

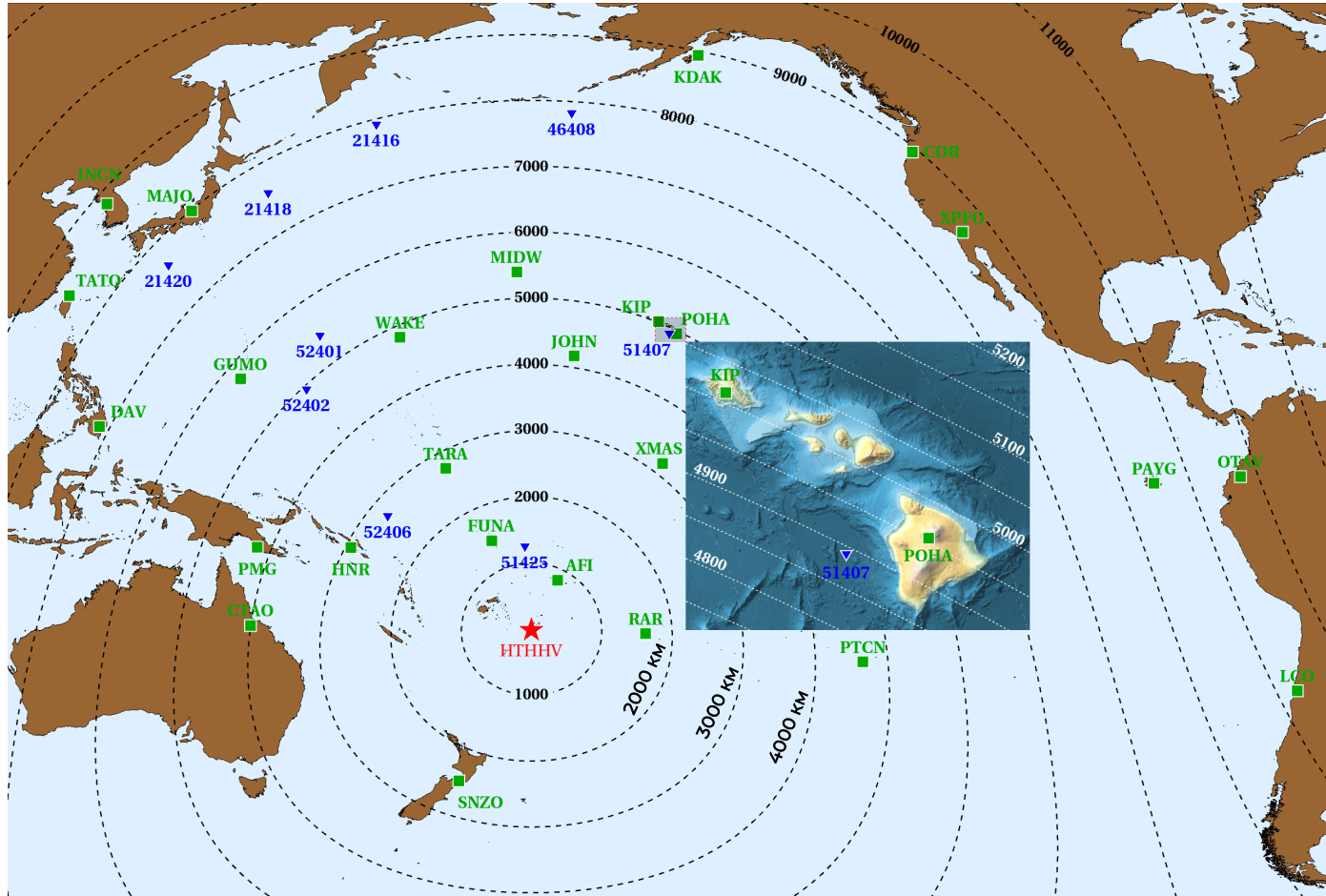


Физический факультет
Московский государственный университет
им. М.В. Ломоносова

Прядун В. В., Носов М. А., Семенцов К. А., Колесов С. В.

**Возмущения придонного давления,
вызванные взрывом вулкана Хунга Тонга –
Хунга Хаапай в январе 2022 г.**

Взаимное расположение вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай, глубоководных станций DART и наземных барографов IRIS.



