

Tsunami

P. F. Góra

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej UJ

<http://th-www.if.uj.edu.pl/zfs/gora/>

Kraków, 16 czerwca 2009



- I. Co to jest tsunami
- II. Przyczyny tsunami
- III. Fizyka tsunami tektonicznego
- IV. Niszczycielskie działanie tsunami
- V. Dane historyczne i przewidywania
- VI. Podsumowanie

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

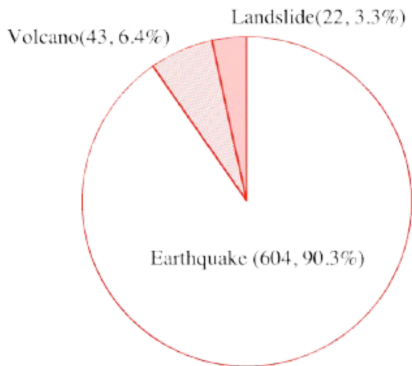
III. Fizyka tsunami
tektonicznegoIV. Niszczycielskie
działanie tsunamiV. Dane historyczne i
przewidywania

VI. Podsumowanie

Tsunami dosłownie oznacza “falę zatokową”. Są to bardzo długie fale, przybierające monstrualne rozmiary na płytkich wodach przybrzeżnych, jednak w zdecydowanej większości przypadków pochodzące z głębokich wód oceanicznych.

Tsunami są falami płytkiej wody, ale co to *naprawdę* znaczy, zobaczymy za chwilę.

II. Przyczyny tsunami



All tsunami data during 1790- 1990

Okolo trzy tsunami na rok.

> 90% tsunami ma przyczyny sejsmiczne.

Spośród podoceanicznych trzęsień ziemi, tylko te, w których jedna płyta tektoniczna wciska się pod drugą, mogą wywołać tsunami.

I. Co to jest tsunami

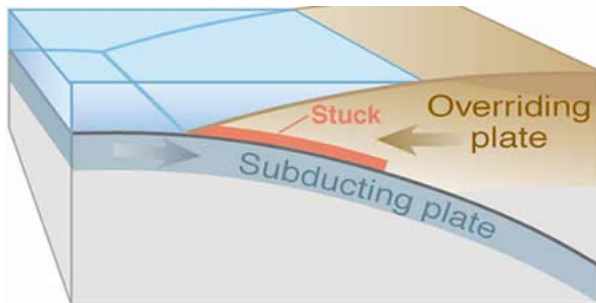
II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie



Płyta tektoniczna wsuwa się pod drugą (subdukcja)...

I. Co to jest tsunami

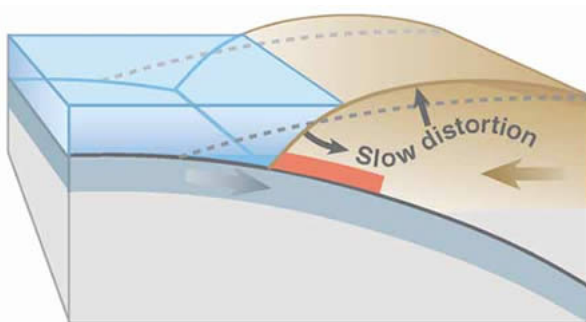
II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami
tektonicznego

IV. Niszczycielskie
działanie tsunami

V. Dane historyczne i
przewidywania

VI. Podsumowanie

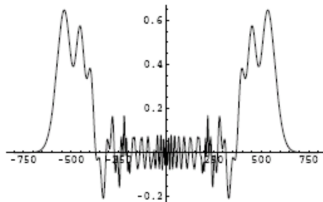


Górna płyta “zakleszcza się”...

2. Rozpad “góry wody”

“Góra wody” rozpada się na składowe harmoniczne, rozplywające się symetrycznie od uskoku, *o długościach aż do szerokości obszaru wypiętrzonego $\lambda \simeq 150$ km.*

Szacujemy, iż amplituda najdłuższego modu wynosi $a = 1.5$ m.



Symulacja rozpadu “góry wody” o początkowej wysokości $h = 1$ i szerokości $\lambda = 200$ (w umownych jednostkach).

$$a \ll d \ll \lambda \quad (1)$$

Tsunami **jest** falą płytkiej wody i to falą o bardzo małej amplitudzie!

