

ОЦЕНКА АМПЛИТУДЫ СЕЙШ, ВОЗБУЖДАЕМЫХ УДАЛЕННЫМИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯМИ В МАЛЫХ ВОДОЕМАХ СУШИ

Д. Н. Валеева, М. А. Носов

Московский государственный
университет имени М.В. Ломоносова



Введение

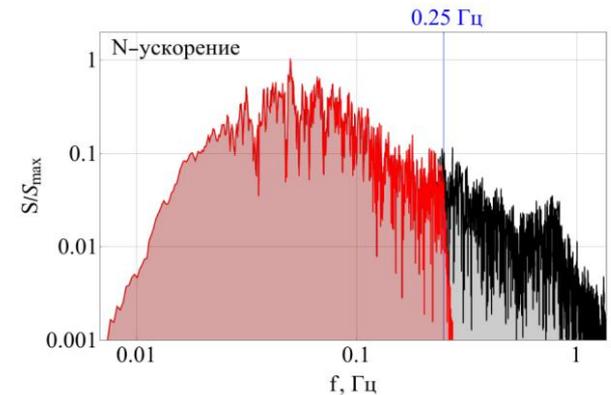
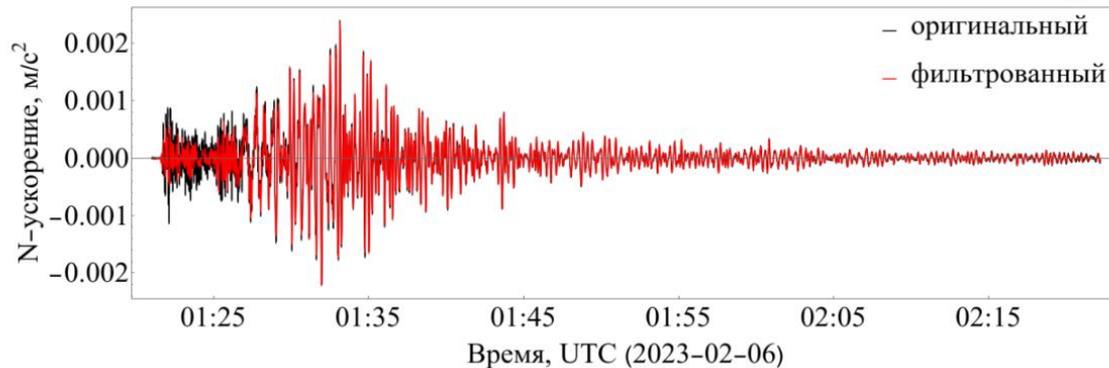
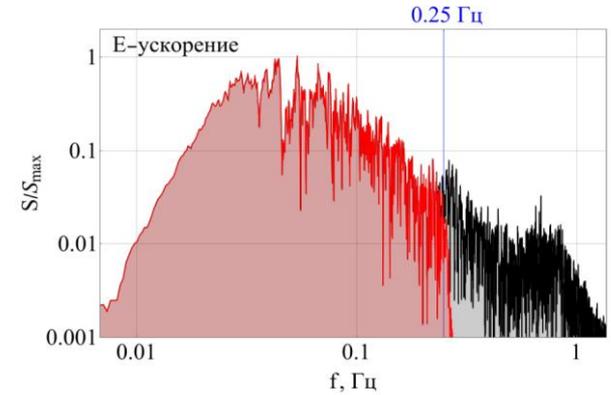
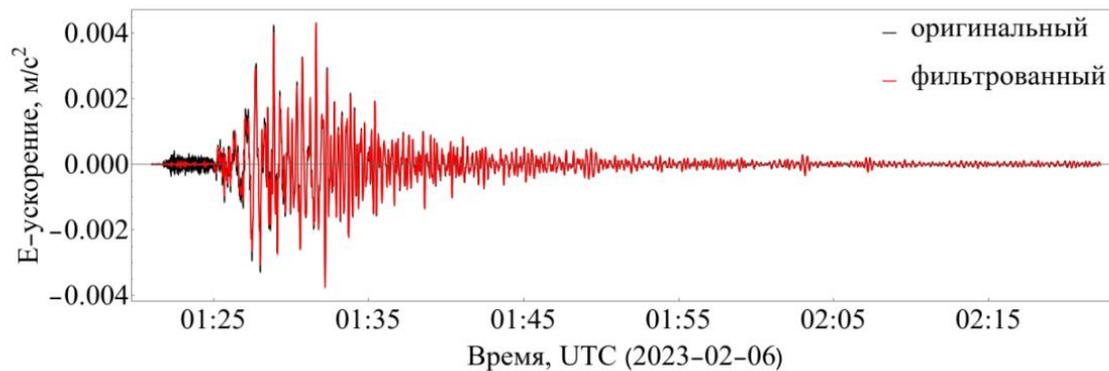
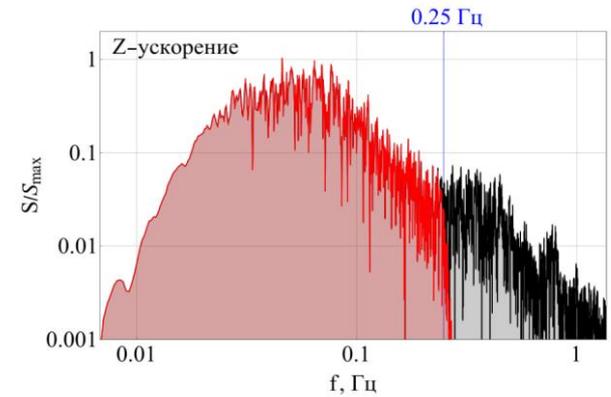
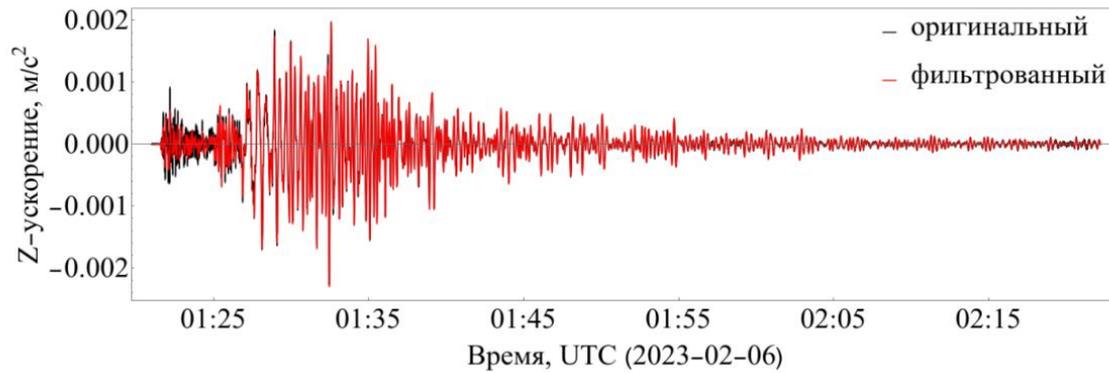


