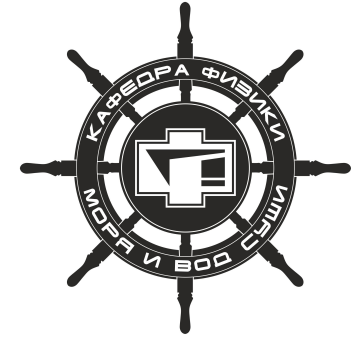


М.А. Носов

*кафедра физики моря и вод суши
физического факультета МГУ
имени М.В.Ломоносова*

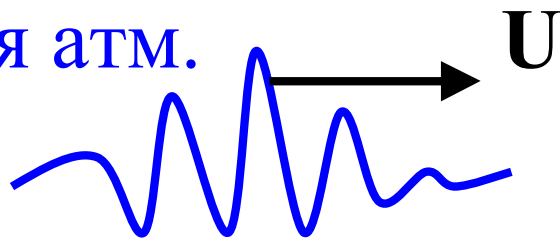


Морские волны, создаваемые бегущими возмущениями в атмосфере и литосфере



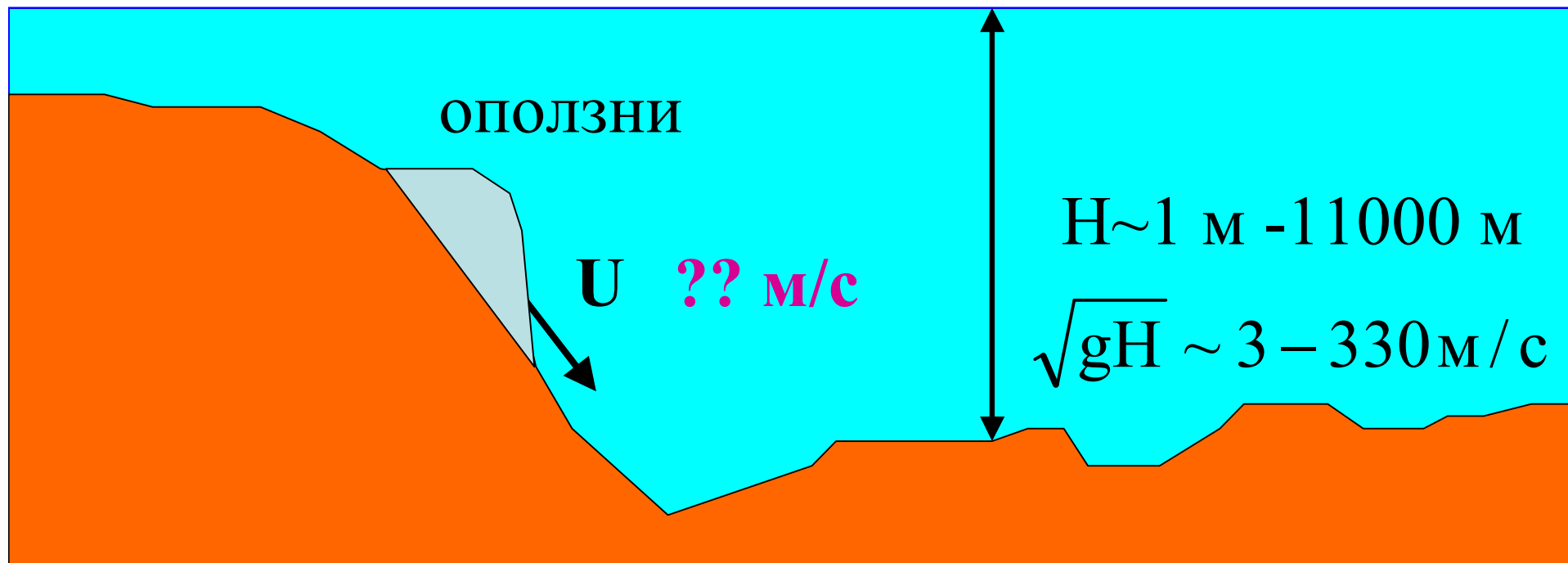
Бегущие возмущения

колебания атм.
давления

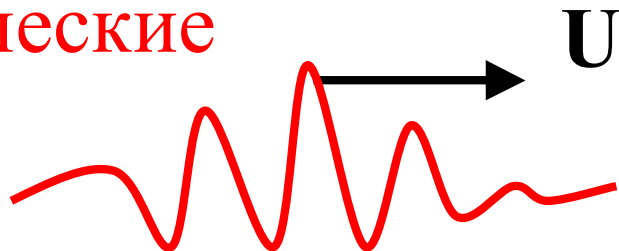


фронты, циклоны $\sim 10-30$ м/с

акустические волны ~ 340 м/с



сейсмические
волны



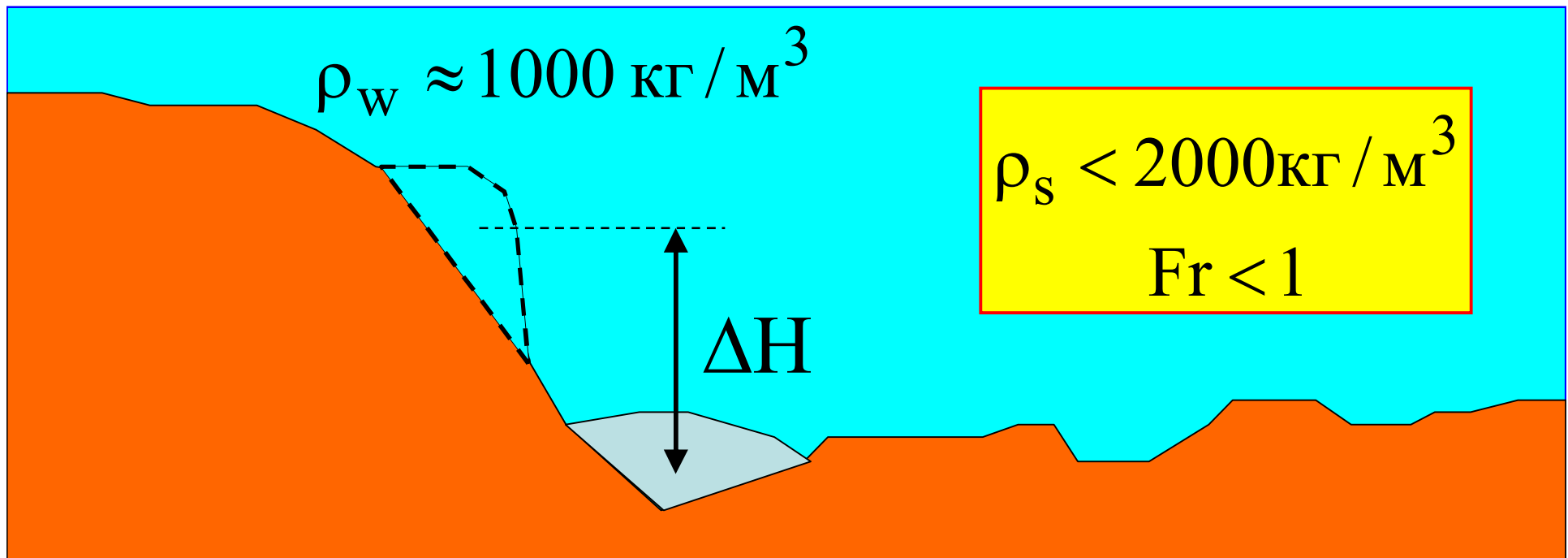
волны Лява и Рэлея ~ 4000 м/с

Скорость подводного оползня (оценка сверху)

$$U = \sqrt{2g \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \Delta H}$$

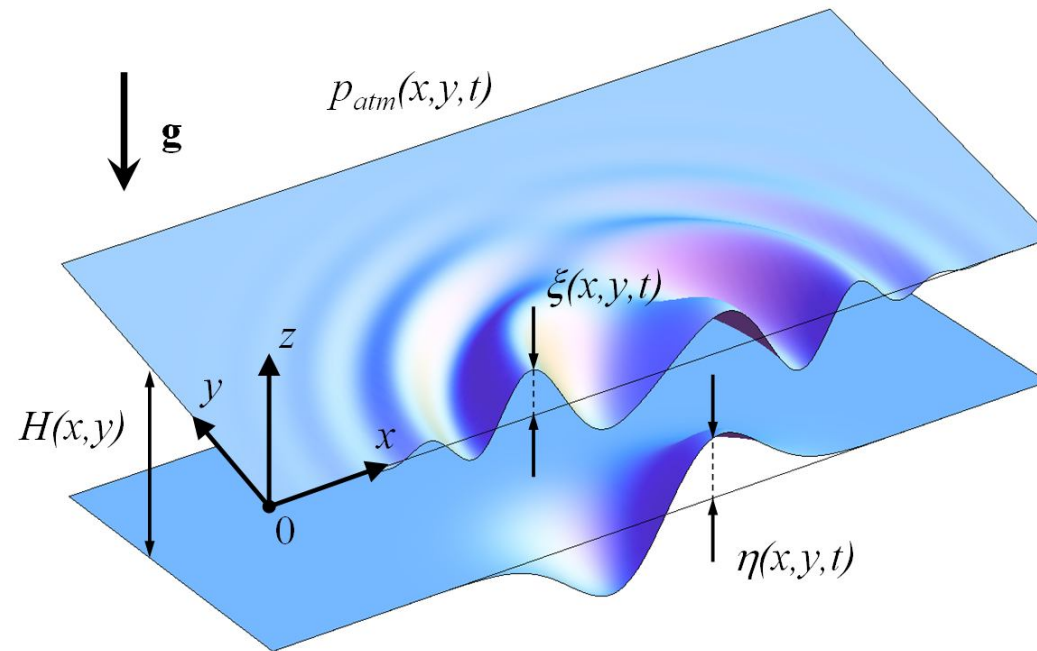
без учета сил трения

$$U < \sqrt{gH}$$



$$Fr = \frac{U^2}{gH} = 2 \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \frac{\Delta H}{H} < 2 \frac{\rho_s - \rho_w}{\rho_s} \quad \frac{\Delta H}{H} < 1$$

Нелинейные уравнения мелкой воды (NSW)



$$H / \lambda \ll 1$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = -g \vec{\nabla} \xi - \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p_{\text{atm}}$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} - \frac{\partial \eta}{\partial t} + \text{div}((H + \xi - \eta) \vec{v}) = 0$$

NSW

$$|\xi|/H \ll 1, \quad |\eta|/H \ll 1$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \nabla(gH\nabla\xi) = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \operatorname{div}\left(\frac{H}{\rho} \nabla p_{\text{atm}}\right)$$

$$H = \text{const}, \quad 1\text{D}$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gH \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2} + \frac{H}{\rho} \frac{\partial^2 p_{\text{atm}}}{\partial x^2}$$

Бегущая подвижка дна

$$\eta(x, t) = f(x - Ut)$$

$$\xi(x, t) = C_b f(x - Ut)$$

Амплитуда и знак
(!) возмущения на
поверхности воды
определяются
числом Фруда

$$\xi(x, t) = \frac{Fr}{Fr - 1} f(x - Ut)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gH \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}$$

$$U^2 C_b f'' - gH C_b f'' = U^2 f''$$

$$C_b = \frac{U^2}{U^2 - gH} = \frac{Fr}{Fr - 1}$$

$$Fr = \frac{U^2}{gH}$$

Бегущее возмущение атмосферного давления

$$p_{\text{atm}}(x, t) = f(x - Ut)$$

$$\xi(x, t) = C_p f(x - Ut)$$

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gH \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{H}{\rho} \frac{\partial^2 p_{\text{atm}}}{\partial x^2}$$

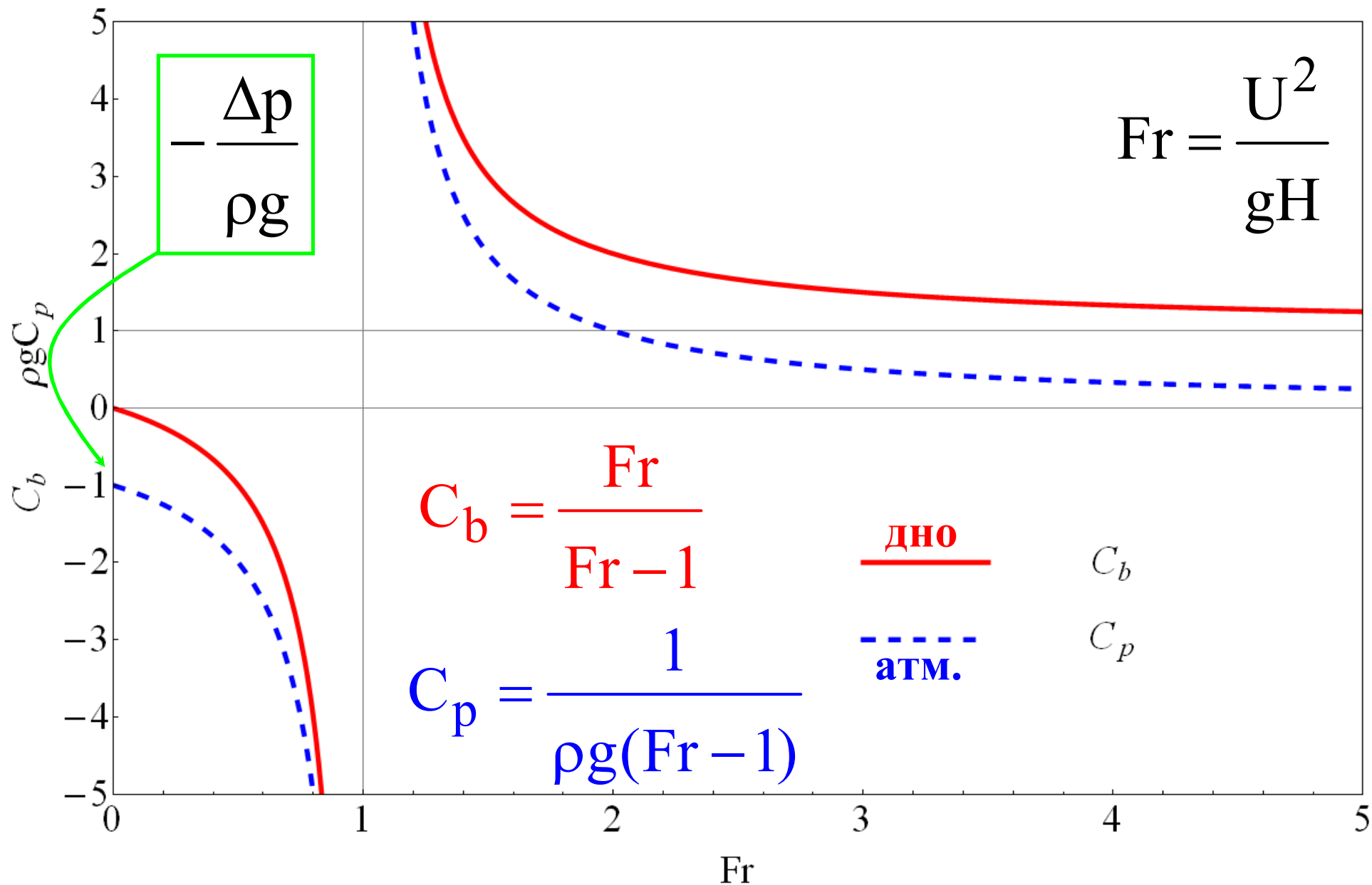
$$U^2 C_p f'' - gH C_p f'' = \frac{H}{\rho} f''$$

$$C_p = \frac{H/\rho}{U^2 - gH} = \frac{1}{\rho g(\text{Fr} - 1)}$$

$$\xi(x, t) = \frac{1}{\rho g(\text{Fr} - 1)} f(x - Ut)$$

**Амплитуда и знак (!)
возмущения на
поверхности воды
определяются числом
Фруда**

Резонанс Праудмена ($Fr \approx 1$)

