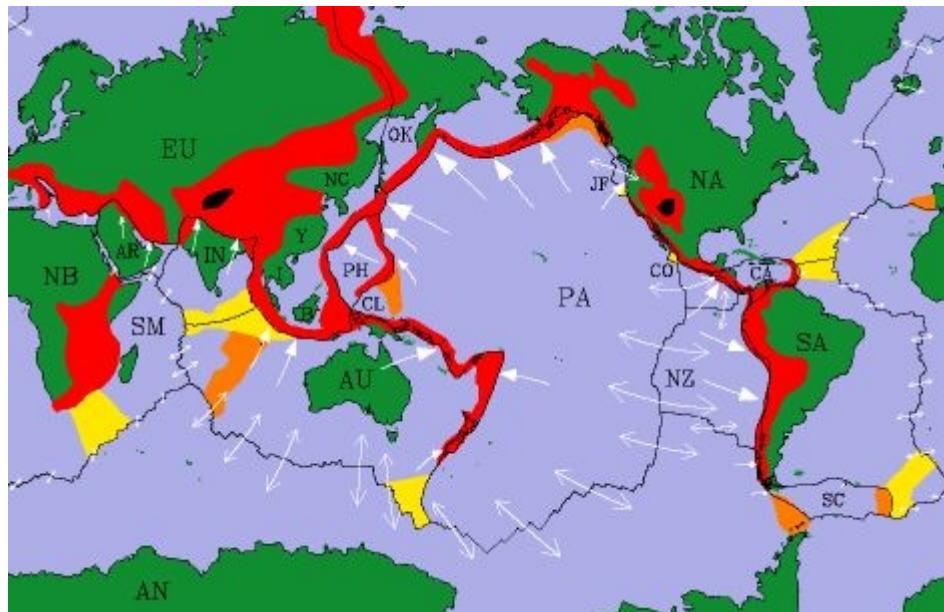
U blizini epicentra visina potresnih valova može biti izuzetno visoka. S udaljavanjem od epicentra, te prilikom putovanja u dubokim oceanskim zaravnima, tsunami ima male amplitude no putuje, kako je već navedeno, velikim brzinama. Približavajući se obali, oni se usporavaju te se, zbog **sačuvanja mase**, uzdižu ovisno o smanjenju dubine mora. Dolaskom na obalu njihove visine mogu poprimiti izvanredne vrijednosti od nekoliko desetaka metara.

Postoji još jedna važna činjenica vezana uz tsunamije, a to je brzina kojom ti valovi gube energiju. Općenito vrijedi da je brzina opadanja energije vala obrnuto proporcionalna njegovoj valnoj dužini. Tako proizlazi, da tsunami može dugo putovati vrlo velikom brzinom, a da pri tome izgubi jako malo energije, što samo pridonosi njegovoj razornosti.

26. prosinca 2004. – potres u Indijskom oceanu (Sumatra – Andaman otočje)