Ограничения на модель

1. $L \ll \Lambda$, L – горизонтальная протяженность водоема, Λ – длина сейсмических волн
2. $\lambda \gg H$, λ – длина поверхностной гравитационной волны, H – глубина водоема
3. Малость амплитуды возбуждаемых волн по сравнению с глубиной водоема (линейность)

-
- $\lambda > 10H$
 - $T_c = 10\sqrt{H/g}$, T_c – период среза (фильтрации) сейсмической записи

Сейсмический сигнал (Землетрясение в Турции 2023 года)



Вертикальная компонента сейсмического сигнала

$$\frac{\partial \xi}{\partial t} + (\nabla, H\vec{v}) = 0$$
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -(g - a_z)\nabla \xi + \vec{a}_h$$

ξ — смещение свободной водной поверхности от равновесного положения,

$\vec{a}_h = (a_E, a_N)$ — горизонтальное ускорение системы отсчета,

a_z — ее вертикальное ускорение,

$\vec{v} = (u_E, v_N)$ — вектор горизонтальной скорости течения.

- $\tau = \frac{8g}{\eta_0 \omega^3}$ — характерное время роста амплитуды волн при параметрическом резонансе
- η_0 и ω — амплитуда и циклическая частота сейсмических колебаний
- $a_z \sim \eta_0 \omega^2 = 0.002 \text{ м/с}^2$
- $\tau \sim 1.3 \times 10^5 \text{ с (35 ч)}$

Одномерная аналитическая модель - 1

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} - gH \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = 0 \\ \left. \frac{\partial \xi}{\partial x} \right|_{x=0,L} = -\frac{a(t)}{g} \end{cases}$$

Аналитическое решение:

$$\xi(x, t) = \frac{2H}{\pi\sqrt{gH}} \int_0^t d\hat{t} a(\hat{t}) \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos\left(\frac{\pi n x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi n \sqrt{gH}}{L} (t - \hat{t})\right) [1 - \cos(\pi n)]$$

Одномерная аналитическая модель - 2

1. Формула Мериана для основного собственного периода:

$$T_0 = \frac{2L}{\sqrt{gH}}$$

2. $x^* = \frac{x}{L}$, $t^* = \frac{t\sqrt{gH}}{2L}$ - безразмерные величины.

$$\frac{\xi(x^*, t^*)}{L} = \frac{2}{\pi} \int_0^t d\hat{t}^* \frac{a(\hat{t}^*)}{g} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n} \cos(\pi n x^*) \sin(\pi n (t^* - \hat{t}^*)) [1 - \cos(\pi n)]$$

3. $a(t) = a_E(t) \sin \alpha + a_N(t) \cos \alpha$

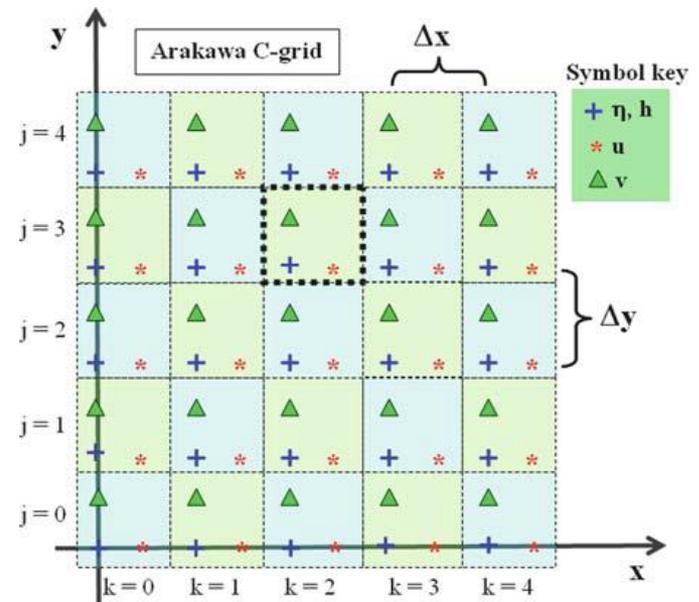
Численная модель сейсмоиндуцированных сейш

$$\begin{cases} \frac{\partial \xi}{\partial t} + (\nabla, H \vec{v}) = 0 \\ \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} = -g \nabla \xi + \vec{a}_h \end{cases} ; (\vec{v}, \vec{n}) \Big|_{v \in \Omega} = 0;$$