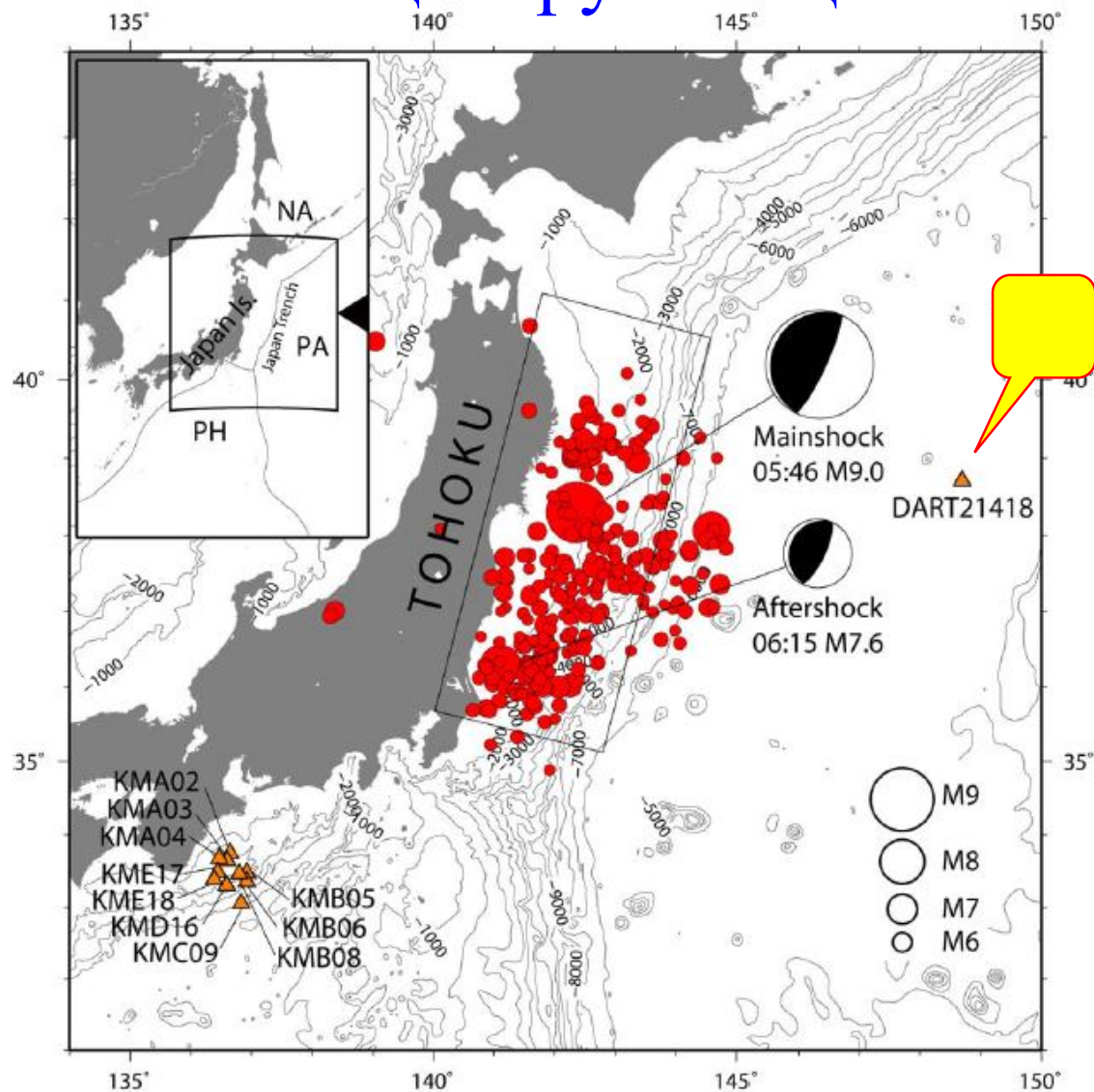


Риссага (бухта Сьютаделла)



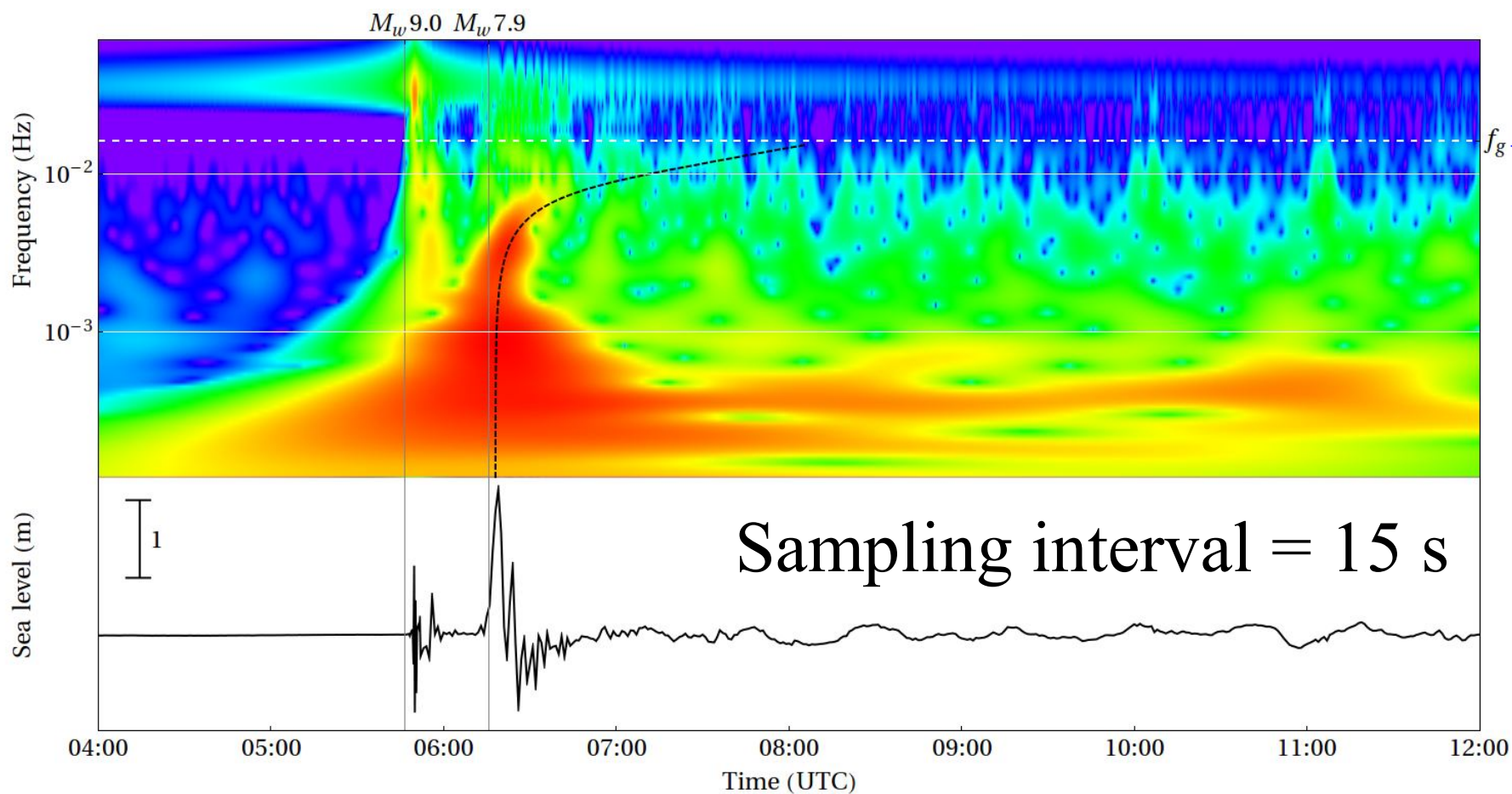
[Jansa, Agusti & Ramis, Climent. (2021). The Balearic rissaga: from pioneering research to present-day knowledge. *Natural Hazards*. 106. 10.1007/s11069-020-04221-3]

Землетрясение Тохоку 2011 и афтершоки за период 1 сут. Глубоководные станции DONET и ближайшая к эпицентру станция DART

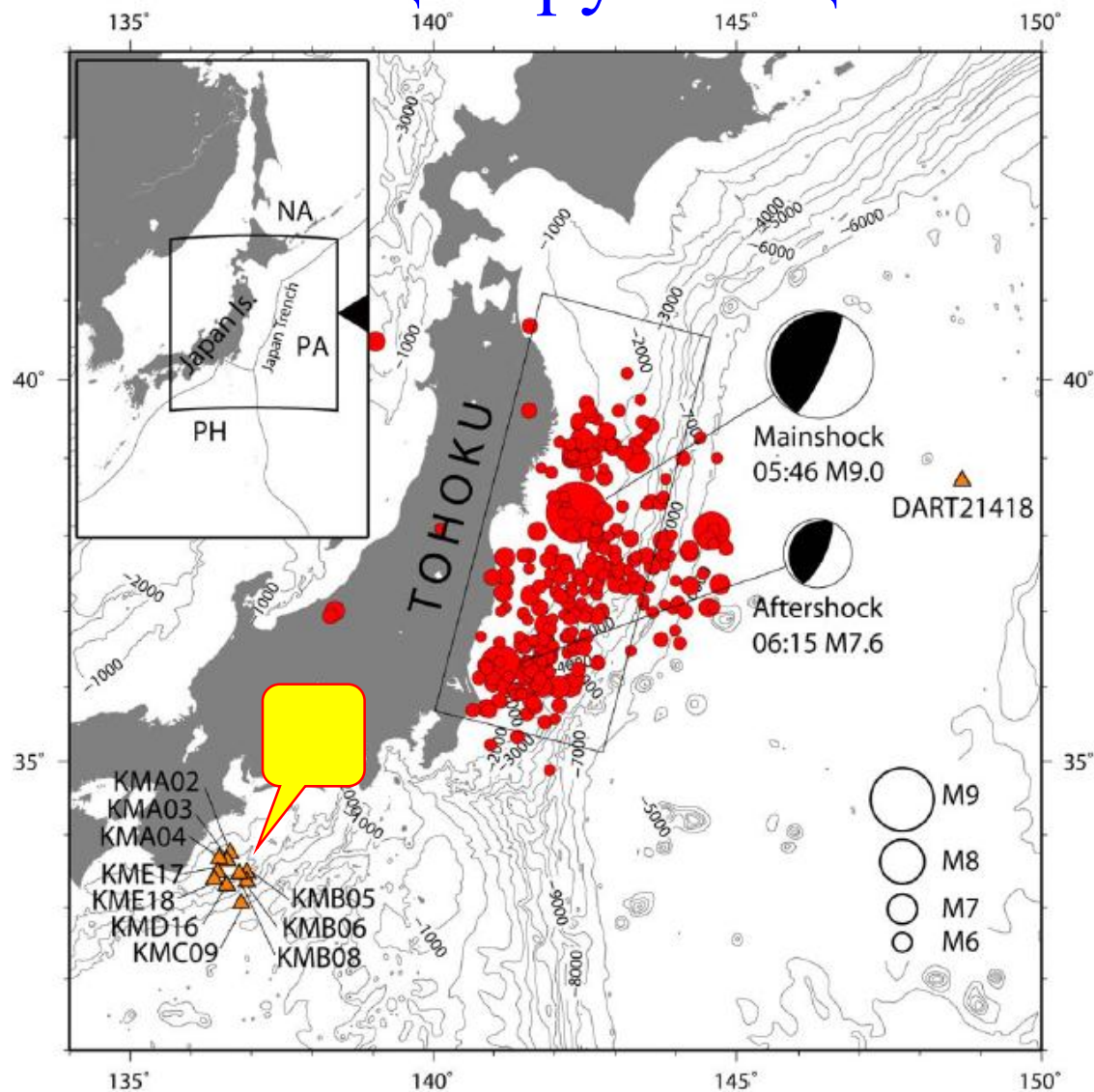


Вариации придонного давления, зарегистрированные станцией DART21418

$$f_g = 0.366\sqrt{g/H}$$



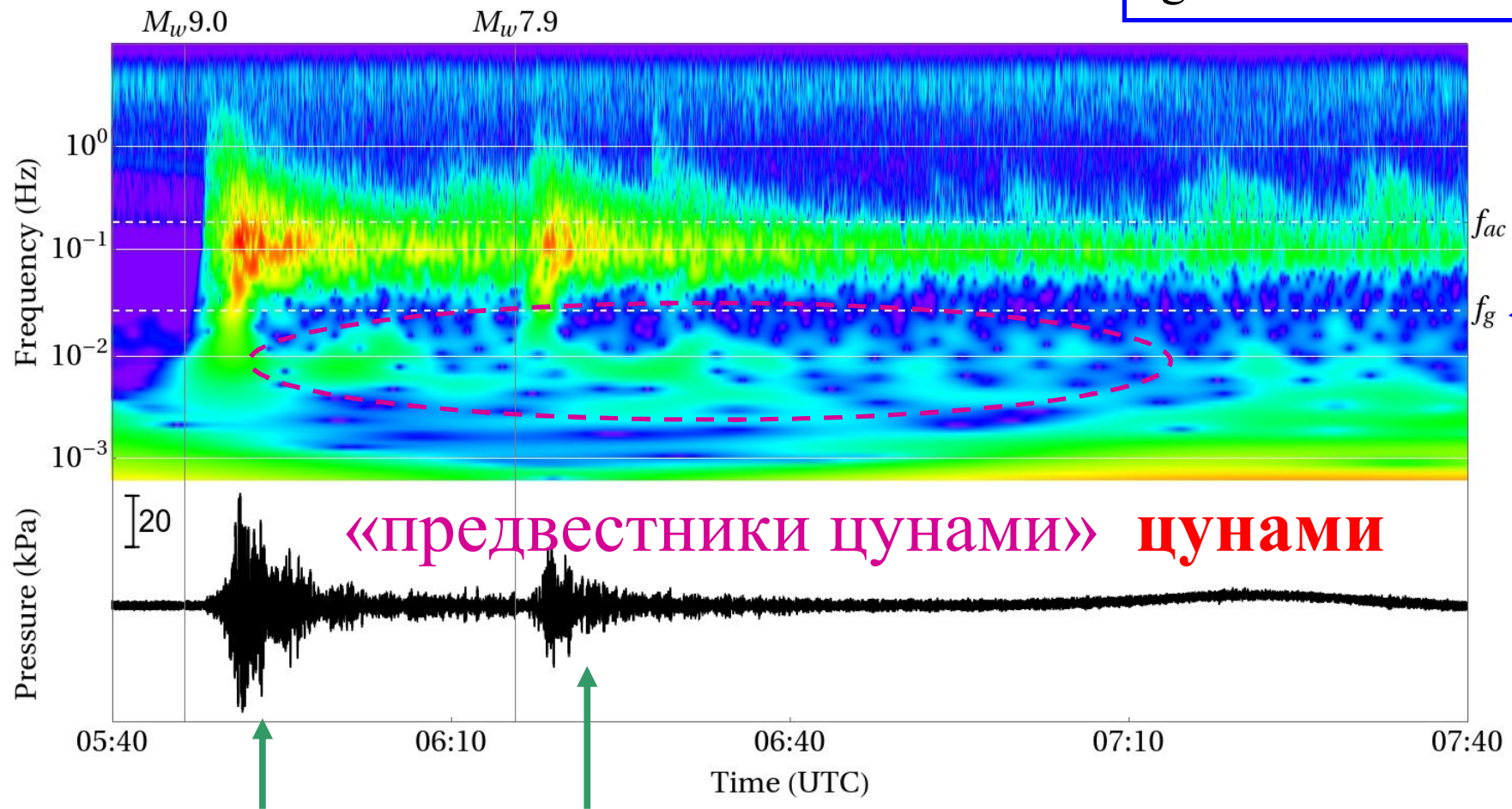
Землетрясение Тохоку 2011 и афтершоки за период 1 сут. Глубоководные станции DONET и ближайшая к эпицентру станция DART