Цель работы: теоретическое исследование механизма генерации цунами бегущими атмосферными возмущениями, а также анализ проявлений атмосферной волны Лэмба по данным наземных барографов IRIS и глубоководных станций DART



HTHHV



Барографы IRIS



Станции DART

Теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления



Из линейной потенциальной теории:

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

где p_a – амплитуда колебаний атмосферного давления, k – волновое число, ω – циклическая частота

F – потенциал скорости течения, ξ – отклонение свободной поверхности жидкости от равновесного положения

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial z^2} = 0 \quad + \text{ГУ:} \quad \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=-H} = 0; \quad \left. \frac{\partial F}{\partial t} \right|_{z=0} + \frac{P_{atm}}{\rho} + g\xi = 0; \quad \frac{\partial \xi}{\partial t} = \left. \frac{\partial F}{\partial z} \right|_{z=0};$$



Теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления

Решением являются потенциал и смещение следующего вида:

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

$$\xi = \xi_0 \sin(kx - \omega t)$$

Уравнение Бернулли на поверхности дна (при $z = -H$)

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



Теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления

$$P_{bott} = \rho g H + p_b \sin(kx - \omega t),$$

где $U = \omega / k$ - скорость распространения атмосферного возмущения,

$c_{ph} = \sqrt{g \operatorname{th}[kH] / k}$ - фазовая скорость гравитационных поверхностных волн.

$$(1) \quad p_b = \frac{p_a U^2}{ch[kH](U^2 - c_{ph}^2)},$$

При $\lambda \gg H$:

Формулы (1) и (2) приобретают вид

$$(2) \quad \xi_0 = \frac{p_a c_{ph}^2}{g \rho (U^2 - c_{ph}^2)},$$

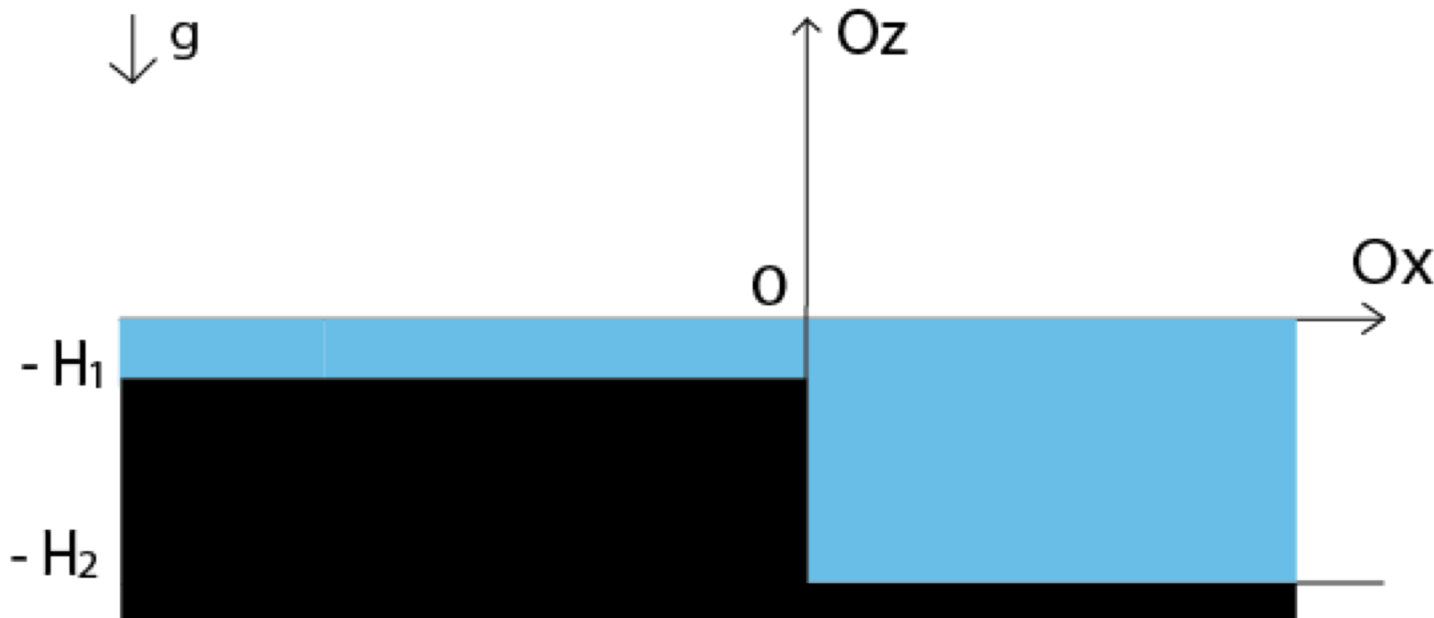
$$p_b = \frac{p_a U^2}{U^2 - gH}; \quad \xi_0 = \frac{p_a H}{\rho (U^2 - gH)}$$



Теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления

Постановка задачи:

$\lambda \gg H$:



Волновые уравнения для смещения свободной поверхности и скорости горизонтального течения

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gH_i \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{H_i}{\rho} \frac{\partial^2 p_{atm}}{\partial x^2}$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - gH_i \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial^2 p_{atm}}{\partial x \partial t},$$

где $i = 1, 2$



Теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления

Бегущее атмосферное возмущение: $P_{atm} = p_a f(x - Ut)$

где f – безразмерная функция, описывающая форму атмосферного возмущения

Решения волновых уравнений с учетом $u = \mp \xi \sqrt{g/H}$

$$\xi_1 = \frac{H_1/\rho}{U^2 - gH_1} p_a f(x - Ut) + A^- f(x + \sqrt{gH_1}t),$$

$$\xi_2 = \frac{H_2/\rho}{U^2 - gH_2} p_a f(x - Ut) + A^+ f(x - \sqrt{gH_2}t),$$

$$u_1 = \frac{U/\rho}{U^2 - gH_1} p_a f(x - Ut) - A^- \sqrt{\frac{g}{H_1}} f(x + \sqrt{gH_1}t),$$

$$u_2 = \frac{U/\rho}{U^2 - gH_2} p_a f(x - Ut) + A^+ \sqrt{\frac{g}{H_2}} f(x - \sqrt{gH_2}t),$$

где A^+ и A^- – амплитуды свободных волн бегущих в отрицательном и положительном направлении оси Ox соответственно