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody

2. Rozpad “góry wody”

3. Prędkości przepływu

4. Relacja dyspersyjna

5. Wyższe poprawki

6. Tsunami jako fale niedispersyjne

7. Wartości liczbowe

8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

3. Prędkości przepływu

(i) W ciągu połowy okresu grzbiet fali staje się doliną, a zatem prędkość przepływu pionowego musi być rzędu

$$V \sim \frac{a}{\tau} \quad (2)$$

(ii) Ponieważ woda jest nieściśliwa, w tym samym czasie woda musi przemieszczać się horyzontalnie.

Ponieważ tsunami jest falą płytkiej wody, można przyjąć, że cała kolumna wody pod grzbietem fali przemieszcza się z tą samą charakterystyczną prędkością U . Objętość wody przemieszczona poziomo musi być porównywalna z objętością wody przemieszczoną pionowo (od grzbietu do doliny fali), a więc

$$U_{\tau} L d \sim a \lambda L \quad \Rightarrow \quad U \sim \frac{a \lambda}{\tau d} \quad (3)$$

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna
5. Wyższe poprawki
6. Tsunami jako fale niedispersyjne
7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

4. Relacja dyspersyjna

(i) W fali harmoniczej średnia energia kinetyczna jest równa średniej energii potencjalnej. Mamy zatem

$$\rho \cdot \lambda L d \cdot U^2 \sim \rho \cdot \lambda L a \cdot g a \quad (4)$$

(ii) Wstawiając do (4) wyrażenie (3) na U , otrzymujemy następującą **relację dyspersyjną dla fal płytkiej wody**:

$$\tau = \frac{\lambda}{\sqrt{gd}} \quad (5)$$

(iii) Jako prędkość fazową (prędkość grzbietu fali) otrzymujemy

$$c = \frac{\lambda}{\tau} = \sqrt{gd} \quad (6)$$

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu

4. Relacja dyspersyjna

5. Wyższe poprawki
6. Tsunami jako fale niedyspersyjne
7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

5. Wyższe poprawki

Wszystko to można wyprowadzić w sposób matematycznie ścisły, przyjmując, że woda jest nieściśliwa i że nie ma lepkości: $\text{div } \mathbf{v} = 0$, $\text{rot } \mathbf{v} = 0$, gdzie \mathbf{v} oznacza pole prędkości cząsteczek wody, oraz że $d \ll \lambda$. Pozwala to uwzględnić wyższe człony rozwinięcia:

$$\begin{aligned} c = \frac{\lambda}{\tau} &\simeq \sqrt{gd} - \frac{1}{6}(kd)^2 \sqrt{gd} \\ &= \sqrt{gd} - \frac{2\pi^2}{3} \left(\frac{d}{\lambda}\right)^2 \sqrt{gd} \end{aligned} \quad (7)$$

Pierwszy wyraz rozwinięcia (7) odtwarza otrzymane uprzednio wyrażenie (6).

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna

5. Wyższe poprawki

6. Tsunami jako fale niedispersyjne
7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

6. Tsunami jako fale niedispersyjne

Jeżeli przyjąć $d/\lambda \simeq 0$, prędkość fazowa fal płytkiej wody spełnia

$$c = \sqrt{gd}$$

Prędkość fazowa fali płytkiej wody zależy tylko od głębokości.

Składowe harmoniczne o różnych długościach przemieszczają się z tą samą prędkością — profil fali nie ulega zmianie.

Jeżeli uwzględnić dalsze wyrazy w rozwinięciu (7), profil tsunami się zmienia — tsunami dzieli się na szereg fal o malejących długościach, z najdłuższymi falami poruszającymi się najszybciej.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna
5. Wyższe poprawki

6. Tsunami jako fale niedispersyjne

7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

7. Wartości liczbowe

Przyjmując nasze oszacowania $d = 4$ km, $\lambda = 150$ km, otrzymujemy $c = 200$ m/s = 720 km/h, $\tau = 720$ s \simeq 12 min. $U \sim 8$ cm/s, $V \sim$ mm/s.