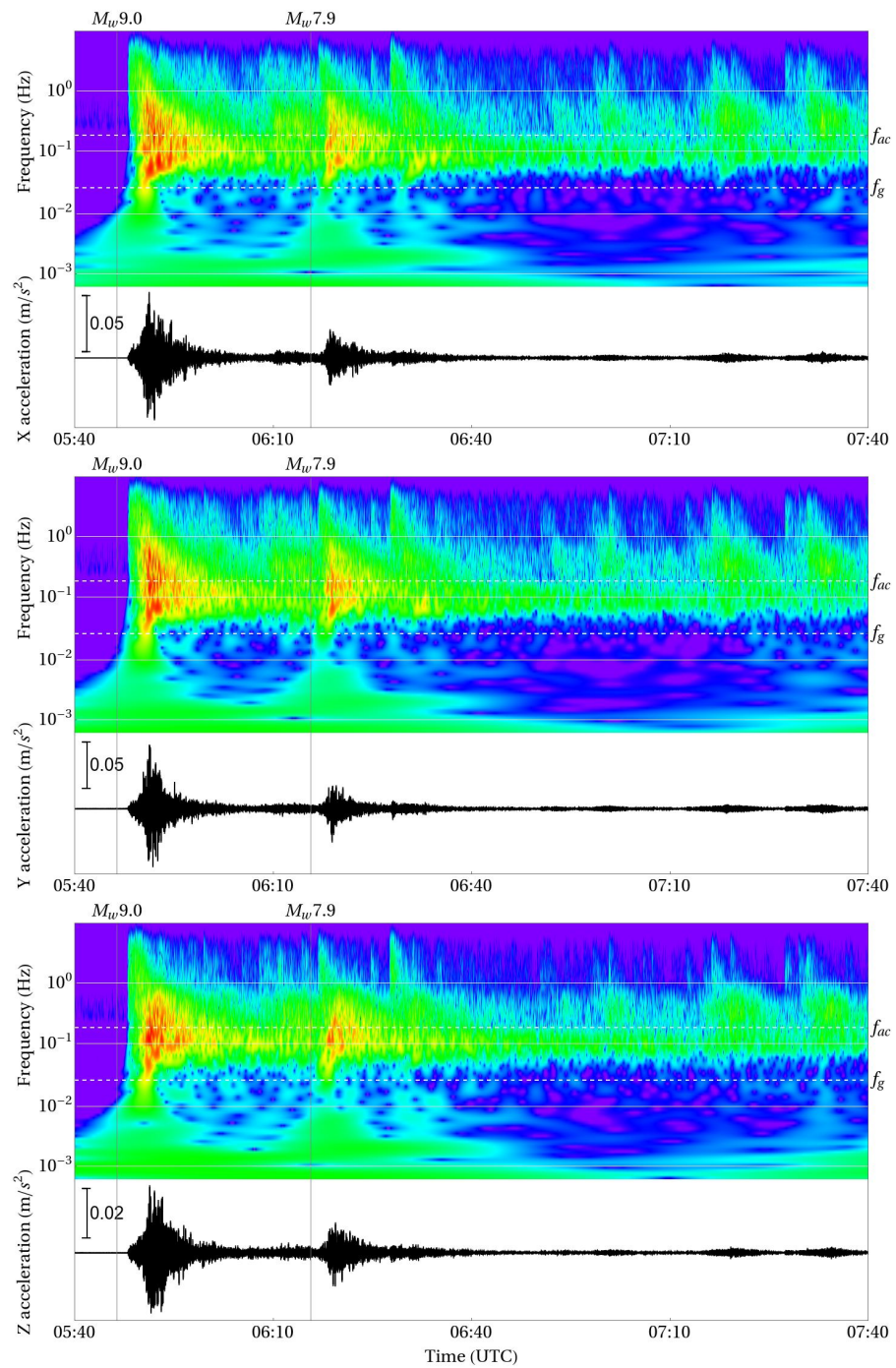
Вариации придонного давления, зарегистрированные станцией КМА02 (DONET)

Sampling interval = 0.1 s

$$f_g = 0.366\sqrt{g/H}$$

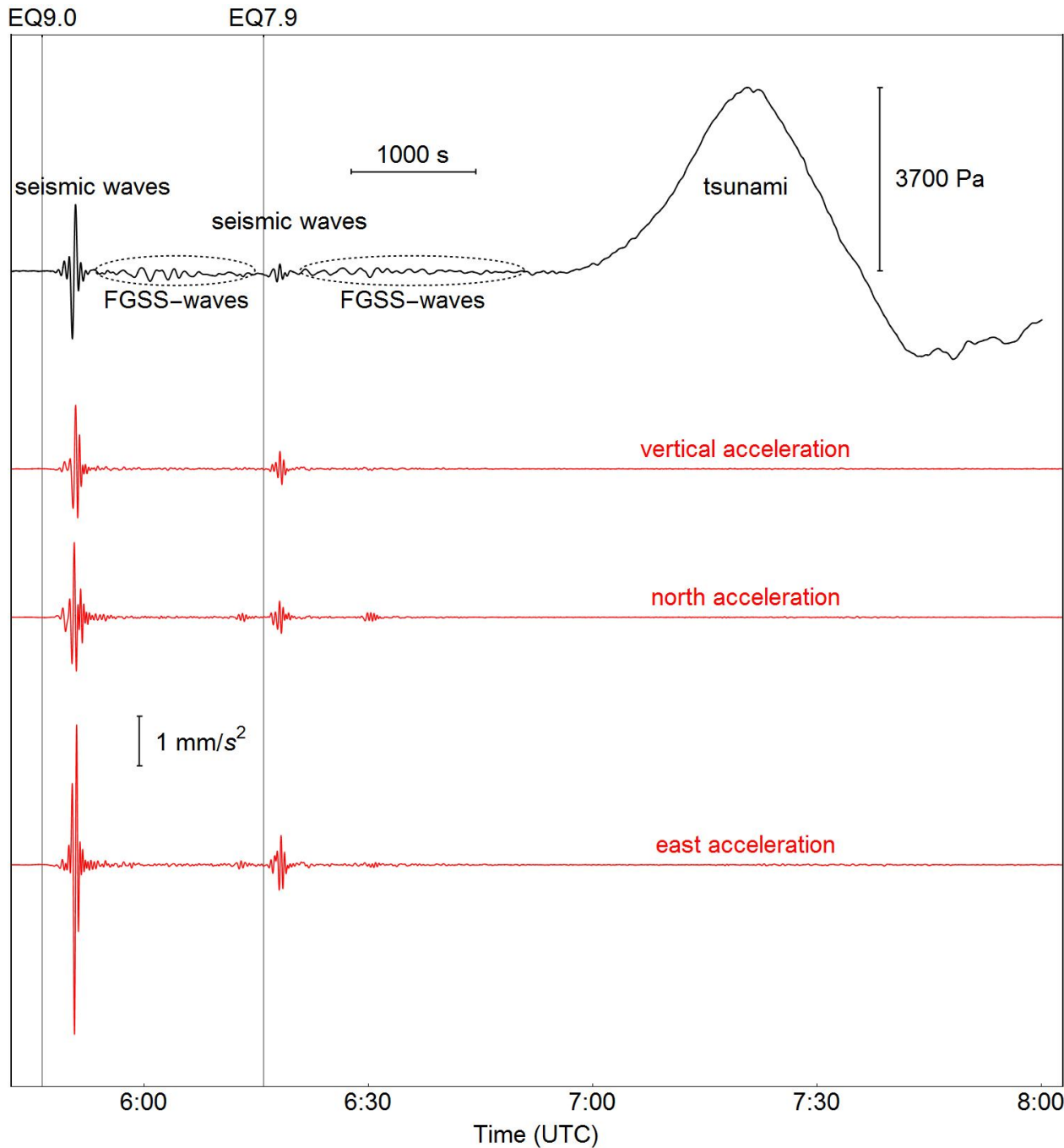


проявления сейсмических волн



сейсмометр станции DONET A02

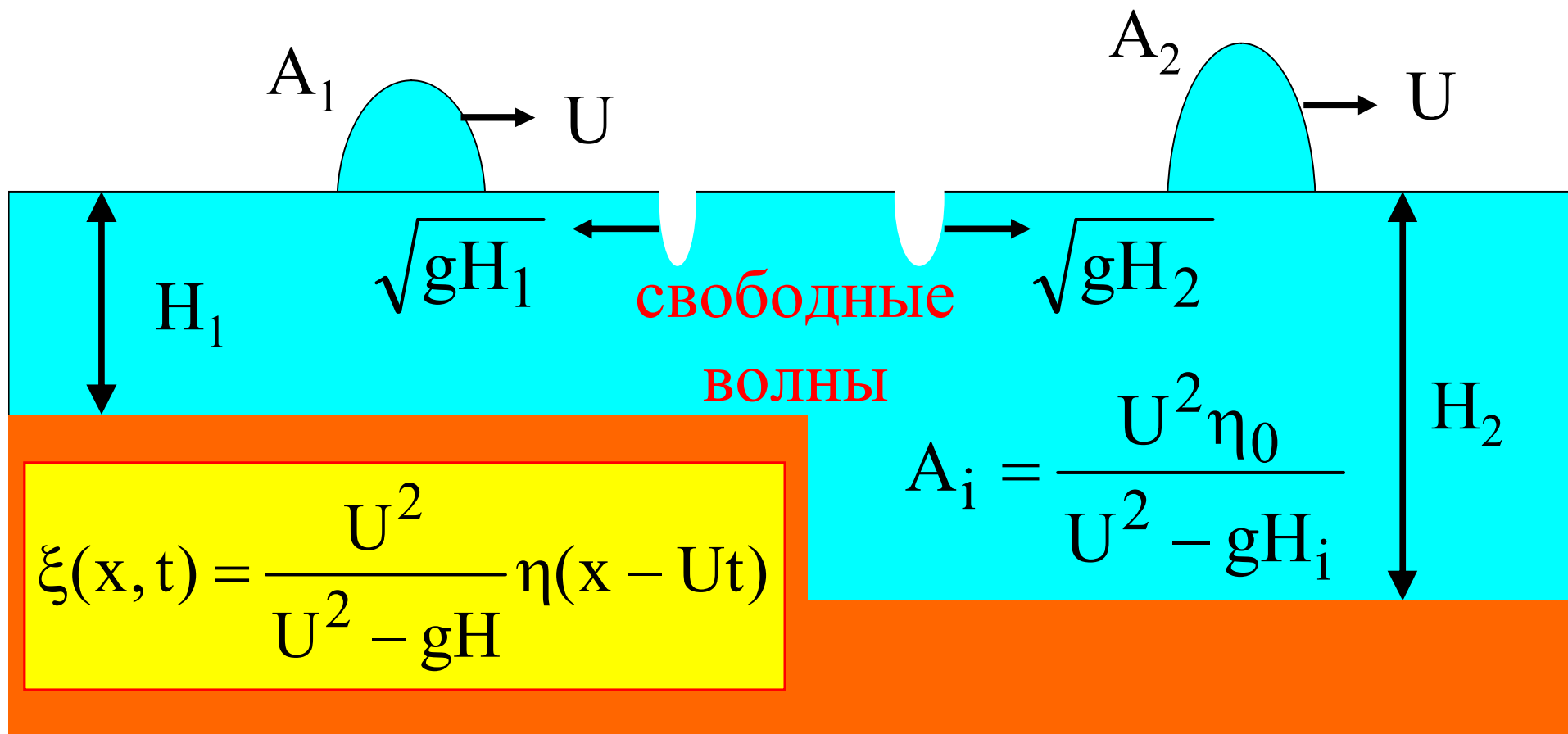
«Предвестники цунами»

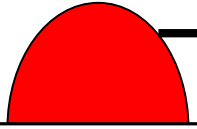


слабые
гравитационные
поверхностные
волны с
амплитудой ~3 см и
периодом ~150 с

**Механизм
генерации?**

Механизм №1 – перестройка вынужденного возмущения в области скачка глубин



η_0  U сейсмическая волна, создающая вынужденные возмущения в водном слое

Оценка амплитуды свободных волн, возбуждаемых на скачке глубин

условие на скачке глубин: по данным
 $\xi_1 = \xi_2, \quad u_1 H_1 = u_2 H_2$ измерений
3 см!!!

$$\xi_1 = -\frac{(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2})U^2\eta_0}{(gH_1 - U^2)(\sqrt{gH_2} + U)} \approx 1 \text{ мм}$$

$$\xi_2 = \frac{(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2})U^2\eta_0}{(\sqrt{gH_1} - U)(gH_2 - U^2)} \approx 1 \text{ мм}$$