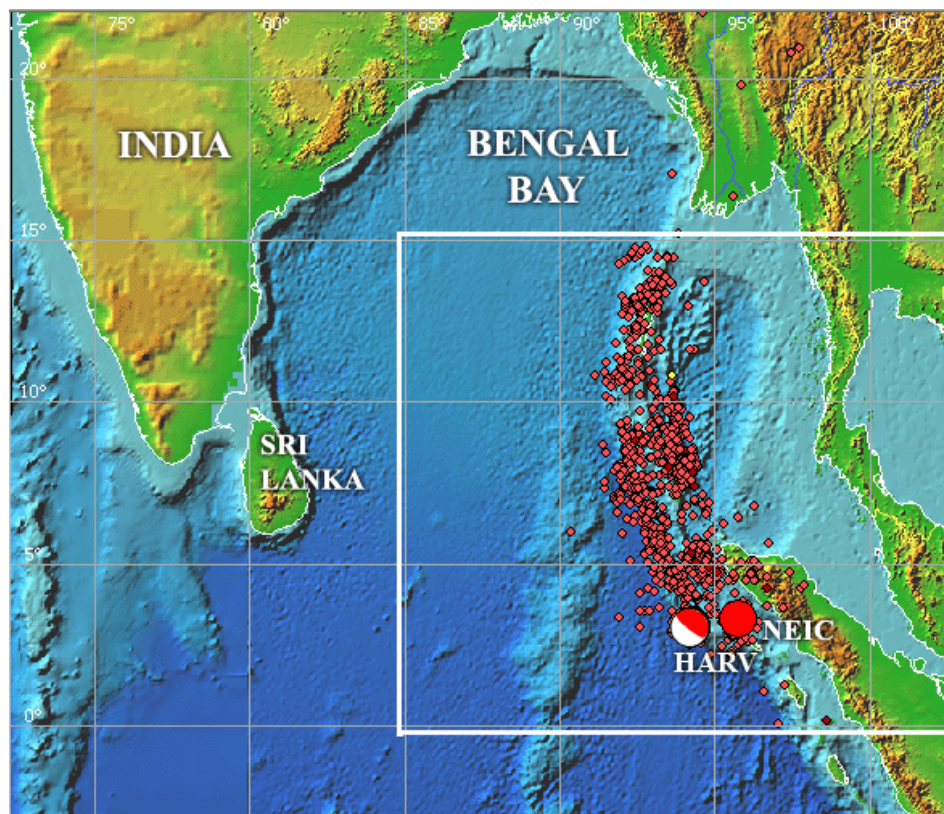
Zemljinu vanjsku ljusku čini 15 glavnih krutih ploča, debljine oko 100 km. Ploče se gibaju relativno jedna prema drugoj, brzinom od nekoliko centimetara na godinu (otprilike brzina rasta noktiju). Ploče su krute u smislu da unutar njih dolazi do vrlo malih deformacija (idealno bi bilo da ih uopće nema) dok se glavnina (idealno bi bilo da sva) deformacije dešava na granicama ploča, izazivajući potrese, formiranje planina, vulkanizme,... Tip granica i deformacija unutar ploča ovise o smjeru i brzini gibanja, kao i o termalno-mehaničkoj strukturi samih ploča.

Na slici 13-5. možemo vidjeti da se Indijska (IN) i Australijska (AU) ploča gibaju prema sjeveru i sjeveroistoku, te se sudaraju s Euroazijskom (EU). To gibanje Indije prema sjeveru deformira cijelo područje, pa se pojavljuje mnoštvo malih ploča (mikroploče) i blokova.



Slika 13-5: Smjerovi gibanja velikih tektonskih ploča

(preuzeto iz R.G. Gordon and S. Stein, *Global tectonics and space geodesy*, *Science* **256**, 333-342 (1992)).



Slika 13-6: Lokacija epicentara potresa u Indijskom oceanu od 26.12.2004. Veliki krug pokazuje položaj epicentra glavnog potresa prema NEIC i HARV, a mali kružići lokacije epicentara naknadnih potresa koji su se dogodili unutar prvih mjesec dana nakon glavnog

(preuzeto s <http://tsun.sssc.ru/tsulab/20041226.htm>)

Indija se podvlači pod Burmansku mikroploču brzinom od oko 5 cm na godinu. Tamo se glavina potresa događa na dodiru ploča duž luka Sumatre (zona podvlačenja je nazvana Sunda brazda). Dana 26. prosinca 2004. upravo se na Sunda brazdi, oko 150 km od zapadne obale sjeverne Sumatre, dogodio izuzetno jaki potres, magnitude 9.0.



Na slici 13-6. dana je prostorna razdioba dijela naknadnih potresa, uključujući i položaj epicentra glavnog potresa.