Zdjęcia satelitarne sugerują większe długości ($\lambda \simeq 400$ – 500 km) i mniejsze amplitudy ($a \simeq 60$ cm). Nie zmienia to prędkości fazowej, c , ale okres rośnie do $\tau \simeq 40$ min.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna
5. Wyższe poprawki
6. Tsunami jako fale niedispersyjne

7. Wartości liczbowe

8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

Tsunami zaczyna swe życie jako fala płaska, ale ponieważ czuje krzywiznę Ziemi, podróżując przez otwarty ocean staje się falą kulistą — rozciąga się, a zatem zmniejsza się jego amplituda. Oddziaływanie ze strukturami dna oceanu może prowadzić do rozpraszania i dalszego spadku amplitudy. Tsunami może odbić się od brzegu lub struktur dna morskiego i zaatakować z “odwrotnej” strony.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad “góry wody”
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna
5. Wyższe poprawki
6. Tsunami jako fale niedispersyjne
7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

...jego okres nie zmienia się. Zgodnie z relacją dyspersyjną (5), **prędkość** fazowa $c \sim \sqrt{d}$ **oraz długość fali** $\lambda \sim \sqrt{d}$, a więc tak prędkość fazowa, jak i długość fali **maleją** na płytkich wodach przybrzeżnych. Ponieważ energia zawarta w fali jest z bardzo dużą dokładnością zachowana, $E \sim \lambda a^2 \simeq \text{const}$, **amplituda musi rosnać** jak $a \sim 1/\sqrt{\lambda} \sim d^{-1/4}$.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna
5. Wyższe poprawki
6. Tsunami jako fale niedispersyjne
7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

Tsunami, które ma okres $\tau = 12$ min, rozpoczyna się na głębokości $d = 4$ km i ma tam długość fali $\lambda = 150$ km oraz amplitudę $a = 1.5$ m, porusza się z prędkością $c = 720$ km/h. Przybywszy na wody o głębokości $d = 40$ m, zwalnia do $c = 72$ km/h, jego długość fali maleje do $\lambda = 15$ km, amplituda zaś rośnie do $a = 5$ m. Na jeszcze mniejszych głębokościach amplituda rośnie jeszcze bardziej, fala zaś jeszcze bardziej zwalnia. Gdy $a \sim d$, pojawiają się efekty nieliniowe.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

1. Góra wody
2. Rozpad "góry wody"
3. Prędkości przepływu
4. Relacja dyspersyjna
5. Wyższe poprawki
6. Tsunami jako fale niedispersyjne
7. Wartości liczbowe
8. Gdy tsunami zbliża się do lądu...

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

Wbrew obiegu opinii, to nie sama *wysokość* fali jest najbardziej niszczycielskim czynnikiem tsunami — “zwykłe” fale przyboju w czasie potężnego sztormu też mogą osiągać amplitudy kilkumetrowe, jednak ich destrukcyjna potęga, choć wielka, jest znacznie mniejsza od tsunami. Co zatem decyduje o sile rażenia tsunami?

(i) Energia. Na otwartym oceanie tsunami ma energię

$$E = \frac{1}{2} \rho g \lambda L a^2, \quad (8)$$

co przy przyjętych tu parametrach daje $E \simeq 2 \times 10^{15}$ J. Bardzo niewiele energii jest rozpraszane, zatem przy uderzeniu o wybrzeże, na każdy metr przypada $E/L \simeq 2 \times 10^9$ J/m. Odpowiada temu gęstość mocy $E/(L\tau) \simeq 2 \times 10^6$ W/m — tsunami wydziela kilka megawatów mocy na każdy metr wybrzeża!

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

Przed tsunami

Atak tsunami

Cofające się tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

IV. Niszczycielskie działanie tsunami (c.d.)

(ii) Długość fali. Powiada się, że na brzeg spada “ściana wody”. Jest to instucija fałszywa, nie jest to bowiem “ściana” (ściana jest cienka w stosunku do swojej wysokości), ale wysoka na kilka-kilkanaście metrów, pędząca z prędkością samochodu, gruba na kilka kilometrów **plyta** wody. Tsunami może wyglądać jak bardzo gwałtowny, olbrzymi przyptyw, nie zaś jak atak szczególnie wysokich fal przyboju.