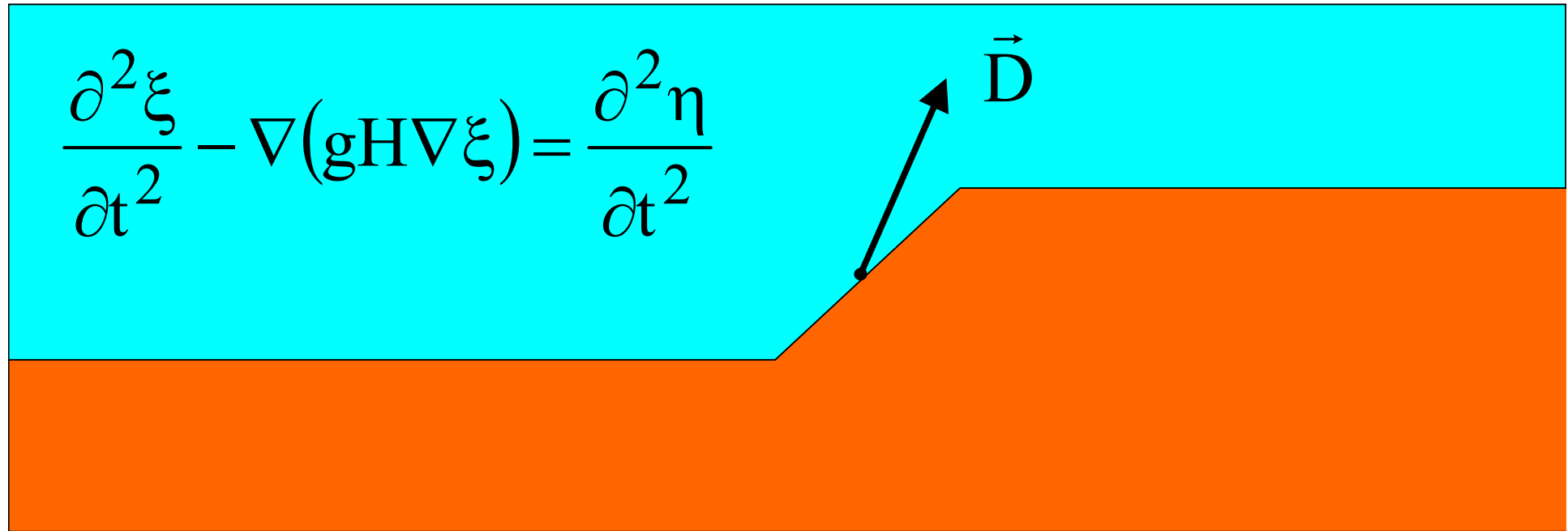
$$H_1 = 2000 \text{ м}$$

$$U = 4000 \text{ м/с}$$

$$H_2 = 3000 \text{ м}$$

$$\eta_0 \sim 0.1 \text{ м}$$

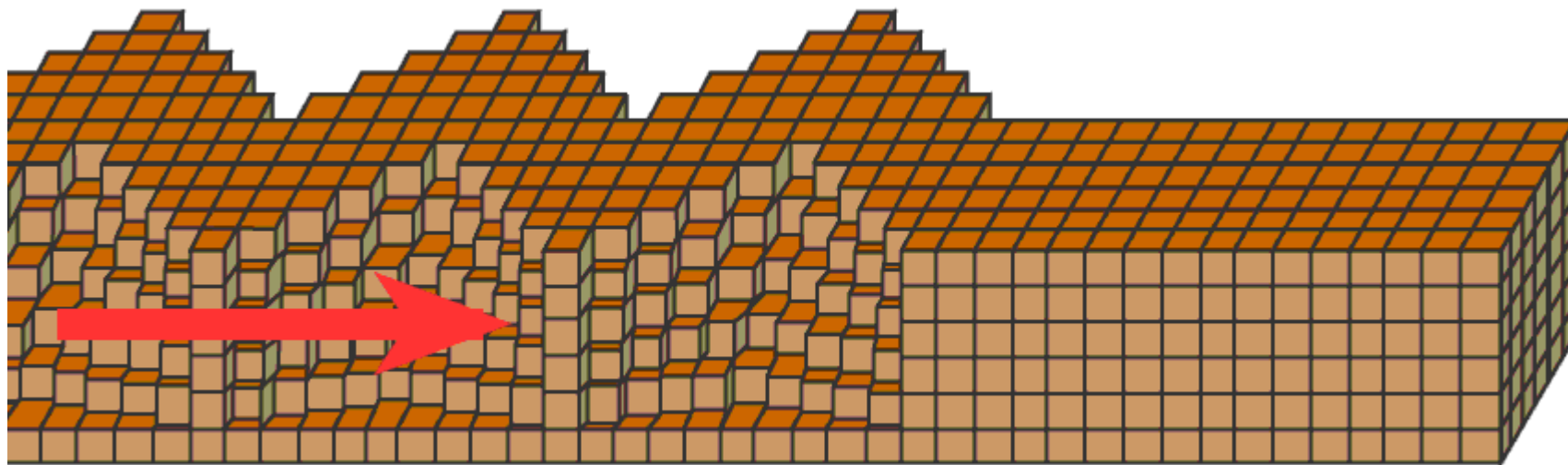
Механизм №2 – горизонтальные колебания ПОДВОДНЫХ СКЛОНОВ



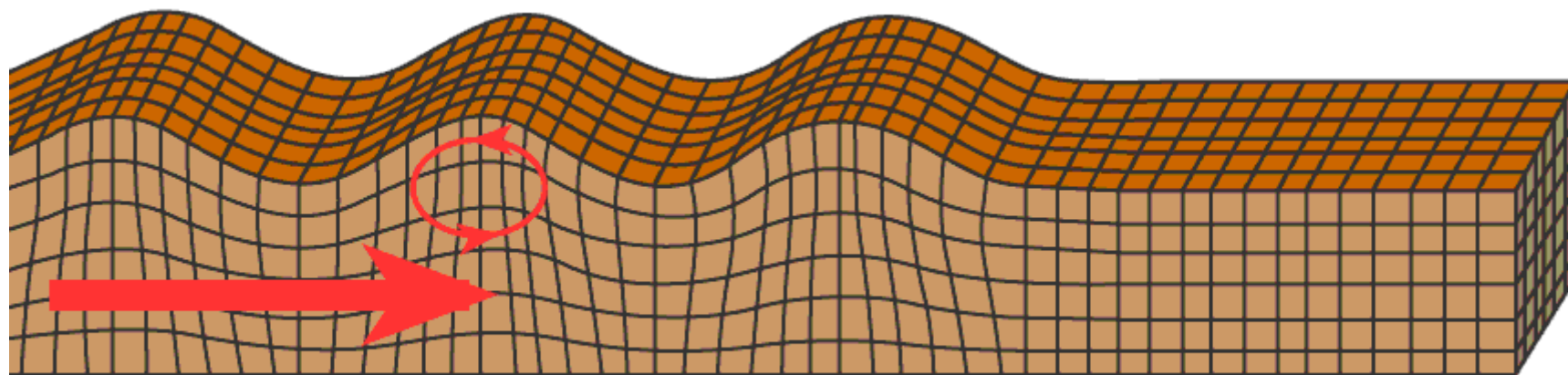
$$\eta = D_x \frac{\partial H}{\partial x} + D_y \frac{\partial H}{\partial y} + D_z \quad - \text{ смещение пов-ти дна}$$

вектор смещения дна: $\vec{D} \equiv (D_x, D_y, D_z)$

Типы поверхностных упругих волн



волны Лява



волны Рэлея

Механизм №2 – горизонтальные колебания ПОДВОДНЫХ СКЛОНОВ

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - \nabla(gH\nabla\xi) = \frac{\partial^2 \eta}{\partial t^2}$$



соответствует
измерениям!

$$|\nabla H| \sim 0.1 \quad |D_{xy}| \sim 0.3 \text{ м} \quad \Rightarrow \xi \sim \eta \sim 3 \text{ см}$$

$$\eta = D_x \frac{\partial H}{\partial x} + D_y \frac{\partial H}{\partial y} + \cancel{D_z}$$

волны Рэлея
и Лява

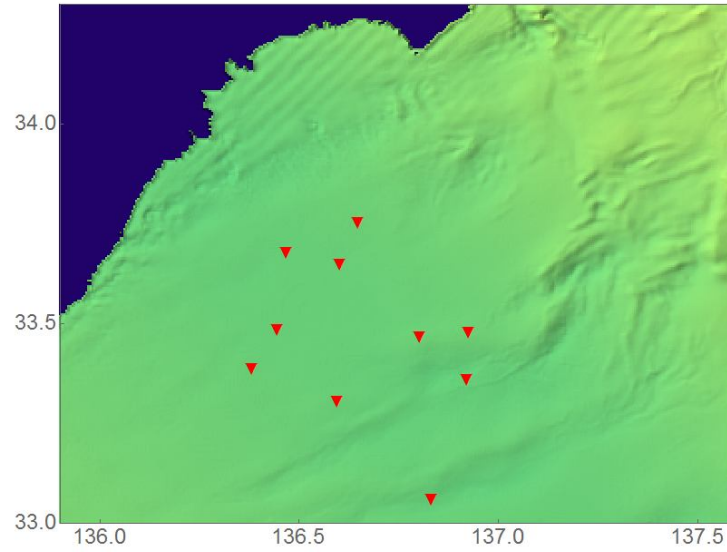
волны
Рэлея

вектор смещения дна:

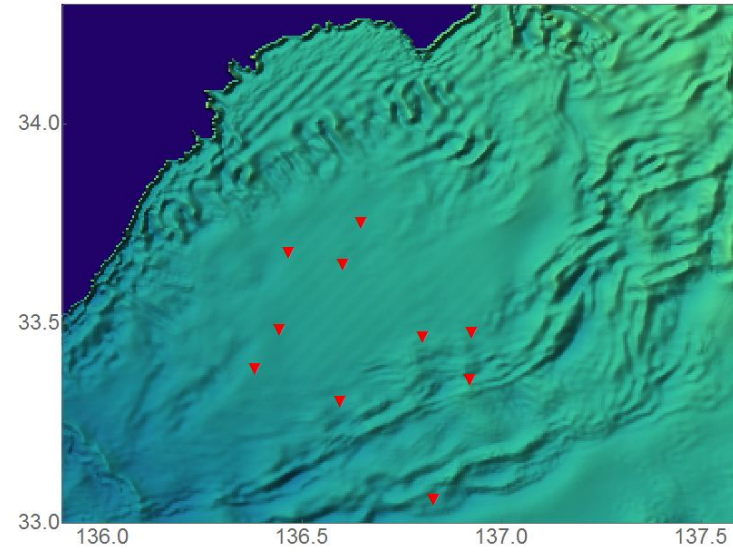
$$\vec{D} \equiv (D_x, D_y, D_z)$$

Численное воспроизведение «предшественников цунами»

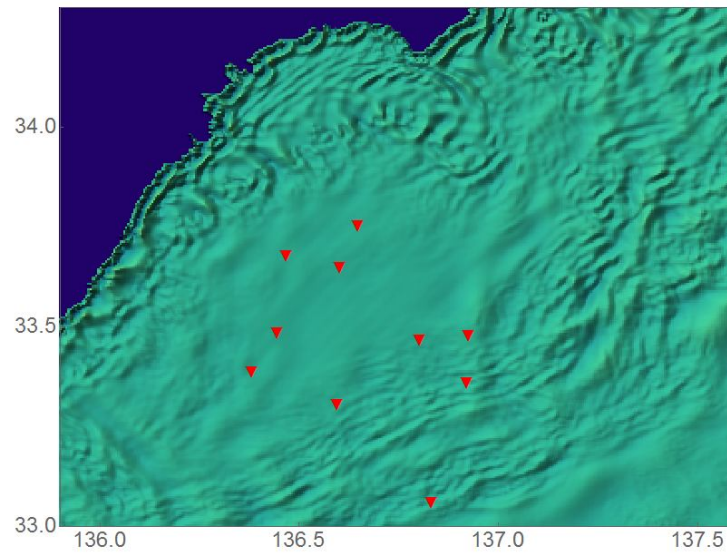
05:49:37



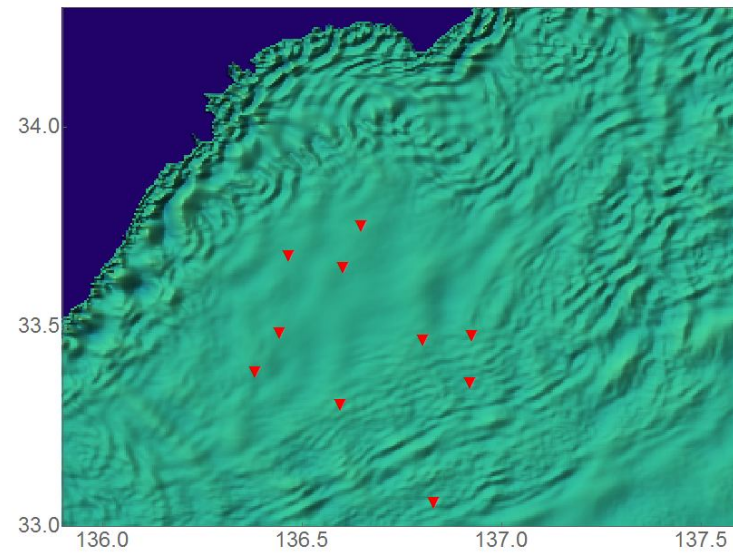
05:51:45



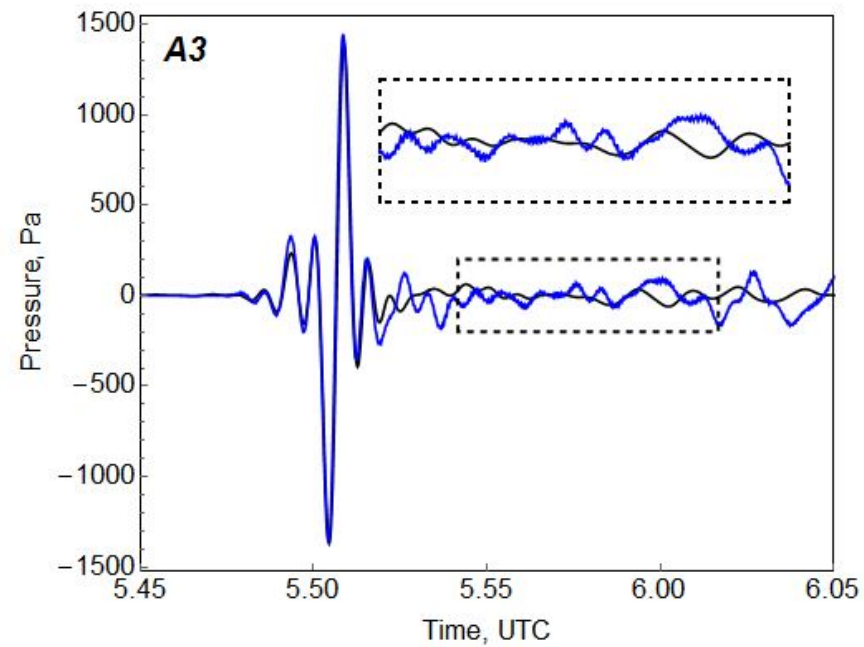
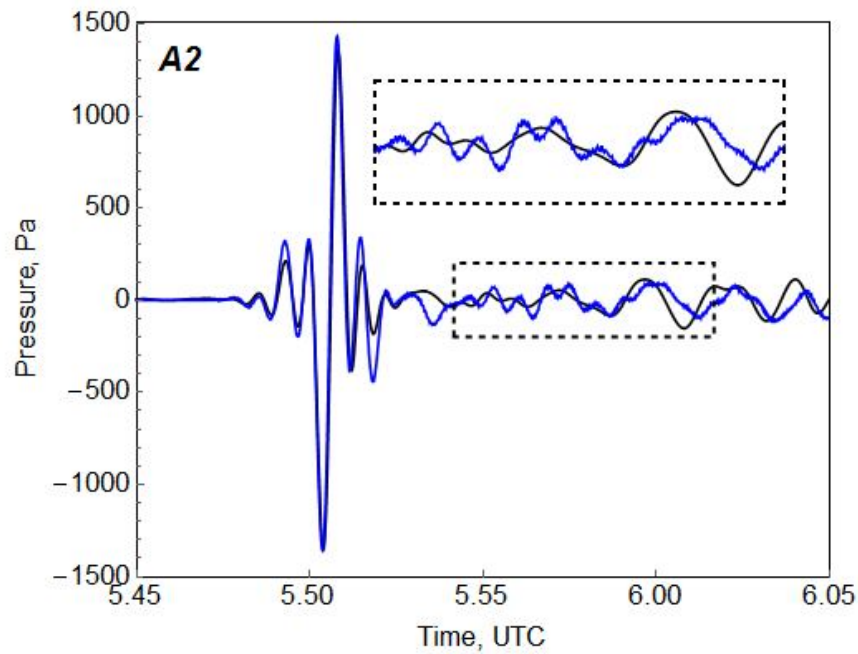
05:53:54