Схема:

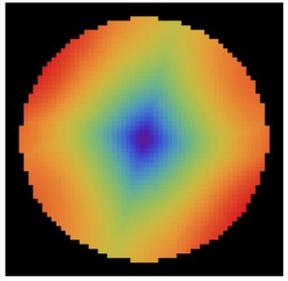
- С-сетка Аракавы;
- Схема «чехарда»;
- Второй порядок точности по времени и координатам;
- Схема устойчива при выполнении критерия Куранта-Фридрихса-Леви

$$\Delta t < \frac{\min(\Delta x, \Delta y)}{\sqrt{2g * h_{max}}}$$

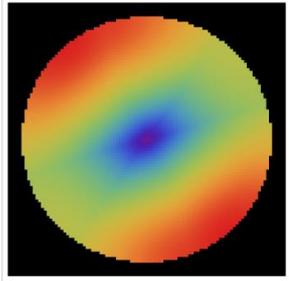


Результаты 2D моделирования

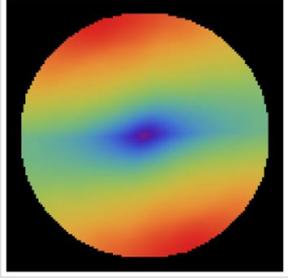
R=5 м, H=1 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.011(\text{зеркало}) / 0.011(\text{урес})$ м



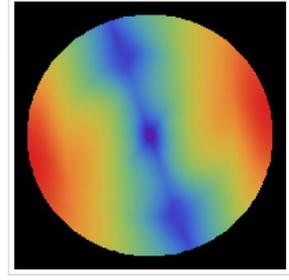
R=20 м, H=5 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.109(\text{зеркало}) / 0.109(\text{урес})$ м



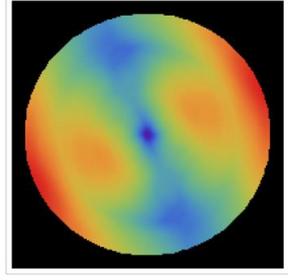
R=60 м, H=10 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.328(\text{зеркало}) / 0.328(\text{урес})$ м



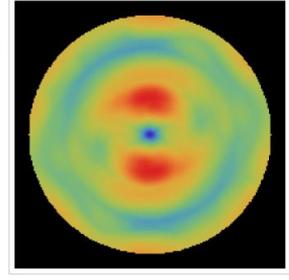
R=200 м, H=40 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.820(\text{зеркало}) / 0.820(\text{урес})$ м



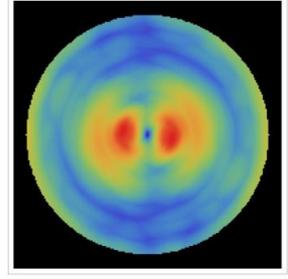
R=300 м, H=50 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.556(\text{зеркало}) / 0.556(\text{урес})$ м



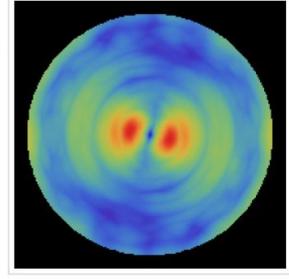
R=300 м, H=30 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.343(\text{зеркало}) / 0.277(\text{урес})$ м



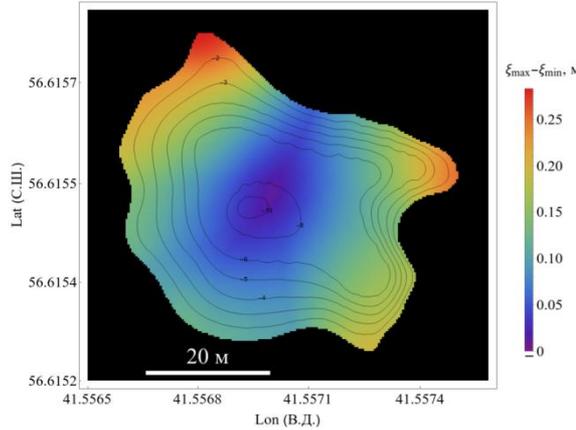
R=400 м, H=20 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.370(\text{зеркало}) / 0.254(\text{урес})$ м



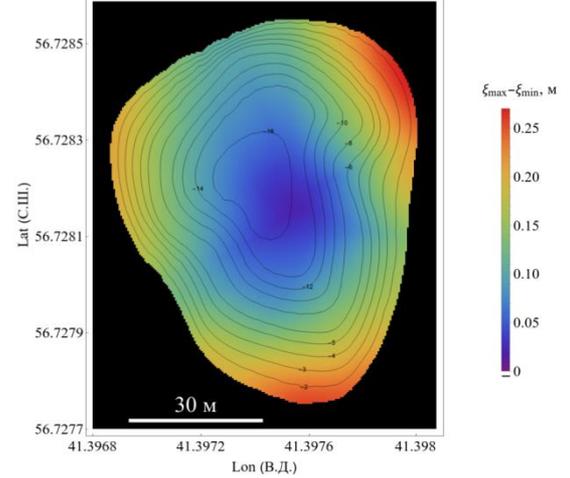
R=500 м, H=20 м, $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.438(\text{зеркало}) / 0.279(\text{урес})$ м