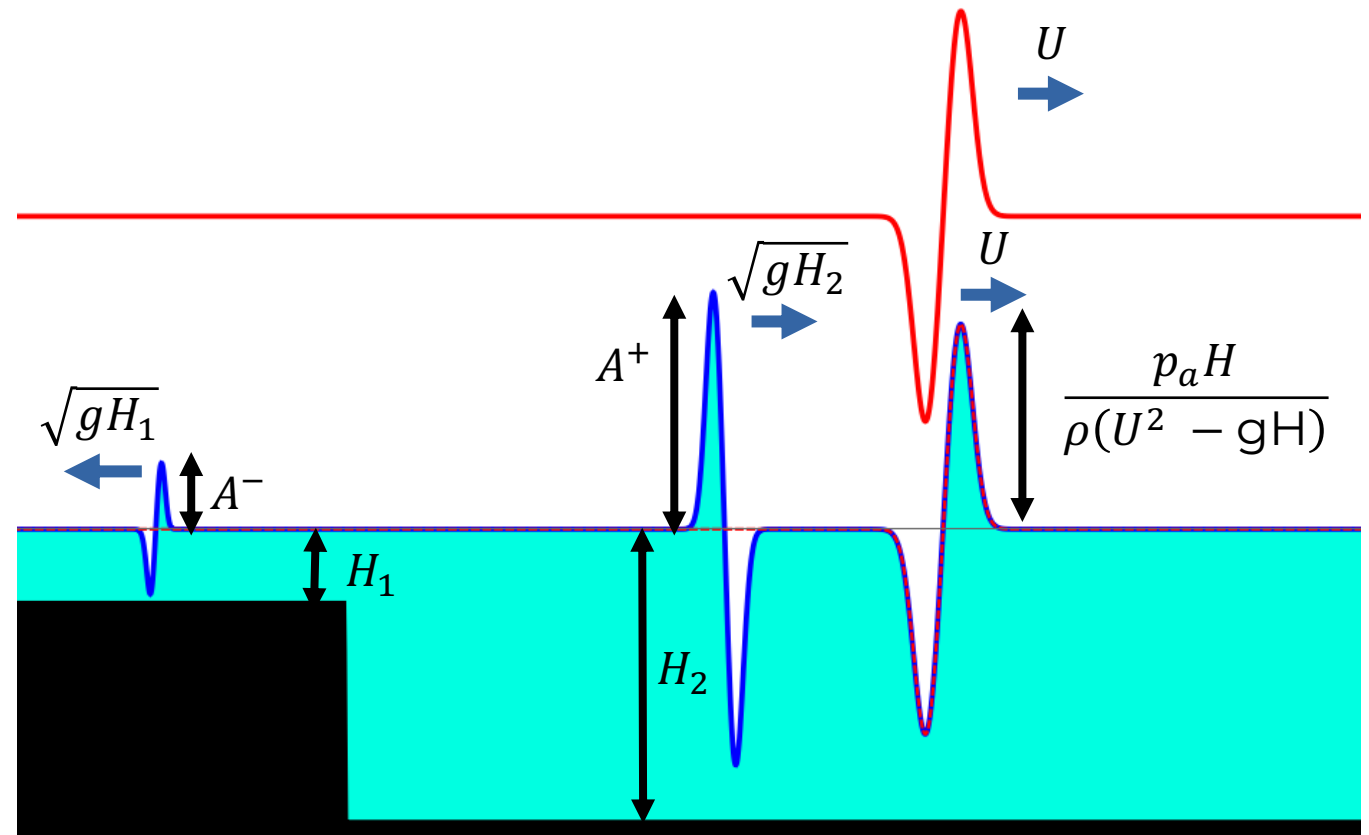


Теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления

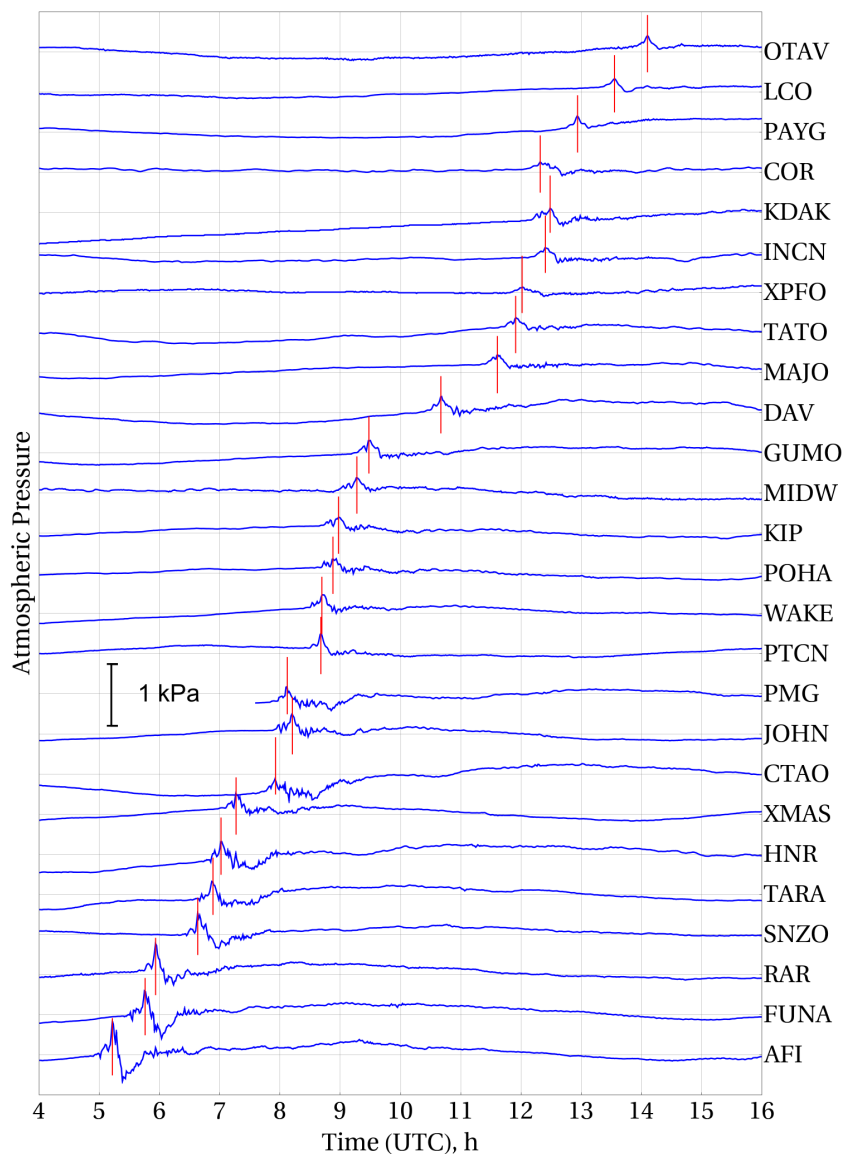
Сшивая решения в точке $x = 0$ с учетом условий непрерывности смещения свободной поверхности и потока вещества $\xi_1 = \xi_2$, $H_1 u_1 = H_2 u_2$, получаем выражения для амплитуд A^+ и A^-