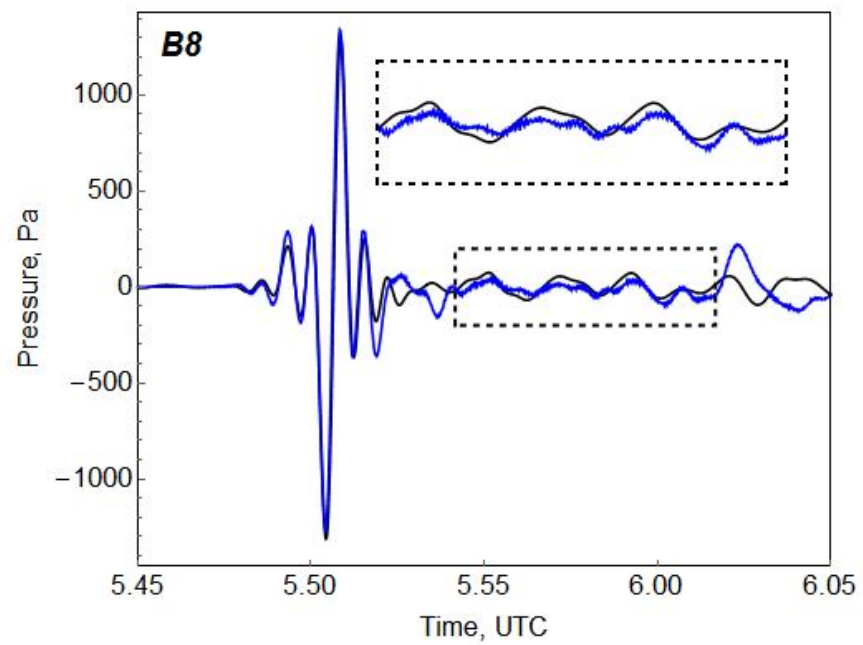
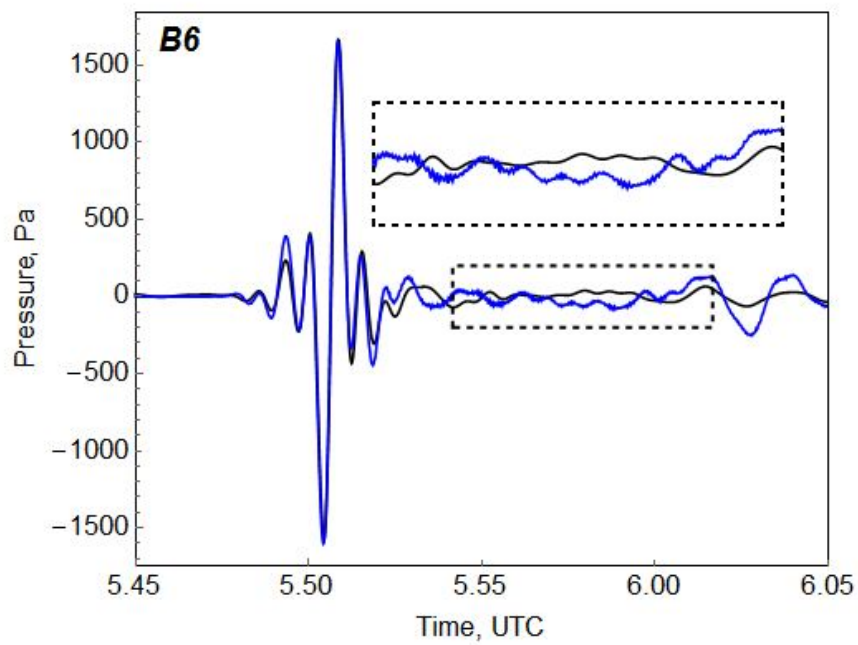
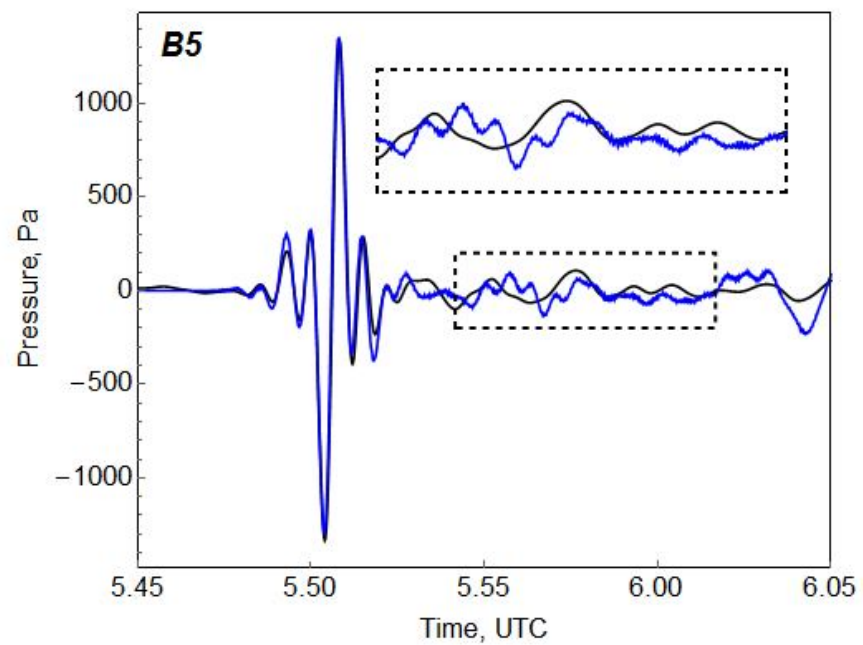
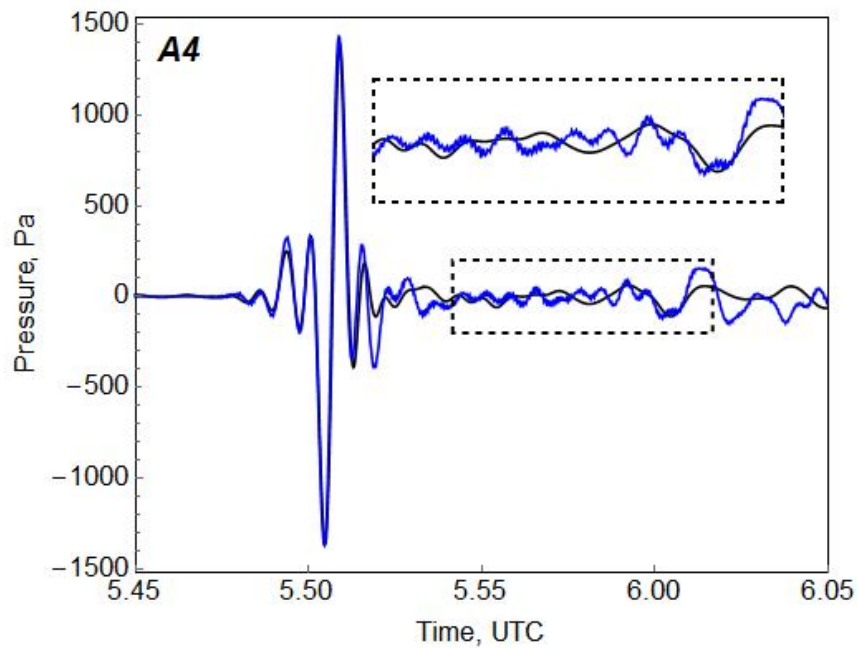
05:56:02

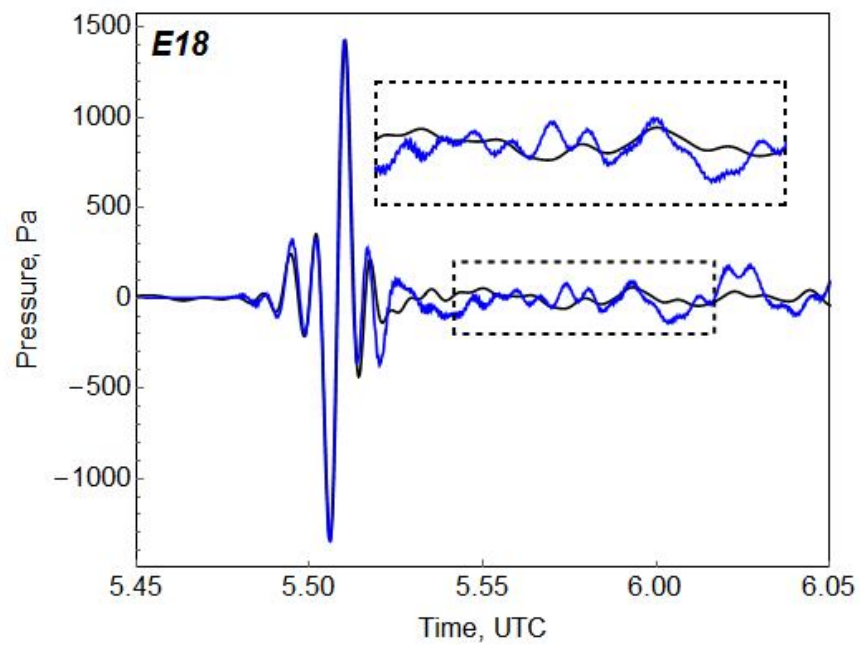
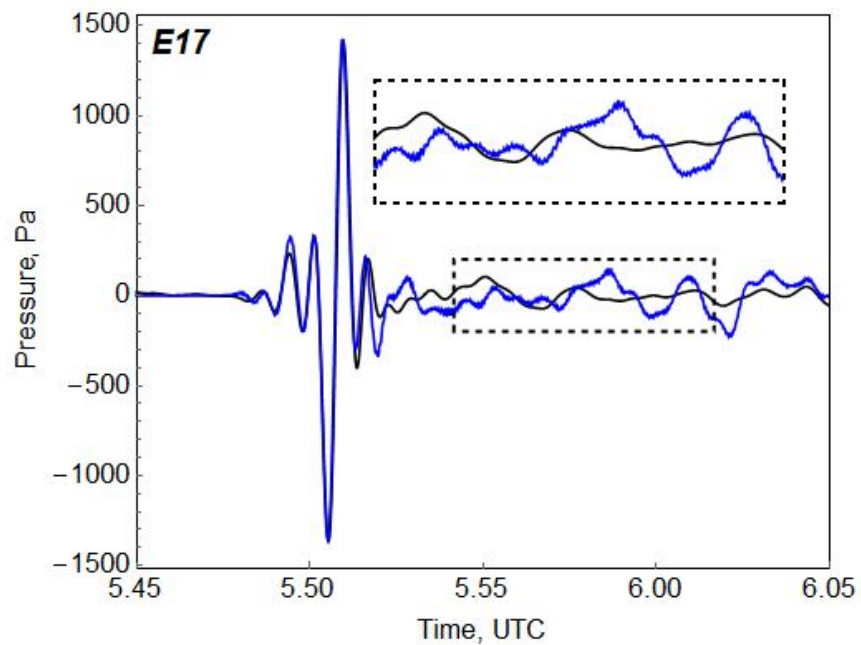
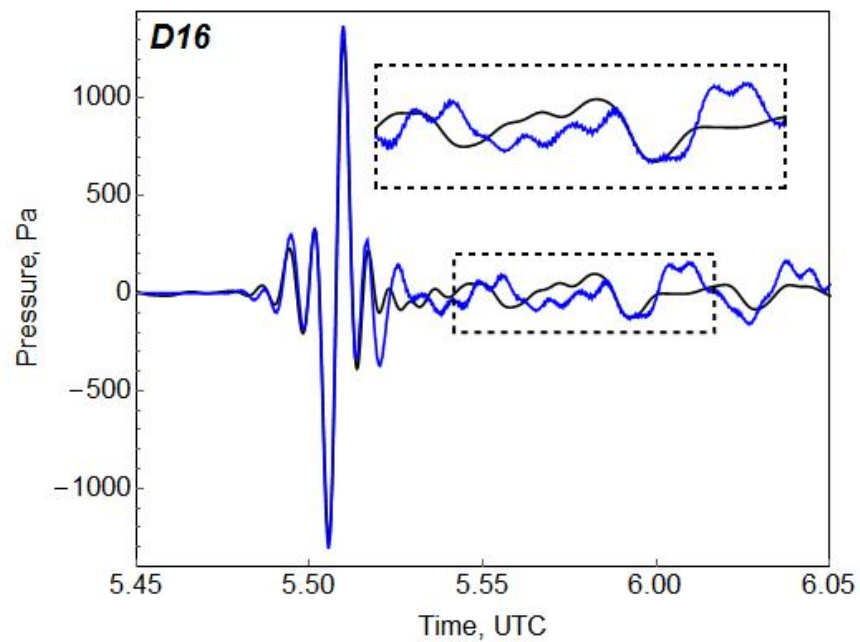
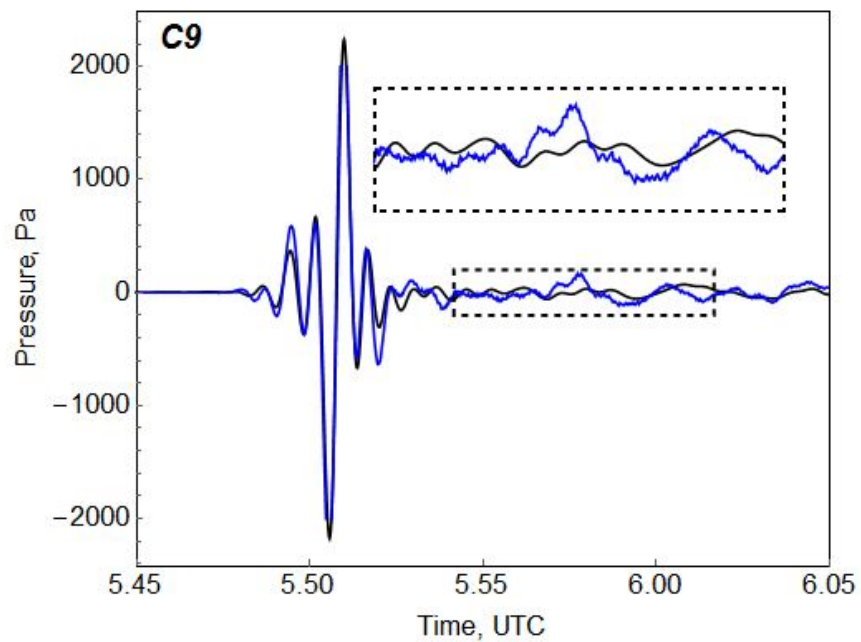