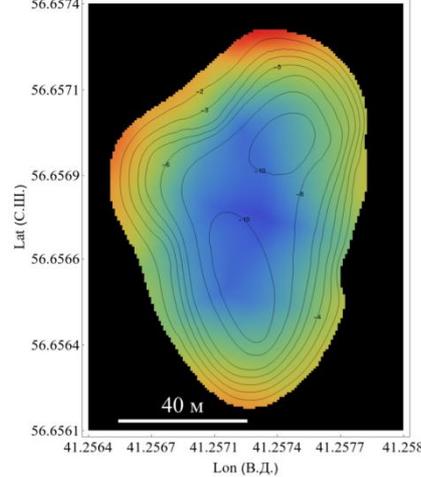
оз. Колдун $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.283$ м



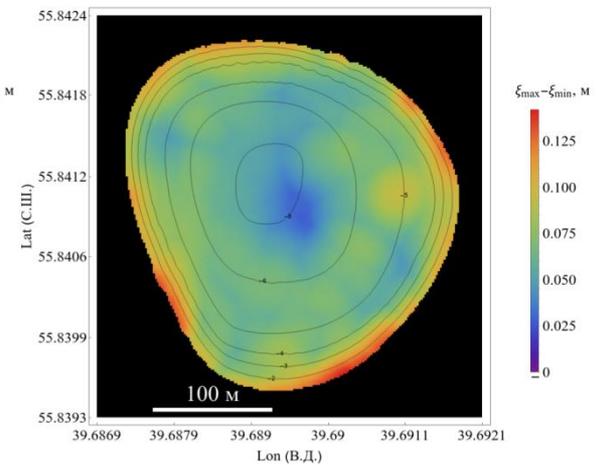
оз. Первое Русалочье $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.270$ м