$$A^+ = \frac{(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2})U^2 p_a}{(gH_2 - U^2)(\sqrt{gH_1} - U)\rho g}$$

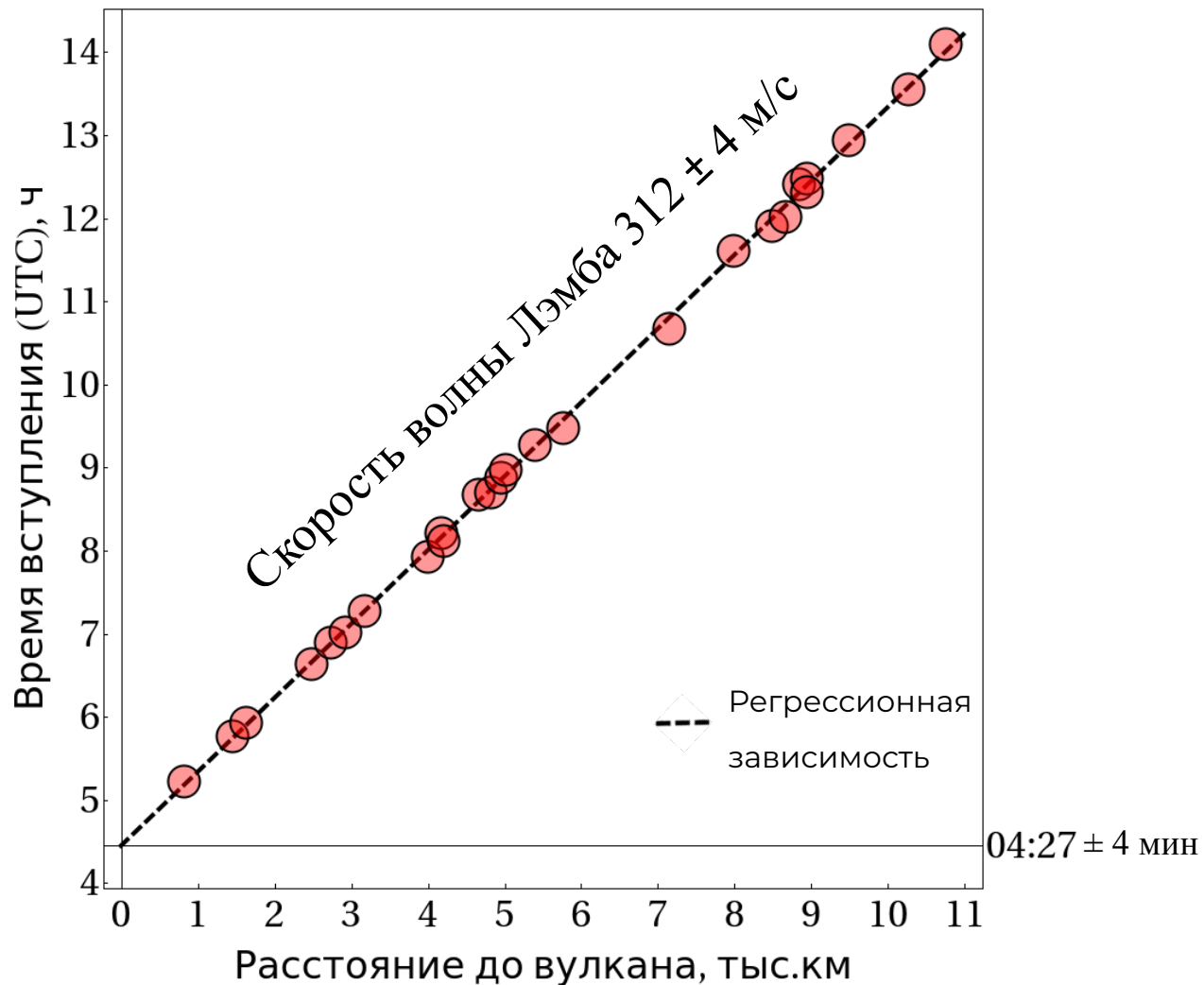
$$A^- = \frac{(\sqrt{gH_2} - \sqrt{gH_1})U^2 p_a}{(gH_1 - U^2)(\sqrt{gH_2} + U)\rho g}$$