Численное воспроизведение «предшественников цунами»



Combined Potential Tsunami Model (CPTM)

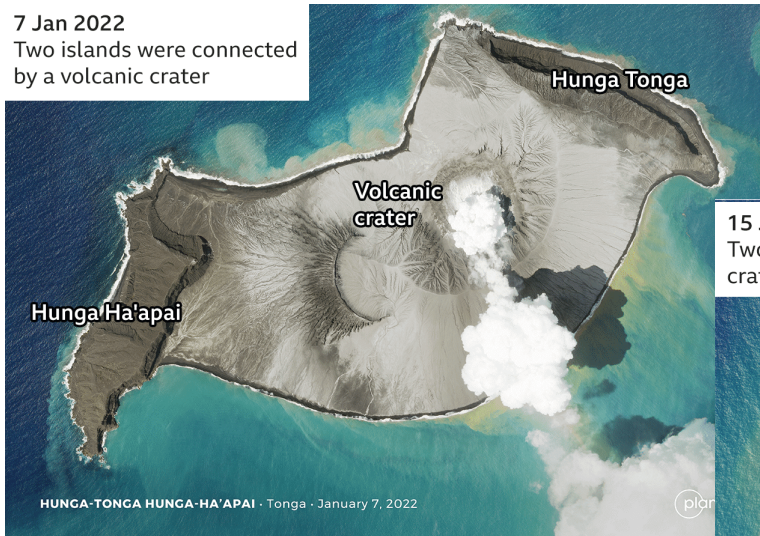




Волны, вызванные взрывным извержением вулкана Hunga Tonga-Hunga Ha'apai (15/01/22)

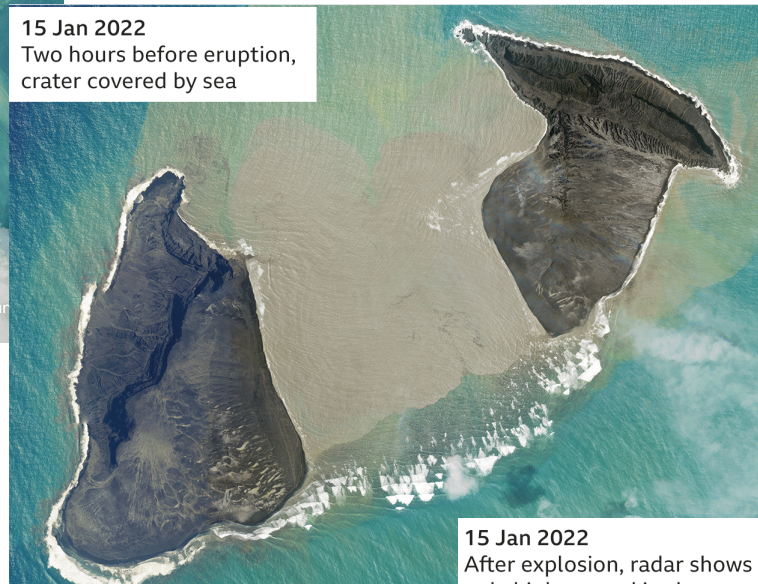
7 Jan 2022

Two islands were connected by a volcanic crater



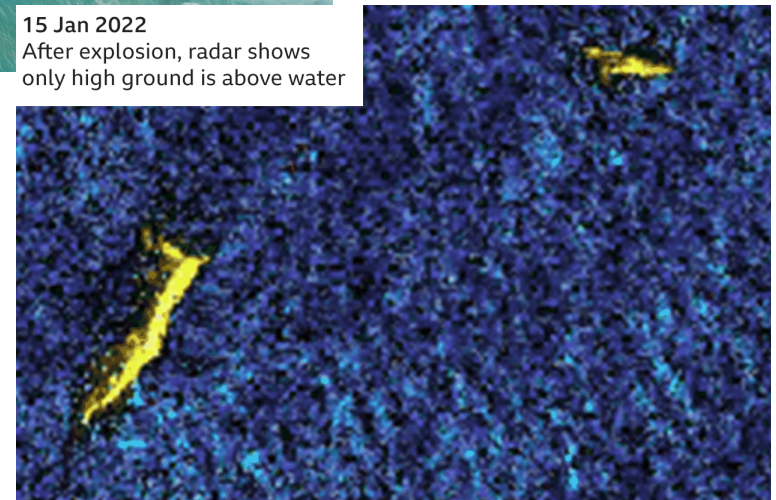
15 Jan 2022

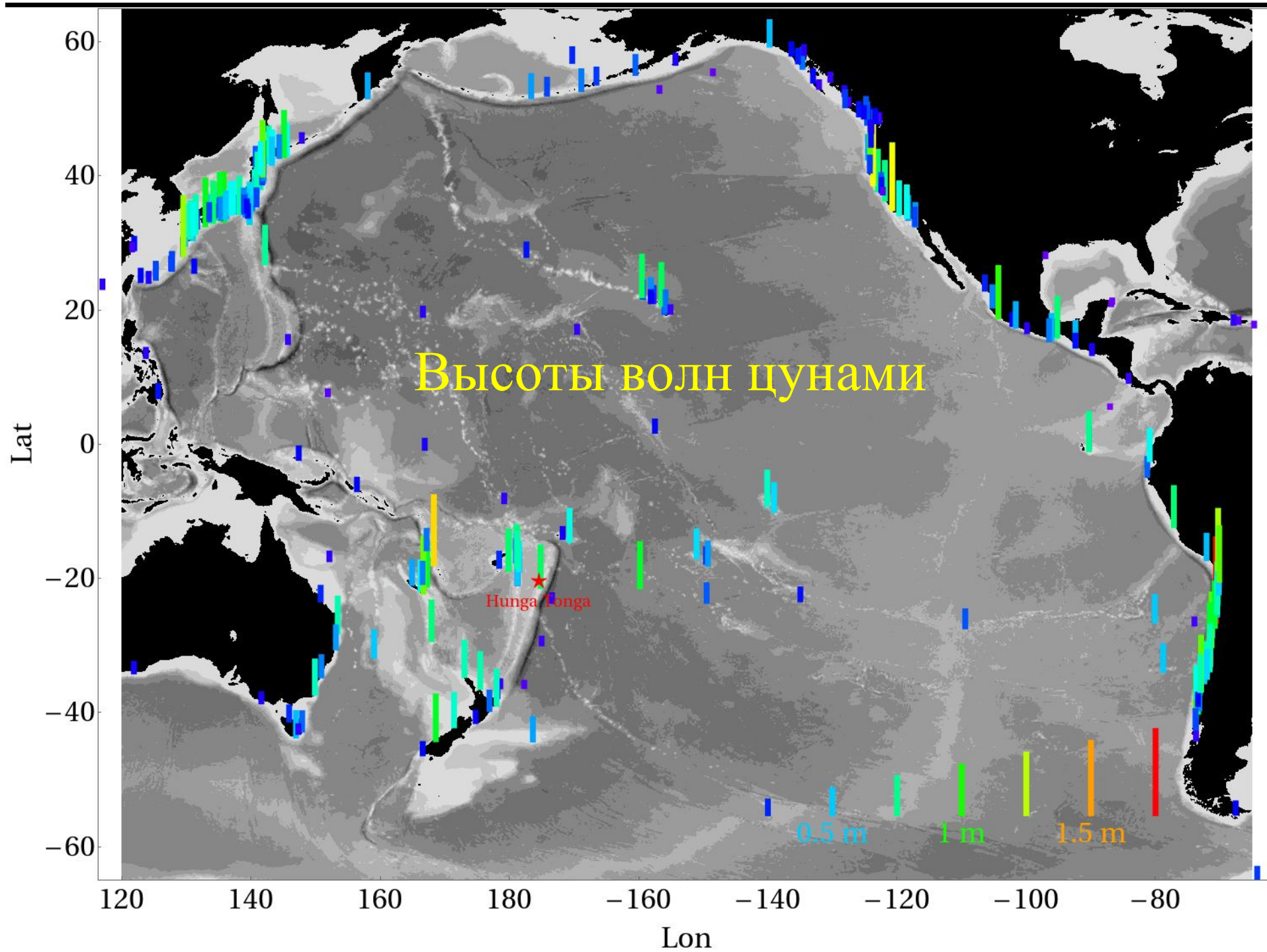
Two hours before eruption, crater covered by sea

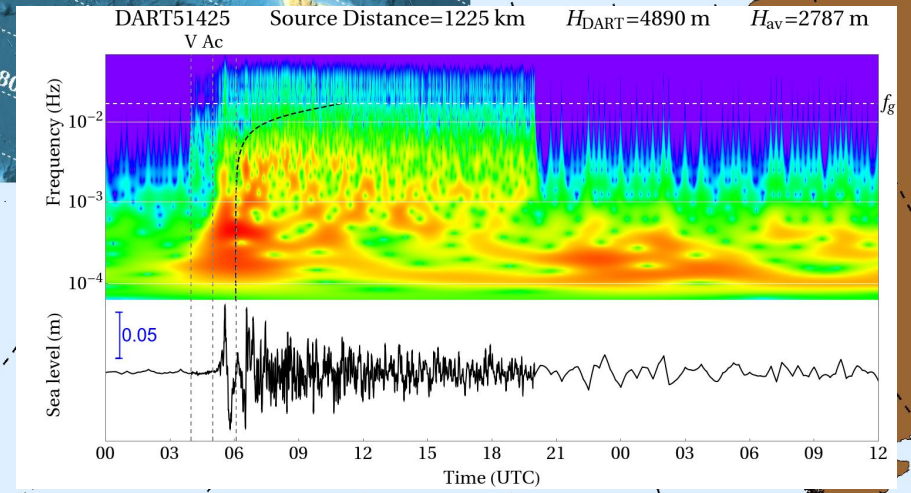
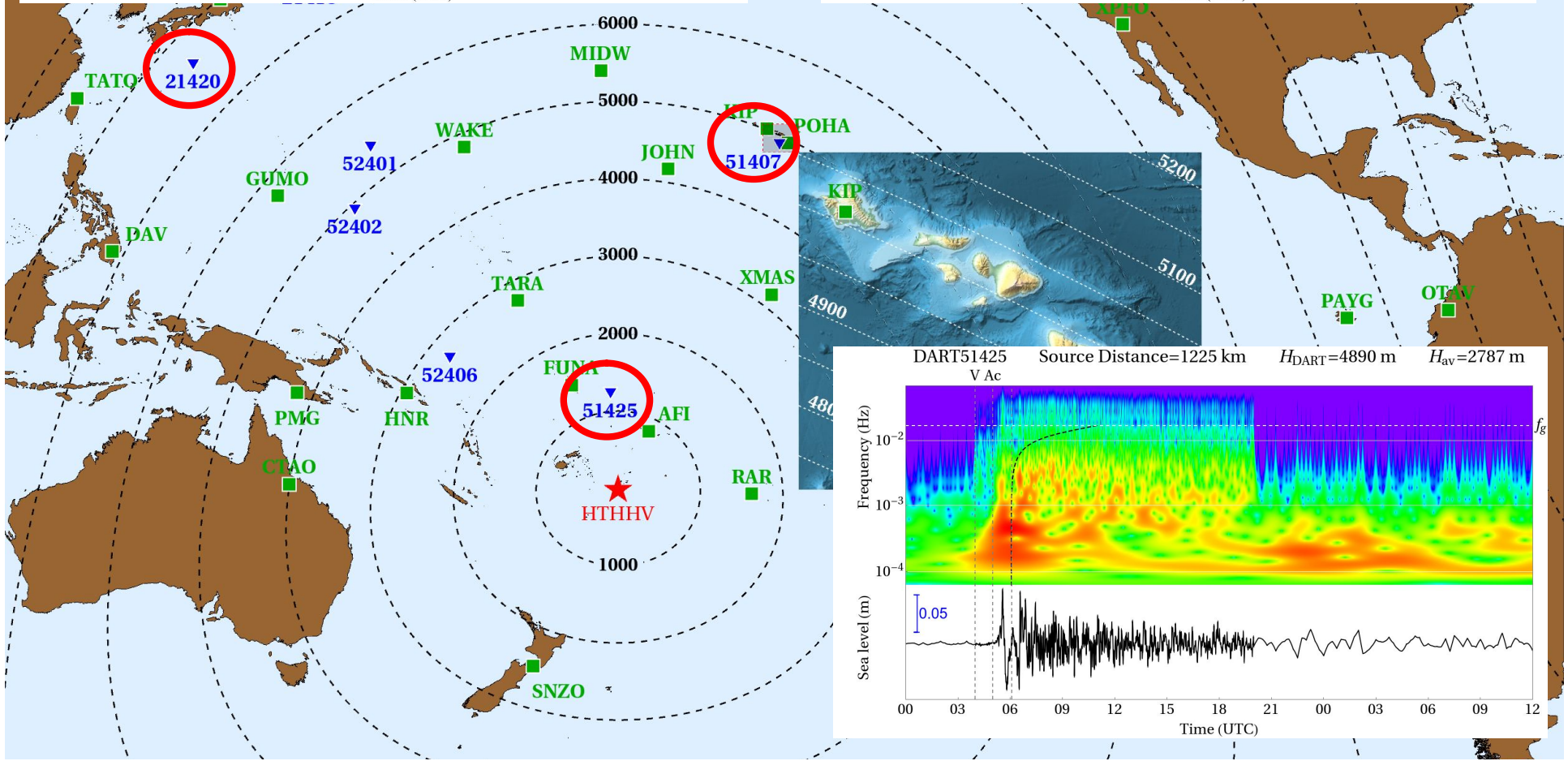
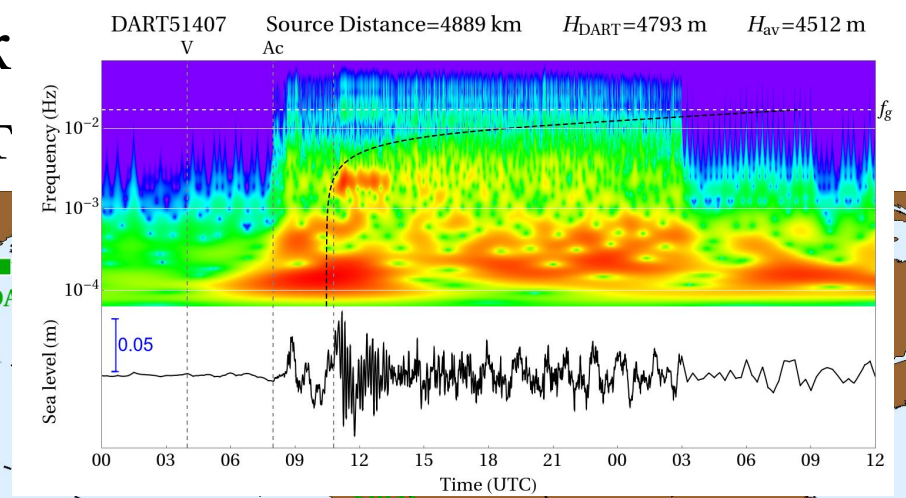
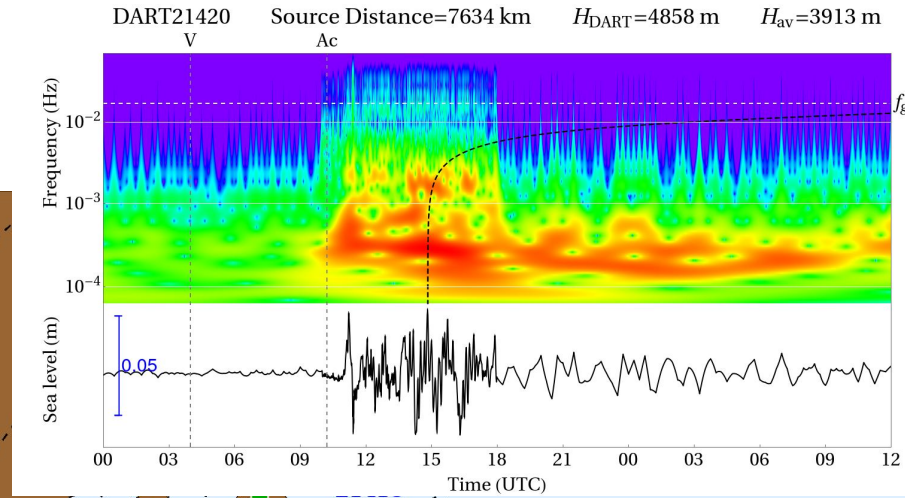