(iii) Długość penetracji. Tsunami szybko wytraca energię na bardzo płytkich wodach przybrzeżnych i na lądzie, ale i tak może się wdrzeć daleko w głąb lądu, niekiedy nawet na ponad kilometr. Może wdrzeć się na tereny położone znacznie wyżej nad poziomem morza niż wynosi amplituda samej fali tsunami.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

Przed tsunami

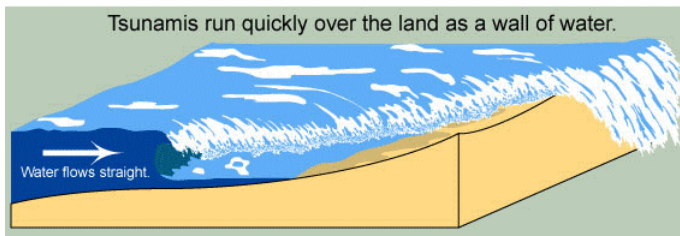
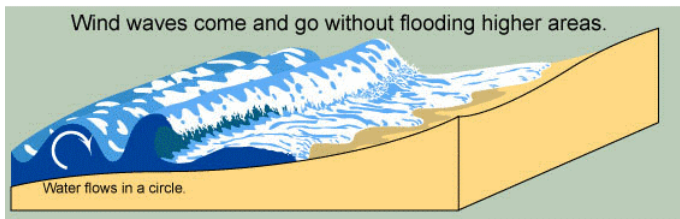
Atak tsunami

Cofające się tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

- I. Co to jest tsunami
- II. Przyczyny tsunami
- III. Fizyka tsunami tektonicznego
- IV. Niszczycielskie działanie tsunami
- V. Dane historyczne i przewidywania
- VI. Podsumowanie



IV. Niszczycielskie działanie tsunami (c.d.)

(iv) Powtarzające się ataki. Wybrzeże może być atakowane przez kolejne grzbiety fali tsunami, w odstępach równych okresowi fali, a więc rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu minut. Cofające się tsunami może sprawiać wrażenie gigantycznego odpływu. Czasami taki “odpływ” może poprzedzić pierwszy atak tsunami.

Niekoniecznie pierwsza fala (pierwszy grzbiet fali) jest najbardziej niszczycielska. Fala, która w nocy z 22 na 23 maja 1960 (po “chilijskim” trzęsieniu ziemi) zniszczyła miasto Hilo na Hawajach, była trzecią z kolei i nadeszła w godzinę po pierwszej.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

Przed tsunami

Atak tsunami

Cofające się tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

V. Dane historyczne i przewidywania

Chociaż przedstawione wyżej rozważania dotyczyły głównie tsunami tektonicznych, najciekawsze (?) przykłady dotyczą innego typu tsunami: Tsunami wywołanych przez wielkie osunięcia ziemi, które mogą — choć nie muszą — być powiązane z wybuchami wulkanów.

Tsunami

P. F. Góra

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

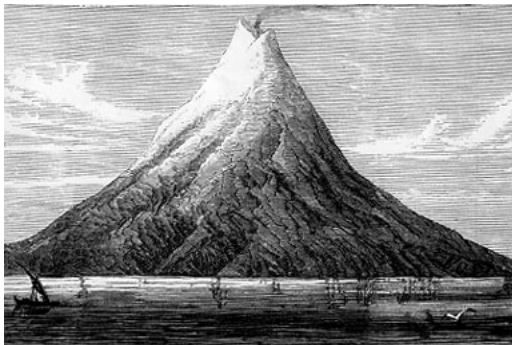
Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Krakatau, 27 sierpnia 1883



Wybuch wulkanu Krakatau był jedną z największych katastrof wulkanicznych współczesnego świata. Wybuch znacząco zmienił geografę Cieśniny Sundajskiej i wywołał tsunami o wysokości fal ~ 30 m i długości ~ 7 km. Większość spośród $\sim 36\,000$ ofiar wybuchu padła ofiarą tsunami.

Tsunami

P. F. Góra

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

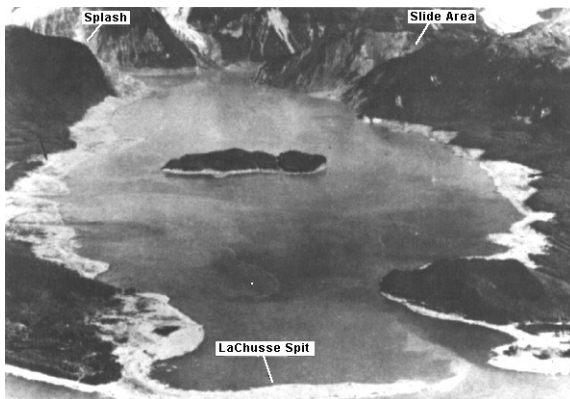
V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale
La Palma, Wyspy Kanaryjskie —
megatsunami?