Вариации атмосферного давления

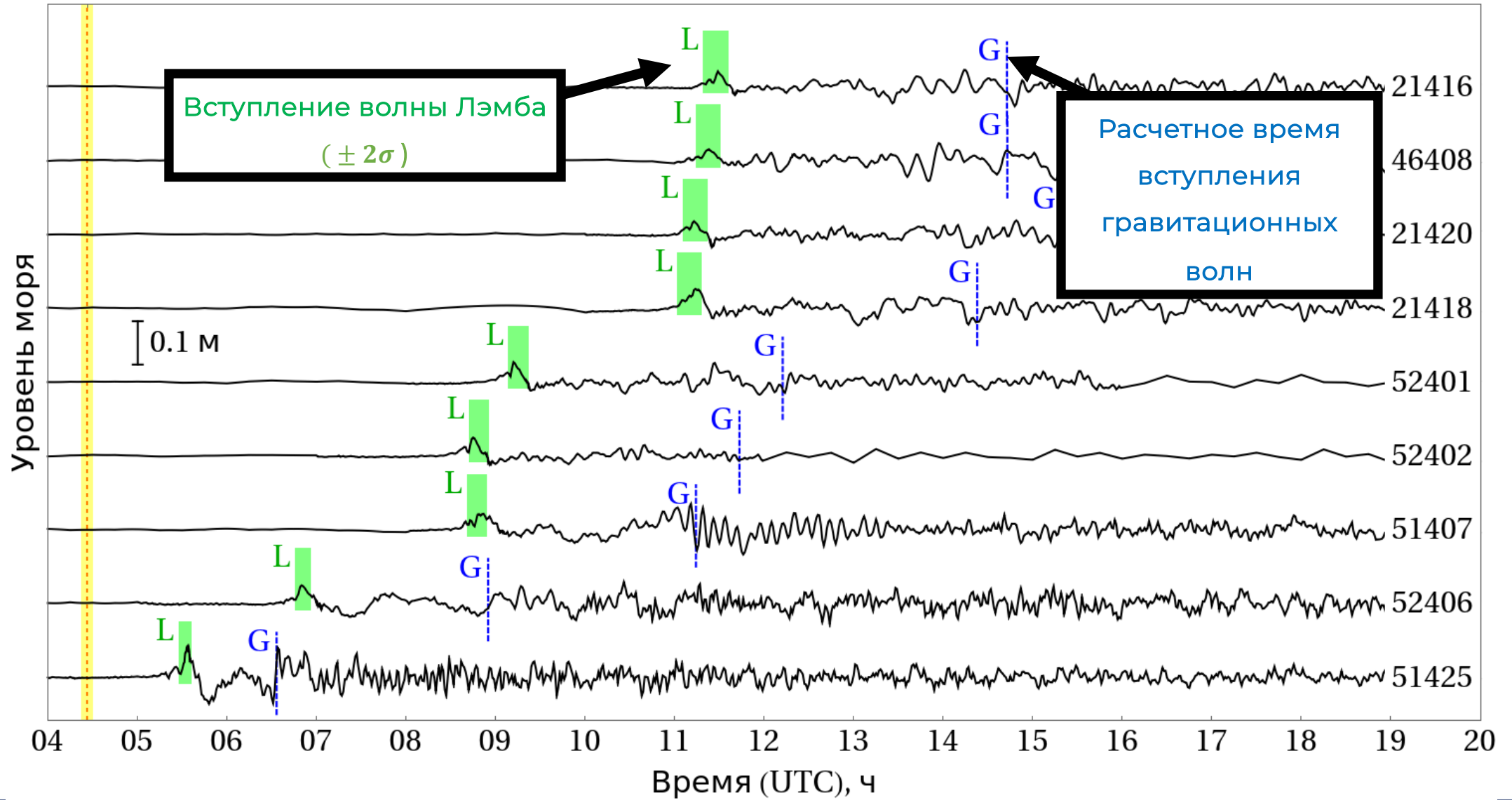


Зависимость времени вступления волны Лэмба от расстояния между вулканом и барографами