15 Jan 2022

After explosion, radar shows only high ground is above water

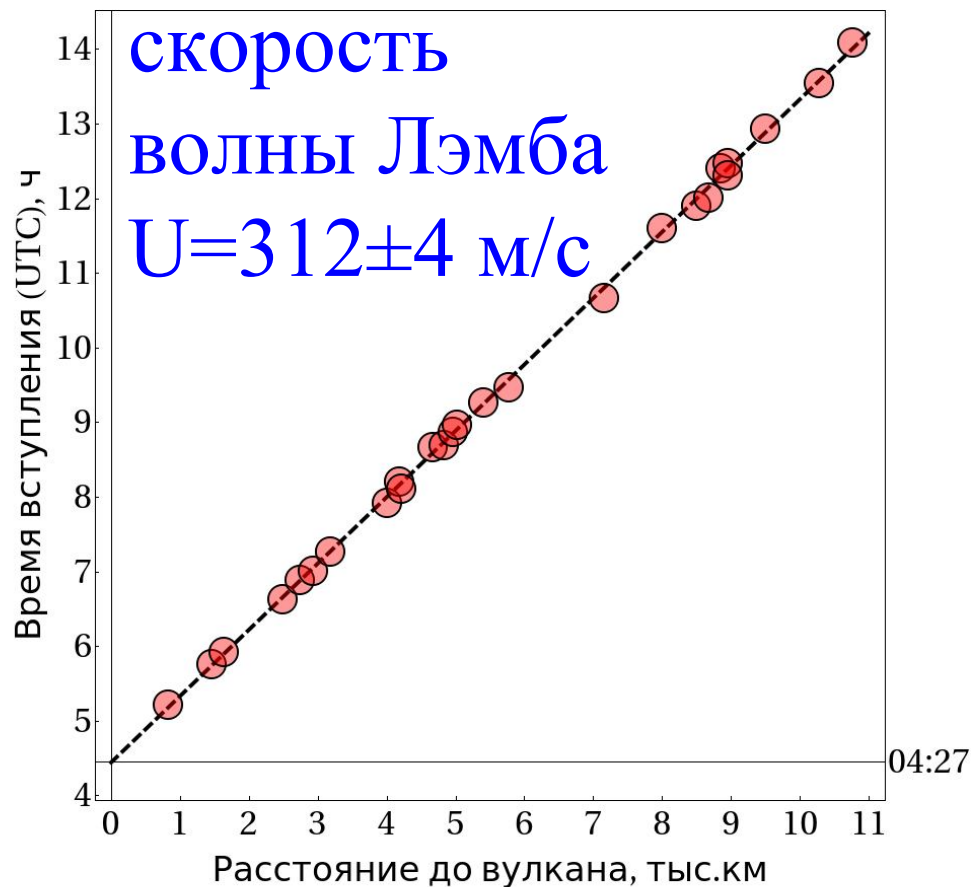
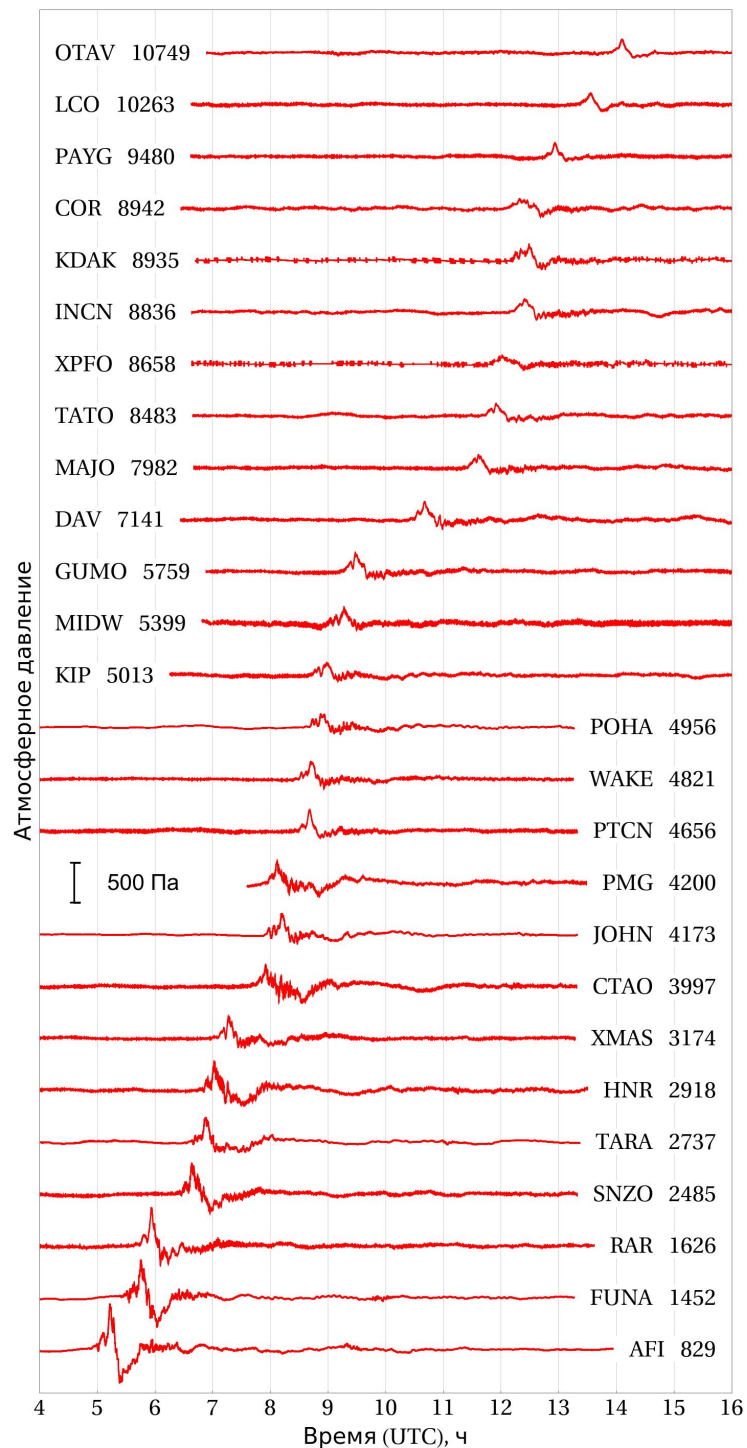




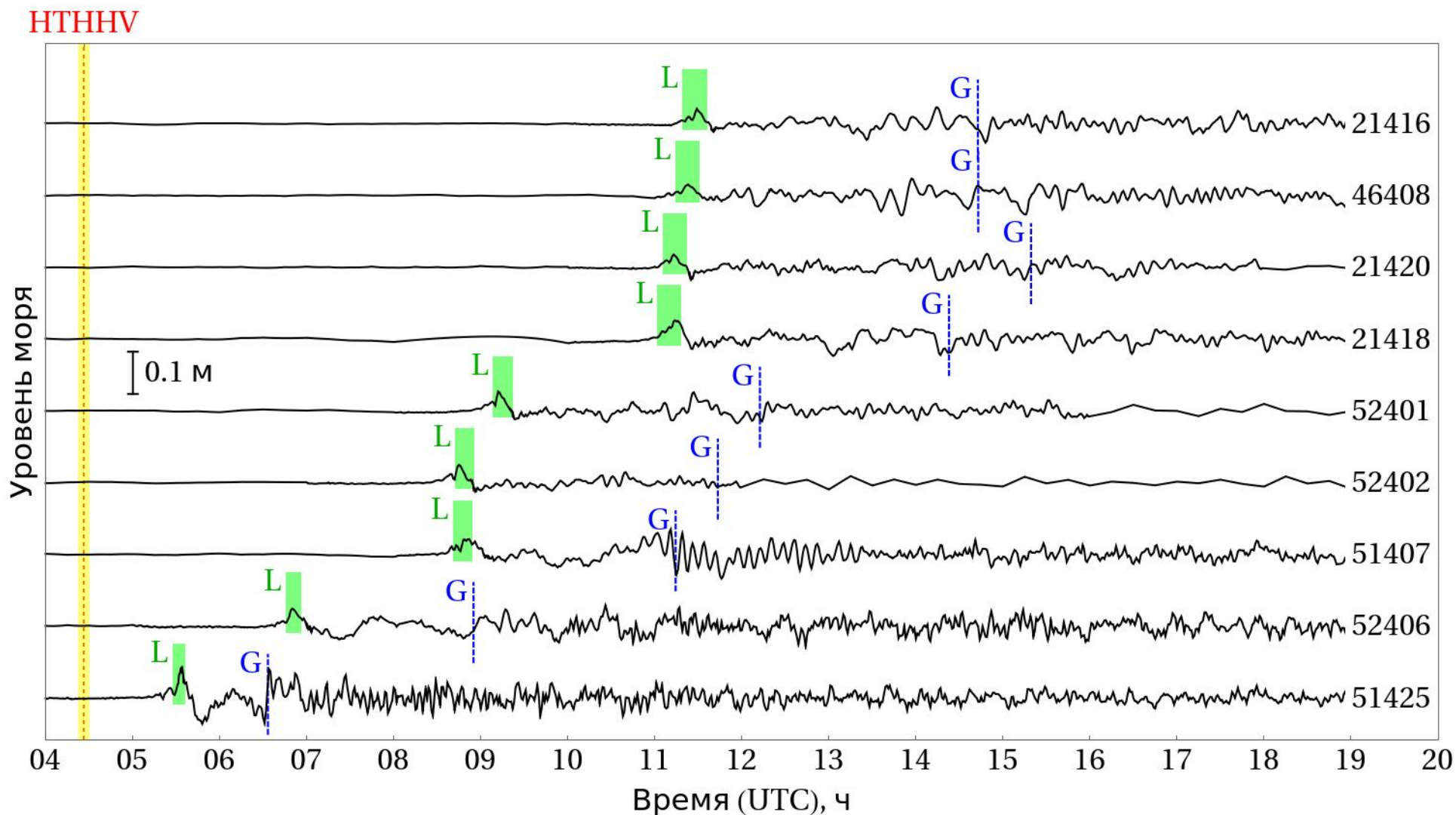


Анализ записей наземных барографов IRIS

время в источнике:
04:27 UTC ± 4 мин



Сигналы, зарегистрированные глубоководными станциями уровня моря DART



Проявление бегущего возмущения атмосферного давления в вариациях давления на дне океана

$$p_{\text{atm}} = p_a \sin(kx - \omega t)$$

$$U = \omega / k$$

$$\Delta F = 0$$

$$\left. \frac{\partial \xi}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=0}$$

$$F = F_0 \operatorname{ch}[k(z + H)] \cos(kx - \omega t)$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial t} \right|_{z=0} + \frac{p_{\text{atm}}}{\rho} + g\xi = 0$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=-H} = 0$$

$$\left. \frac{\partial F}{\partial t} \right|_{z=-H} + \frac{p_{\text{bott}}}{\rho} - gH = 0$$