оз. Белая Вода $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.411$ м

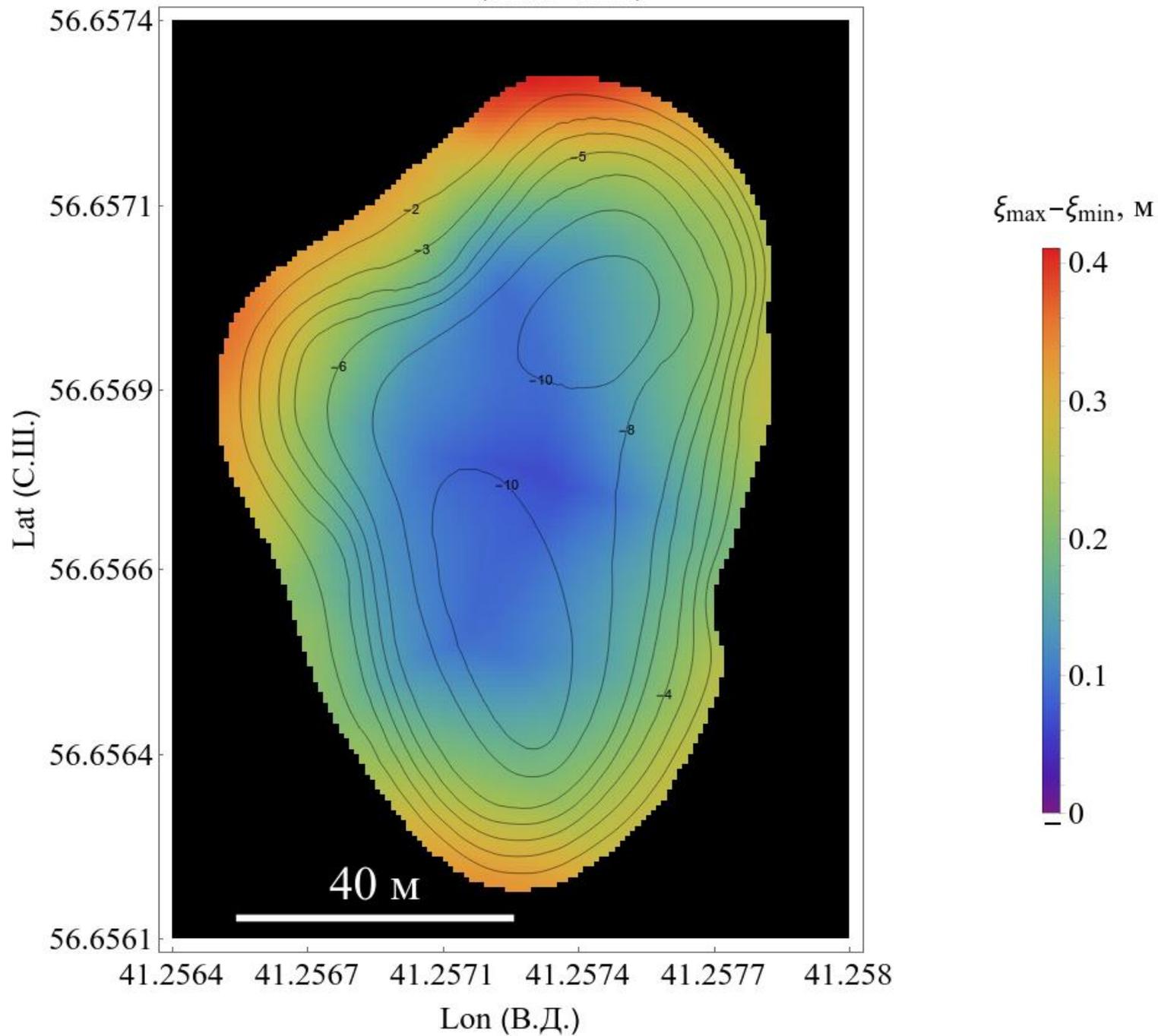


оз. Глубокое $\text{Max}(\xi_{\text{max}}-\xi_{\text{min}})=0.142$ м

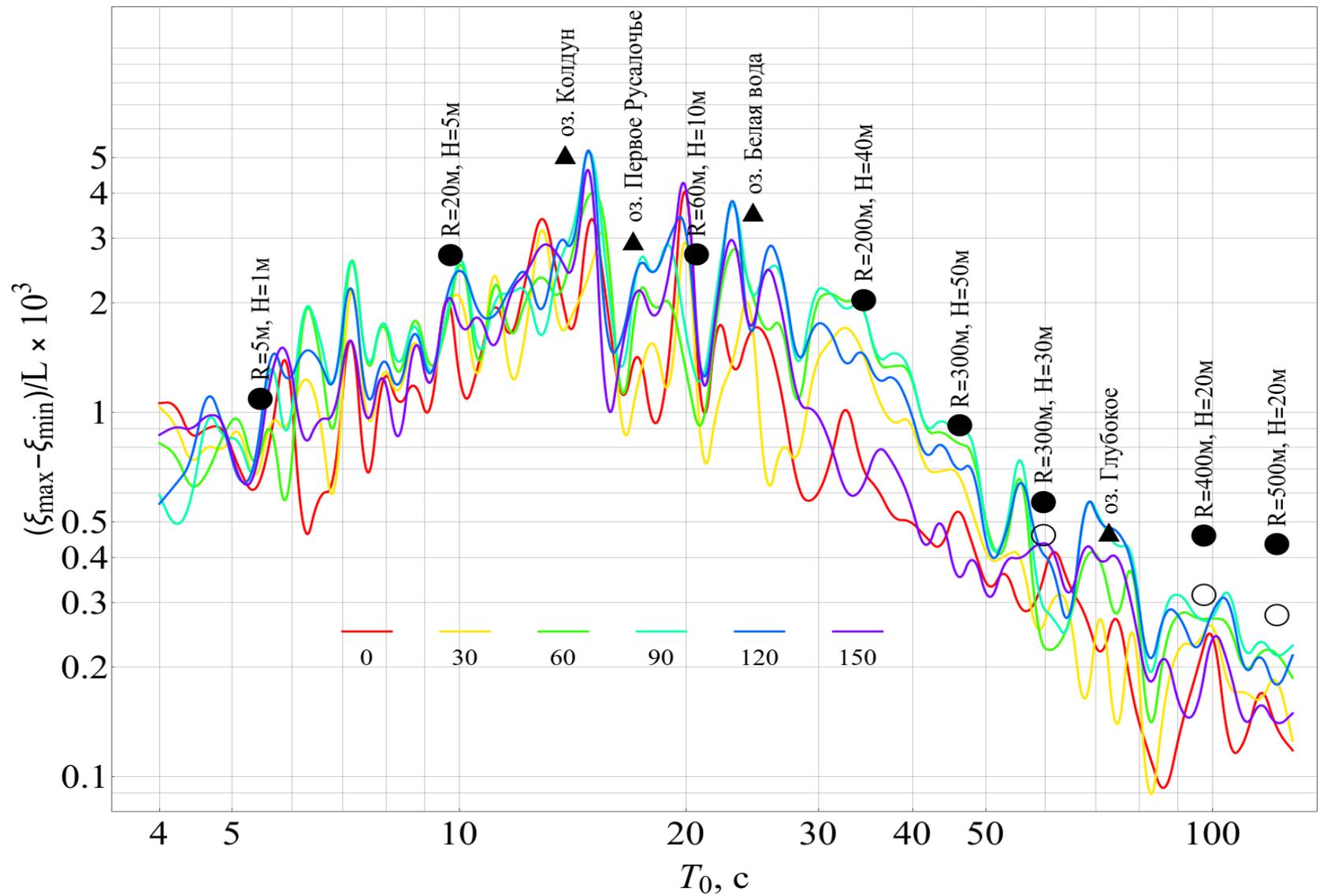


оз. Белая Вода

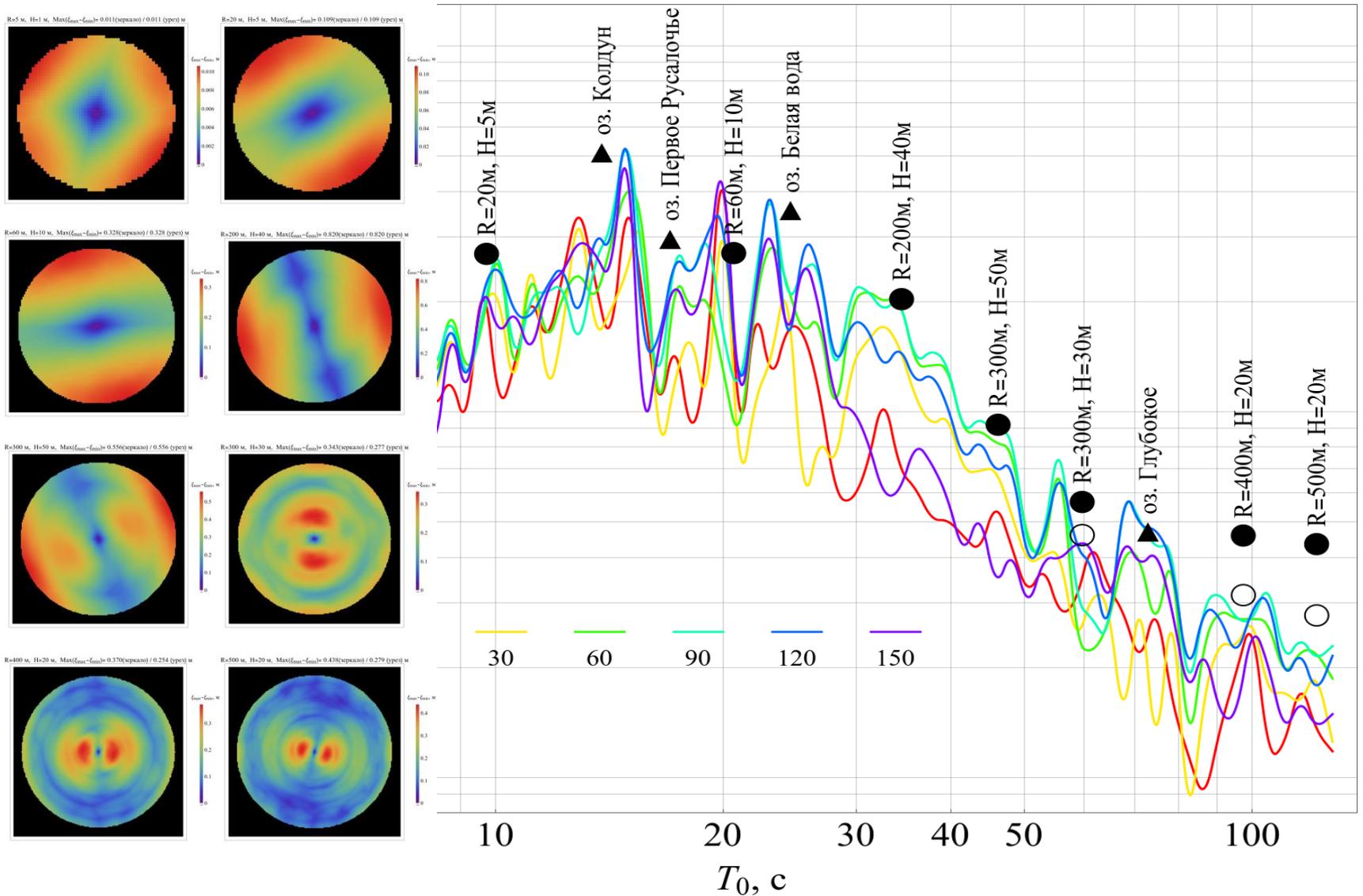
$\text{Max}(\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}) = 0.411 \text{ м}$



Результаты



Результаты



Заключение

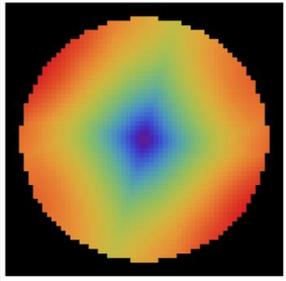
- Основную роль при формировании сейсмоиндуцированных сейш играют горизонтальные движения дна
- Водоем можно охарактеризовать двумя параметрами: собственным периодом T_0 и горизонтальной протяженностью L
- Амплитуда сейш линейно возрастает с увеличением протяженности водоема (при сохранении максимального собственного периода)
- Численно воспроизведено формирование сейшевых колебаний в бассейнах цилиндрической формы и в водоемах с естественной батиметрией под воздействием Турецкого землетрясения 2023 года