Записи вариаций придонного давления, зарегистрированные станциями DART

НТННУ, 04 : 27 ± 4 мин



Амплитуды свободных гравитационных волн

$$A^- = \frac{(\sqrt{gH_2} - \sqrt{gH_1})U^2 p_a}{(gH_1 - U^2)(\sqrt{gH_2} + U)\rho g}$$

$$A^+ = \frac{(\sqrt{gH_1} - \sqrt{gH_2})U^2 p_a}{(gH_2 - U^2)(\sqrt{gH_1} - U)\rho g}$$

$$H_1 = 1000 \text{ m}$$

$$H_2 = 9000 \text{ m}$$

$$U = 312 \text{ m/s}$$

$$p_a = 500 \text{ Pa}$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$\rho = 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$A^- \approx 0.018 \text{ m}$$

$$A^+ \approx 0.51 \text{ m}$$

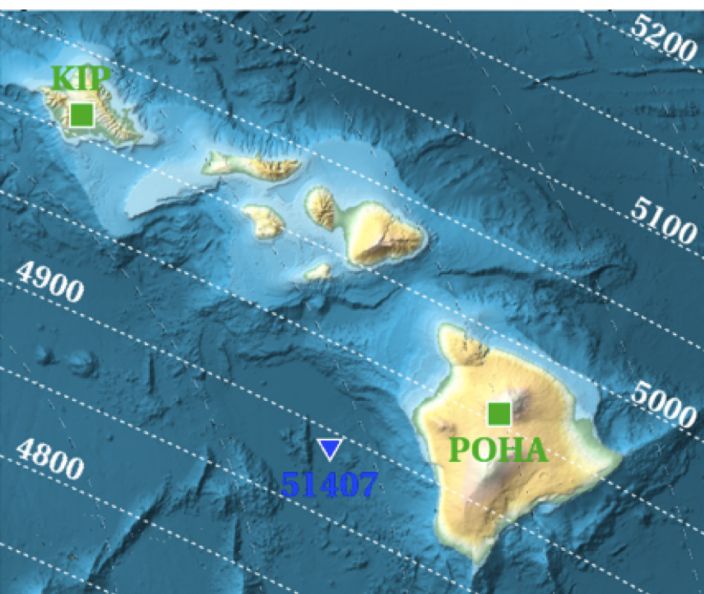
е.г. западный склон
желоба Тонга

При скачке глубин $H_1 = 9000 \text{ m}$, $H_2 = 5000 \text{ m}$ (е.г. восточный склон желоба Тонга) :