VI. Podsumowanie



Widok Lituya Bay od strony oceanu

- I. Co to jest tsunami
- II. Przyczyny tsunami
- III. Fizyka tsunami tektonicznego
- IV. Niszczycielskie działanie tsunami
- V. Dane historyczne i przewidywania
 - Santorini — zagłada Atlantydy?
 - Krakatau, 27 sierpnia 1883
 - Największe zarejestrowane fale
 - La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?
- VI. Podsumowanie

La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

Tsunami

P. F. Góra

Na wyspach wulkanicznych stoki wulkanów są geologicznie niestabilne i grożą masywnymi osunięciami ziemi.



Dane geologiczne świadczą o tym, że stoki wulkanów na Wyspach Kanaryjskich w ciągu ostatnich kilku milionów lat kilkanaście razy zapadały się, powodując olbrzymie osunięcia ziemi.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

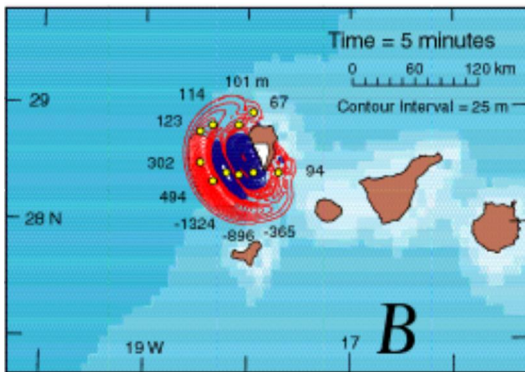
La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Scenariusz możliwego tsunami (B)

Tsunami

P. F. Góra



I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

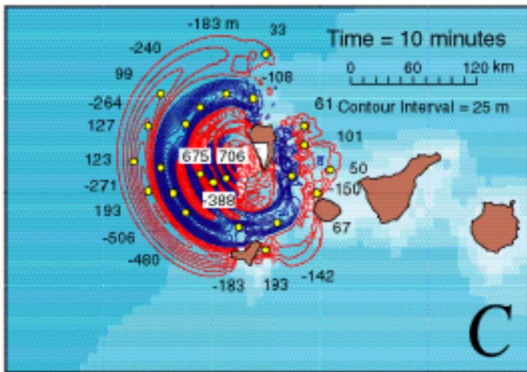
Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Scenariusz możliwego tsunami (C)



Tsunami

P. F. Góra

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

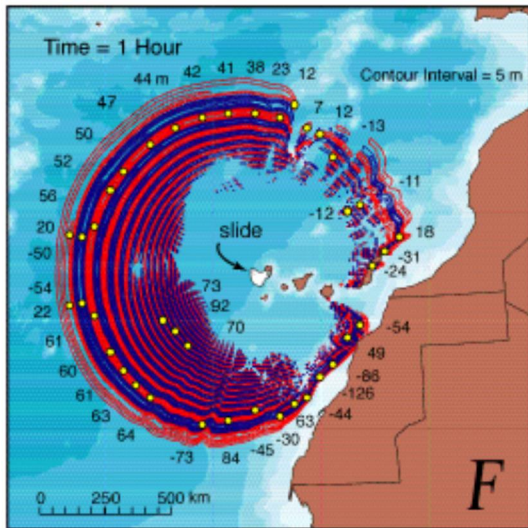
Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Scenariusz możliwego tsunami (F)



Tsunami

P. F. Góra

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zgląda Atlantydy?

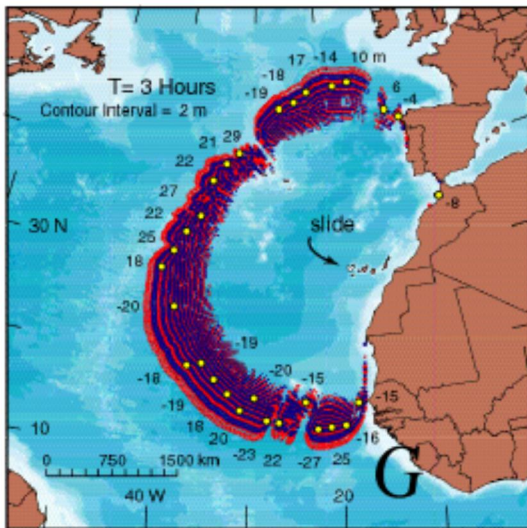
Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Scenariusz możliwego tsunami (G)