- Аналитический метод показал хорошее соответствие с численными результатами

Благодарности

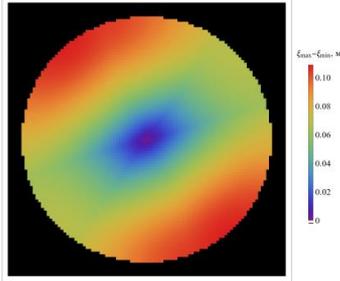
Благодарим кафедру физики Земли
физического МГУ имени М.В. Ломоносова за
предоставленные данные по
катастрофическому землетрясению в Турции
2023 года.

Спасибо за внимание!

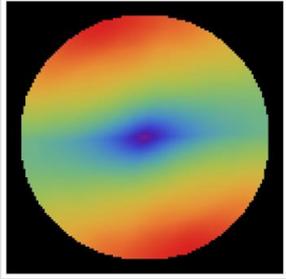
R=5 м, H=1 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.01(серкало) / 0.011 (урец) м



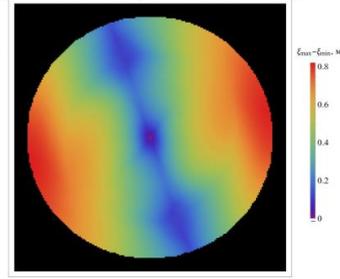
R=20 м, H=5 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.109(серкало) / 0.109 (урец) м



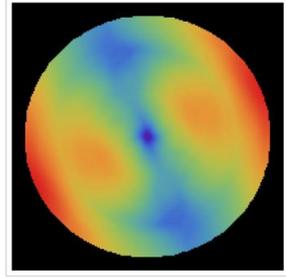
R=60 м, H=10 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.328(серкало) / 0.328 (урец) м



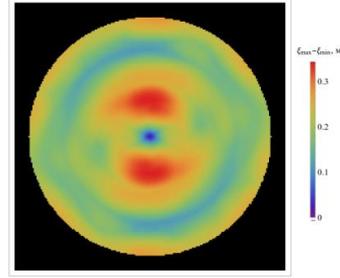
R=200 м, H=40 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.820(серкало) / 0.820 (урец) м