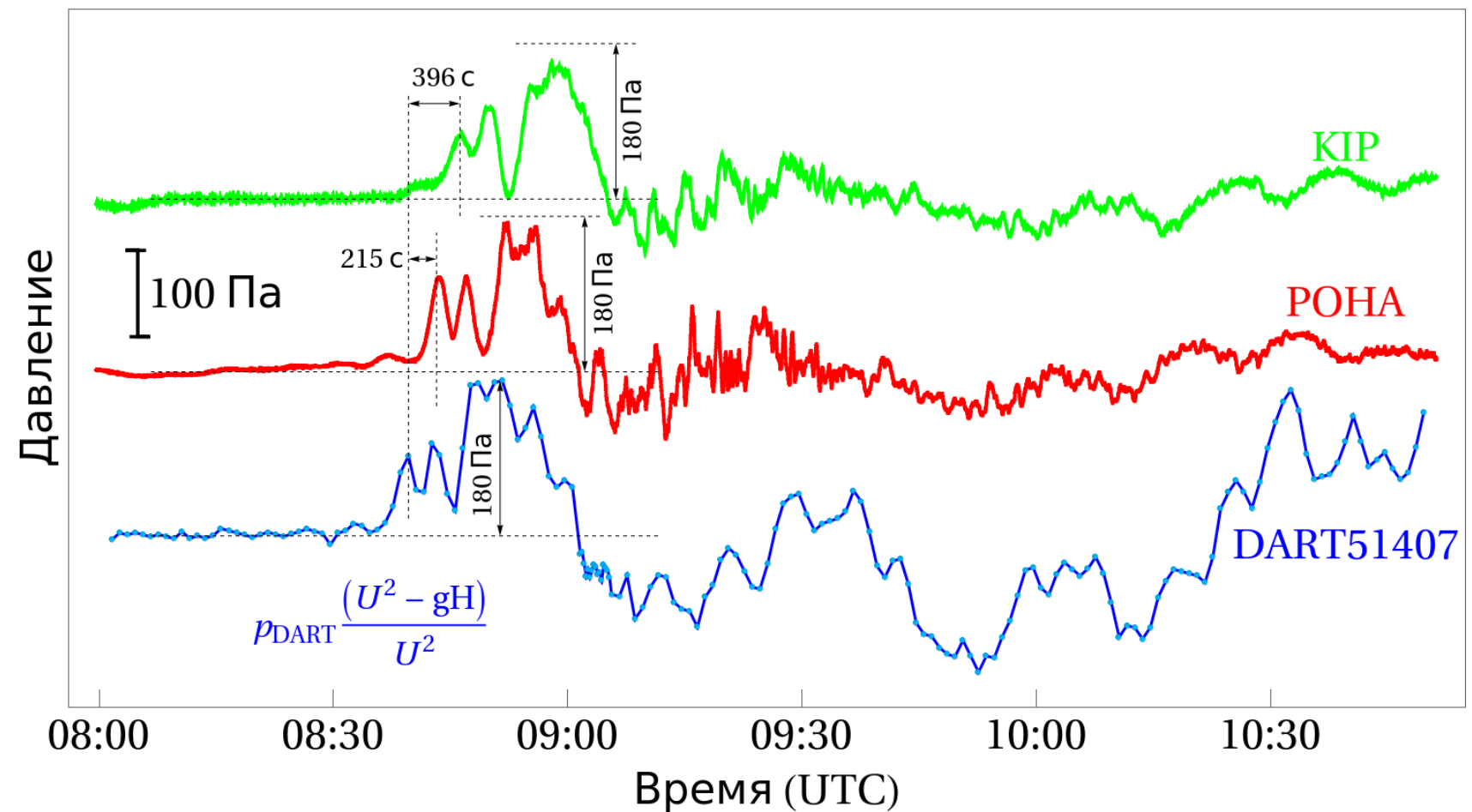
$$A^- \approx 0.077 \text{ m} \text{ и } A^+ \approx 0.52 \text{ m}$$



Вариации атмосферного давления, зарегистрированные барографами РОНА и КИР, также вариации придонного давления, зарегистрированные станцией DART51407



$$\left. \begin{aligned}
 U &= 312 \text{ м/с,} \\
 G &= 9.8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} \\
 H &= 4793 \text{ м}
 \end{aligned} \right\} \frac{U^2 - gH}{U^2} \approx 0.518$$



Выводы:

- По данным наземных барографов IRIS тихоокеанского региона исследованы проявления волн Лэмба, вызванных взрывом вулкана Хунга Тонга – Хунга Хаапай
- Установлено, что волна Лэмба распространялась со скоростью 312 ± 4 м/с, а время в источнике составило 04:27 UTC ± 4 мин
- По данным глубоководных станций уровня моря DART показано, что первый отчетливо различимый всплеск придонного давления в точности соответствует времени прохождения волны Лэмба
- Выполнен теоретический анализ линейного отклика водного слоя на возмущения атмосферного давления
- Установлено и подтверждено экспериментально, что в вариациях придонного давления атмосферные возмущения с длинами волн $\lambda \gg H$ проявляются у дна океана с усилением, а при близости к резонансу Праудмена – со значительным усилением





Литература:

1. 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. — doi: 10.31857/S2686739722601004
2. 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.

*Исследование выполнено за счет гранта
Российского научного фонда № 22-27-00415*



Спасибо за внимание