Tsunami

P. F. Góra

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

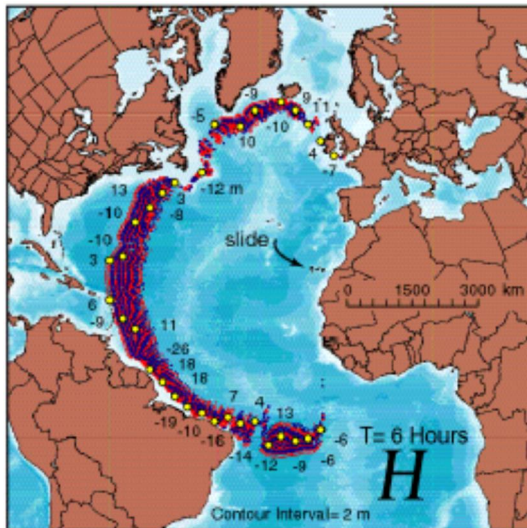
La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Scenariusz możliwego tsunami (H)

Tsunami

P. F. Góra



I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

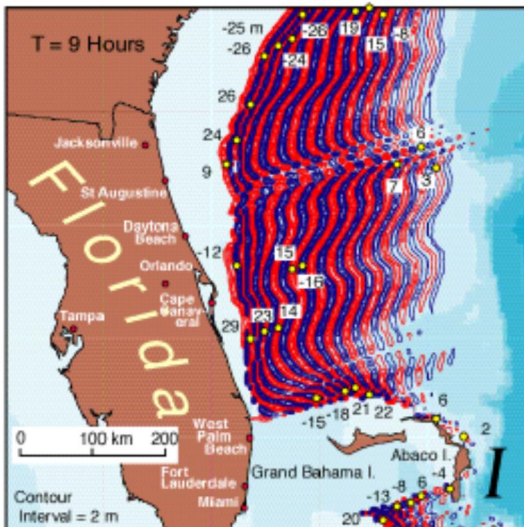
La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

Scenariusz możliwego tsunami (I)

Tsunami

P. F. Góra



I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami
tektonicznego

IV. Niszczycielskie
działanie tsunami

V. Dane historyczne i
przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

La Palma, Wyspy Kanaryjskie —
megatsunami?

VI. Podsumowanie

Powyższe symulacje pokazują, jak “góra wody”, powstała w wyniku osunięcia, stopniowo rozpada się na składowe harmoniczne o zmniejszających się długościach, z najdłuższymi falami poruszającymi się najszybciej.

Scenariusz “*megatsunami*”, z falami wysokimi na 50 m atakującymi Florydę, jest najprawdopodobniej przesadzony, ale *zwykłe* tsunami, z falami $\sim 15\text{--}25$ m atakującymi wybrzeża Atlantyku od Brazylii po Islandię, wywoła dostatecznie katastrofalne skutki.

Geolodzy twierdzą, że pytanie nie brzmi *czy*, ale *kiedy*, co najwyżej — *czy aż w takiej skali*. Być może *zaledwie* 1.5×10^9 ton skał wpadnie do Oceanu Atlantyckiego.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

Santorini — zagłada Atlantydy?

Krakatau, 27 sierpnia 1883

Największe zarejestrowane fale

La Palma, Wyspy Kanaryjskie — megatsunami?

VI. Podsumowanie

VI. Podsumowanie

Tsunami są falami płytkiej wody, a więc są zjawiskami objętościowymi, nie powierzchniowymi.

I. Co to jest tsunami

II. Przyczyny tsunami

III. Fizyka tsunami tektonicznego

IV. Niszczycielskie działanie tsunami

V. Dane historyczne i przewidywania

VI. Podsumowanie

Różnice pomiędzy tsunami a "zwykłymi" falami		
Tsunami na oceanie		
wysokość kilkadziesiąt cm	długość > 100 km	prędkość > 700 km/h
Tsunami przy brzegu		
wysokość do 30 m	długość ~ 3 km	prędkość kilkadziesiąt km/h
Zwykła fala		
wysokość 3 m	długość 100 m	prędkość 4–8 km/h

Czekają nas także geologicznie ciekawe czasy...