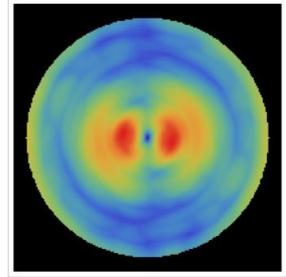
R=300 м, H=50 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.556(серкало) / 0.556 (урец) м



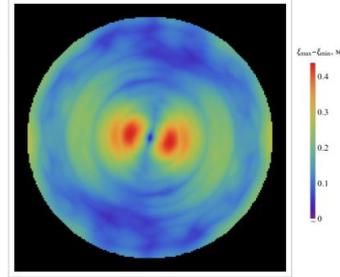
R=300 м, H=30 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.343(серкало) / 0.277 (урец) м



R=400 м, H=20 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.370(серкало) / 0.254 (урец) м

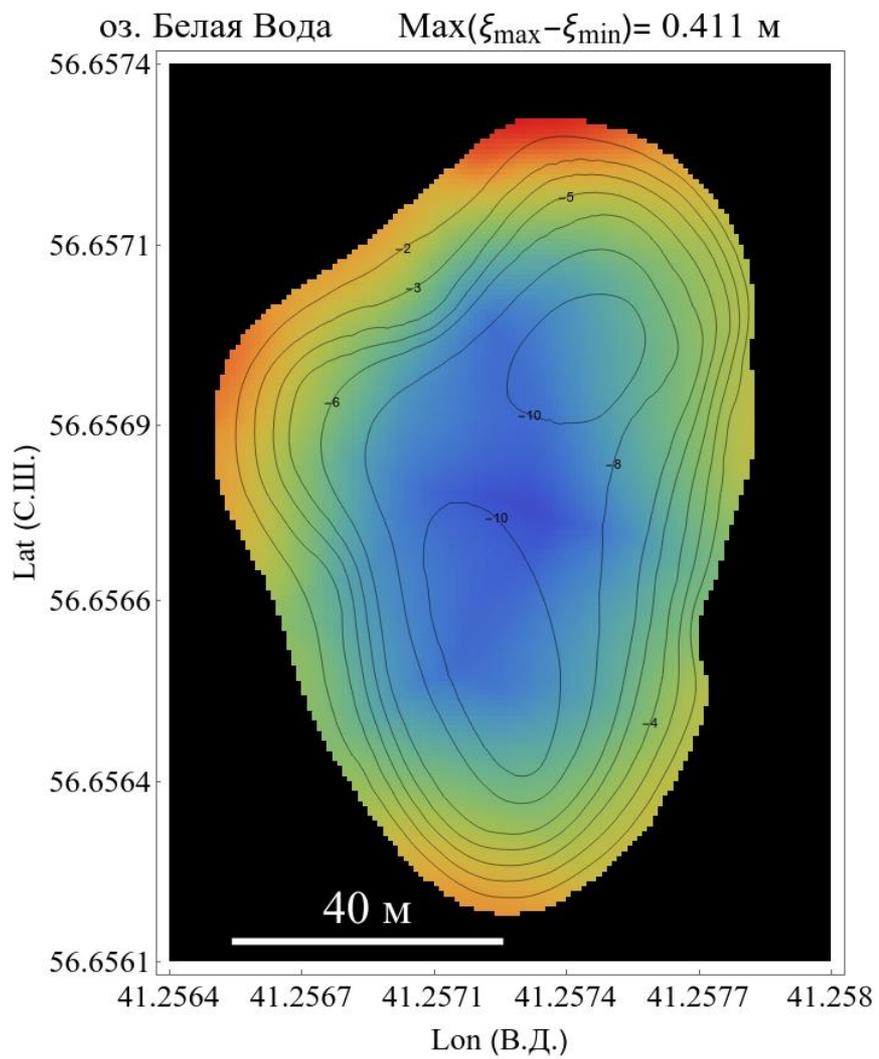
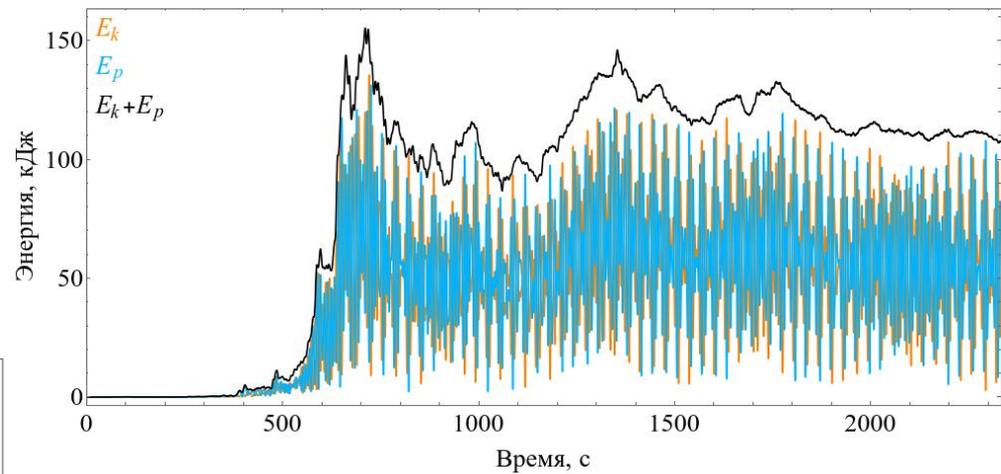