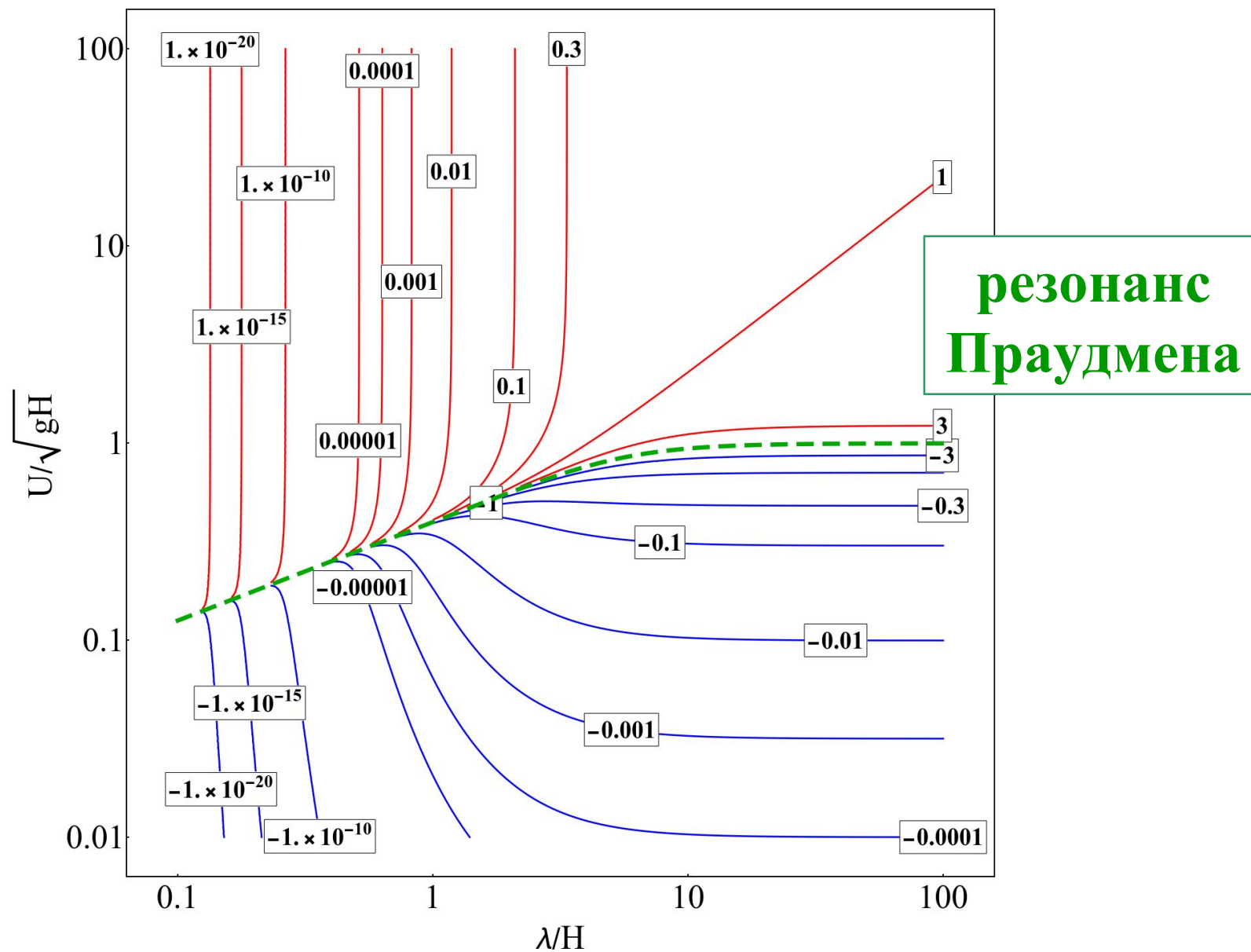
Проявление бегущего возмущения атмосферного давления на поверхности и на дне океана

$$\xi = \xi_0 \sin(kx - \omega t) \quad p_{\text{bott}} = \rho g H + p_b \sin(kx - \omega t)$$

$$\xi_0 = \frac{p_a c_{\text{ph}}^2}{g \rho (U^2 - c_{\text{ph}}^2)} \quad p_b = \frac{p_a U^2}{\text{ch}[kH] (U^2 - c_{\text{ph}}^2)}$$

$$c_{\text{ph}} = \sqrt{g \text{th}[kH] / k}$$

Амплитуда колебаний давления на дне (p_b/p_a) как функция длины волны и скорости распространения атм. возм-я



Проявление бегущего возмущения атмосферного давления на поверхности и на дне океана

$$\xi = \xi_0 \sin(kx - \omega t) \quad p_{\text{bott}} = \rho gH + p_b \sin(kx - \omega t)$$

$$\xi_0 = \frac{\rho_a c_{\text{ph}}^2}{g\rho(U^2 - c_{\text{ph}}^2)} \quad p_b = \frac{\rho_a U^2}{\text{ch}[kH](U^2 - c_{\text{ph}}^2)}$$

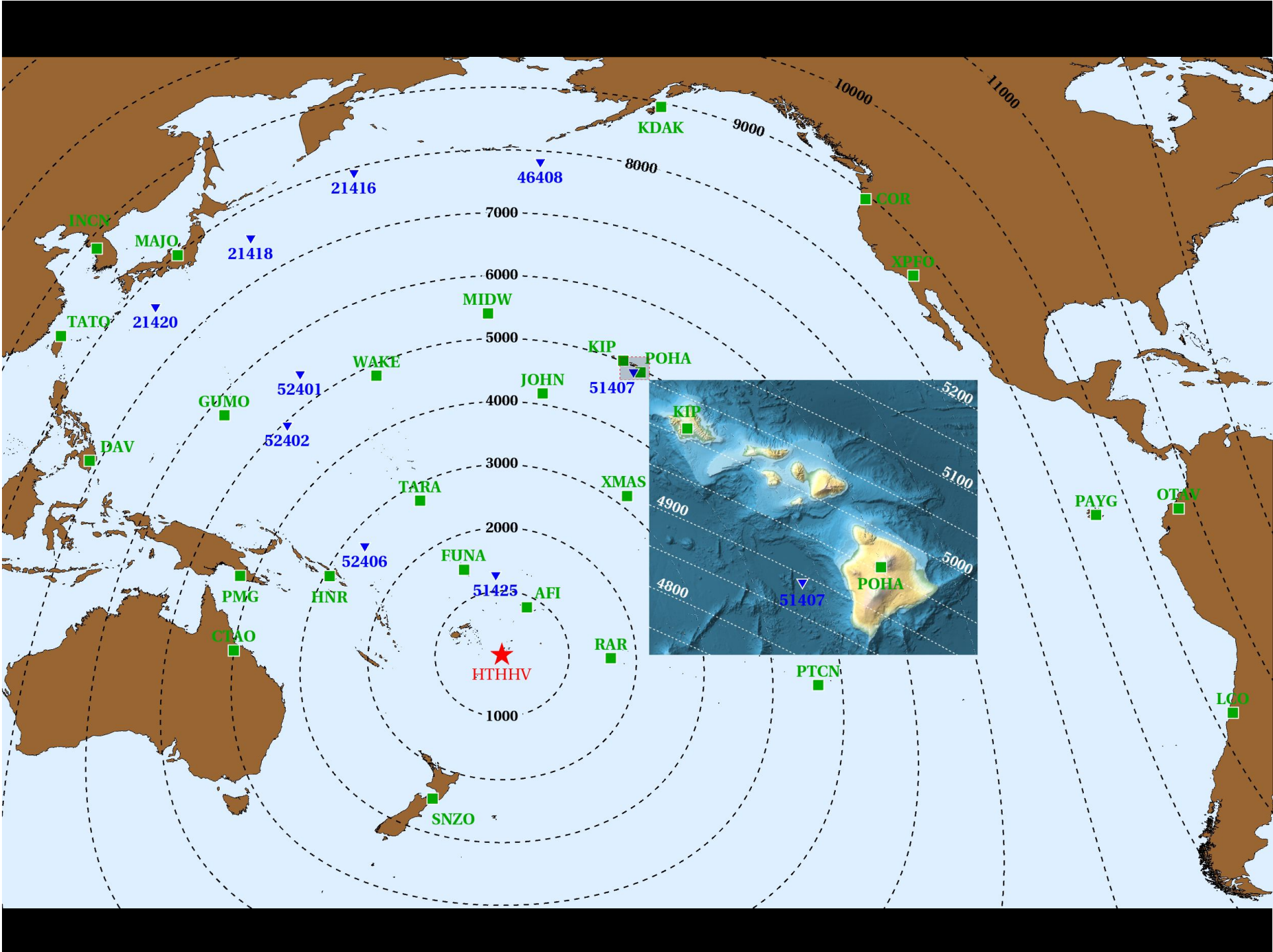
$$c_{\text{ph}} = \sqrt{g \text{th}[kH] / k}$$

длинноволновый предел: $\lambda \gg H$ или $kH \ll 1$

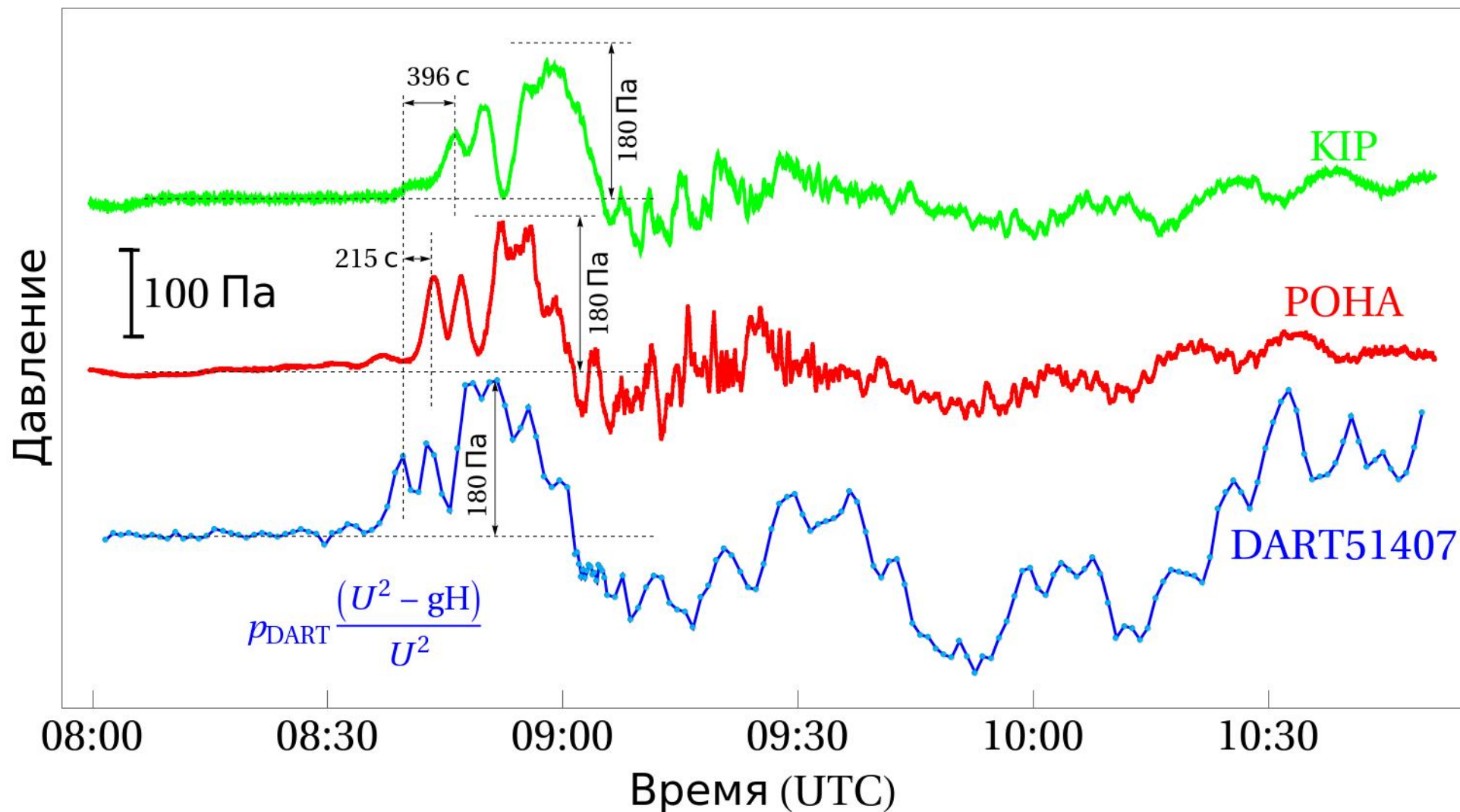
$$\xi_0 = \frac{\rho_a H}{\rho(U^2 - gH)}$$

**усиление
сигнала на
больших
глубинах**

$$p_b = \frac{\rho_a U^2}{U^2 - gH}$$



Сопоставление колебаний давления, зарегистрированных в атмосфере и на дне океана



Оценка амплитуды свободных волн, возбуждаемых бегущим атмосферным возмущением на скачке глубин

условие на скачке глубин:

$$\xi_1 = \xi_2, \quad u_1 H_1 = u_2 H_2$$

$$A^- = -\frac{p_a (\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2}) U^2}{\rho g (gH_1 - U^2) (\sqrt{gH_2} + U)} \quad \begin{array}{l} \approx 0.018 \text{ м} \\ \approx 0.077 \text{ м} \end{array}$$

$$A^+ = \frac{p_a (\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2}) U^2}{\rho g (gH_2 - U^2) (\sqrt{gH_1} - U)} \quad \begin{array}{l} \approx 0.51 \text{ м} \\ \approx 0.52 \text{ м} \end{array}$$

$$H_1 = 1000 \text{ м}$$

$$H_1 = 9000 \text{ м}$$

$$U = 312 \text{ м/с}$$

$$H_2 = 9000 \text{ м}$$

$$H_2 = 5000 \text{ м}$$

$$p_a = 500 \text{ Па}$$

Публикации по теме лекции:

Levin B.W., Nosov M.A. Physics of Tsunamis, Second Edition. Springer International Publishing AG Switzerland. 2016. 388 p.

Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Матsumото Х., Левин Б.В. Регистрация гравитационных волн, образованных в океане поверхностными сейсмическими волнами при землетрясении 11 марта 2011 г. у побережья Японии // Доклады Академии Наук. 2015. Т.461. №5. С. 593–598.

Семенцов К.А., Носов М.А., Колесов С.В., Ву Ю. Численное моделирование гравитационных волн, возбуждаемых в океане низкочастотными поверхностными сейсмическими волнами, на основе записей GPS-станций // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия. — 2017. — №6. — С. 107-112. DOI: 10.3103/S0027134917060145

Sementsov, K. A., Nosov, M. A., Kolesov, S. V., Karpov, V. A., Matsumoto, H., & Kaneda, Y. (2019). Free gravity waves in the ocean excited by seismic surface waves: Observations and numerical simulations. Journal of Geophysical Research: Oceans, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JC015115>.

Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прядун В.В. Вулканогенное цунами 15.01.2022 по данным глубоководных станций DART // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле, 2022. Т. 507, № 1, с. 61-66.

Носов М.А., Семенцов К.А., Колесов С.В., Прядун В.В. Проявления атмосферной волны Лэмба в вариациях придонного давления // Вестник Московского университета. Серия 3: Физика, астрономия, 2022, № 6.