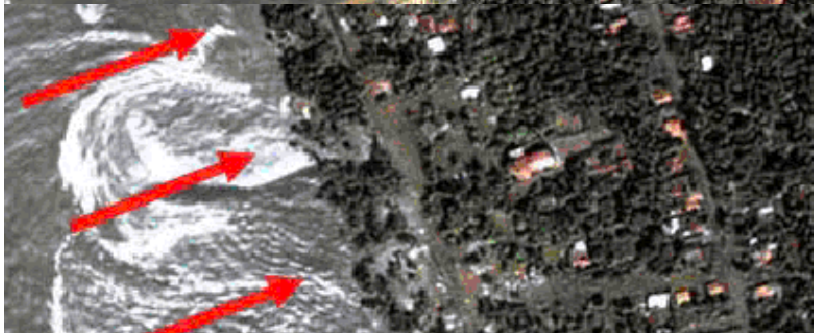
Slika 13-7: Satelitska snimka obalnog područja Kalutare (Šri Lanka) prije potresa od 26.12.2004.

(DigitalGlobe Quickbird satellite)



Slika 13-8: Iznenadno povlačenje vode prije udara tsunamija.

(DigitalGlobe Quickbird satellite)



Slika 13-9: Nailazak tsunamija.

(DigitalGlobe Quickbird satellite)

Navedeni potres je jedan od najjačih koji su se dogodili od kad postoji instrumentalna registracija. Točnije, ovo je četvrti najjači potres u svijetu od 1900. i najjači poslije potresa koji se 1964. dogodio na Aljasci ($M=9.2$). Ukupno je poginulo više od 283100 ljudi, 14100 ih se još smatra nestalima, a više od 1500000 je ostalo bez krova nad glavom u 11 zemalja Južne Azije i Istočne Afrike. Potres je uzrokovao znatne štete i gubitke u području sjeverne Sumatre, Indonezije, te otočja Nicobar.

Tsunami, koji je nastao kao posljedica ovog potresa, uzrokovao je više šteta i gubitaka ljudskih života od ijednog do sada instrumentalno zabilježenog potresa i to u čak 18 država koje graniče s Indijskim oceanom, te je bio registriran na gotovo svim svjetskim postajama u Pacifiku, te Indijskom i Atlantskom oceanu. U blizini sjeverne Sumatre izmjerena je visina vala od 10.5 m, a na plimnoj postaji Manzanillo u Mexicu registriran je val visine 2.6 m. Val je za 2-3 sata došao do Indije, za 3 sata do Šri Lanke, a za 7 sati prevalio je udaljenost od 4500 km i došao do obala Somalije.



Razorne posljedice tsunamija, u smislu gubitaka ljudstva, mogu se spriječiti, ili bar ublažiti, dobro organiziranom mrežom motrenja i obavješćivanja. Međutim, za područje Indijskog oceana ne postoji organizirani sustav obavješćivanja i upozoravanja na tsunamije, kao što takav sustav postoji za Pacifik (sjedište u Honolulu). Tako većina zemalja koje je tsunami poharao nema organizirane ni službe motrenja. Na slici 13-7. je satelitska snimka obalnog dijela Kalutare (Šri Lanka) prije potresa. Jedini znak prije nego što je tsunami udario je bilo iznenadno povlačenje vode ostavljajući stotine metara plaže bez vode (slika 13-8.). Nakon toga do obale Kalutare je došlo nekoliko valova tsunamija u intervalima od 5 do 40 minuta. Voda je prodrla u kopno dublje od 1 km, prouzročivši strašne štete (slika 13-9.).



Slika 13-10: Fotografija nepoznatog autora - nailazak tsunamija (Phuket, Tajland).

Dakle, možemo zaključiti da jedini pouzdani znak da sigurno dolazi tsunami je kada se voda u zaljevima, lukama i plažama iznenada povuče, ostavljajući ribe i brodove na suhom. Kada se to dogodi, možete biti sigurni da će udar tsunamija uslijediti bilo kada u narednih 5 do 30 minuta. U tom trenutku najbitnije je skloniti se što dalje od obale, jer udar tsunamija je strašniji i razorniji nego što možete i zamisliti. To je vidljivo i iz fotografije prikazane na slici 13-10. na kojoj je, sa obližnjeg nebodera, snimljen nailazak tsunamija na obalu grada Phuketa, Tajland. Obratite pažnju na visinu vala u odnosu na visine zgrada.