R=500 м, H=20 м, Max($\xi_{\max}-\xi_{\min}$)= 0.438(серкало) / 0.279 (урец) м

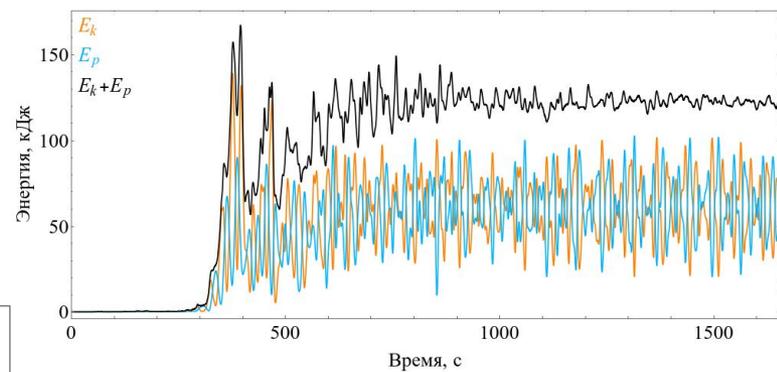
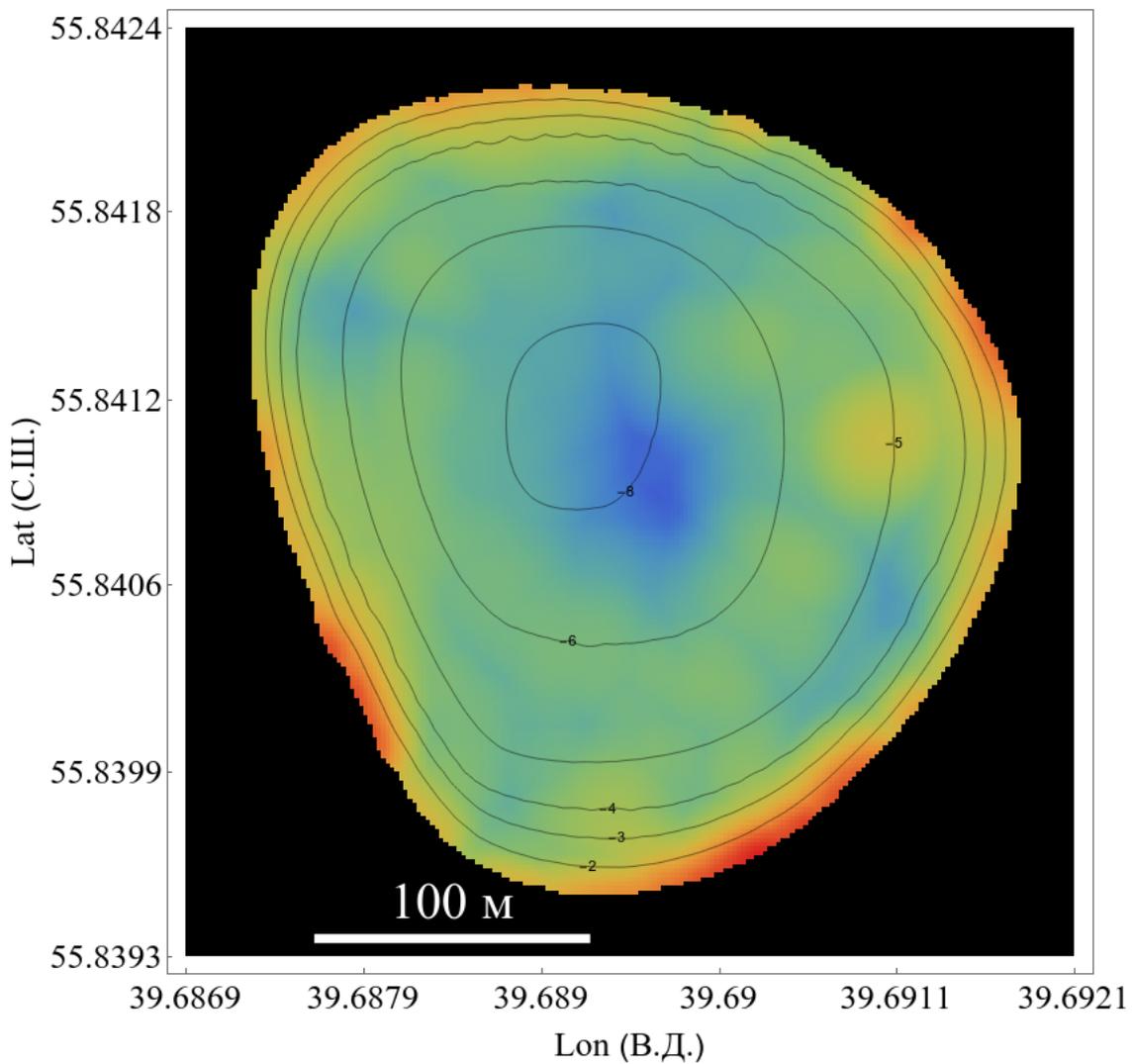


Модовая структура сейшевых колебаний для цилиндрических бассейнов

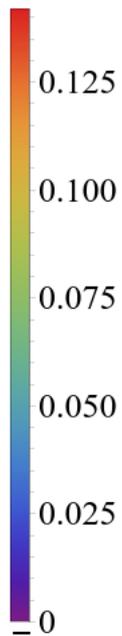
- $J'_s \left(\frac{\omega R}{\sqrt{gH}} \right) = 0, s = 0, 1, 2, 3, \dots$
- $s = 0$ — узловые окружности,
- $s > 0$ — узловые диаметры.
- $T_0 \approx 3.413 \frac{R}{\sqrt{gH}}$ — максимальный собственный период.



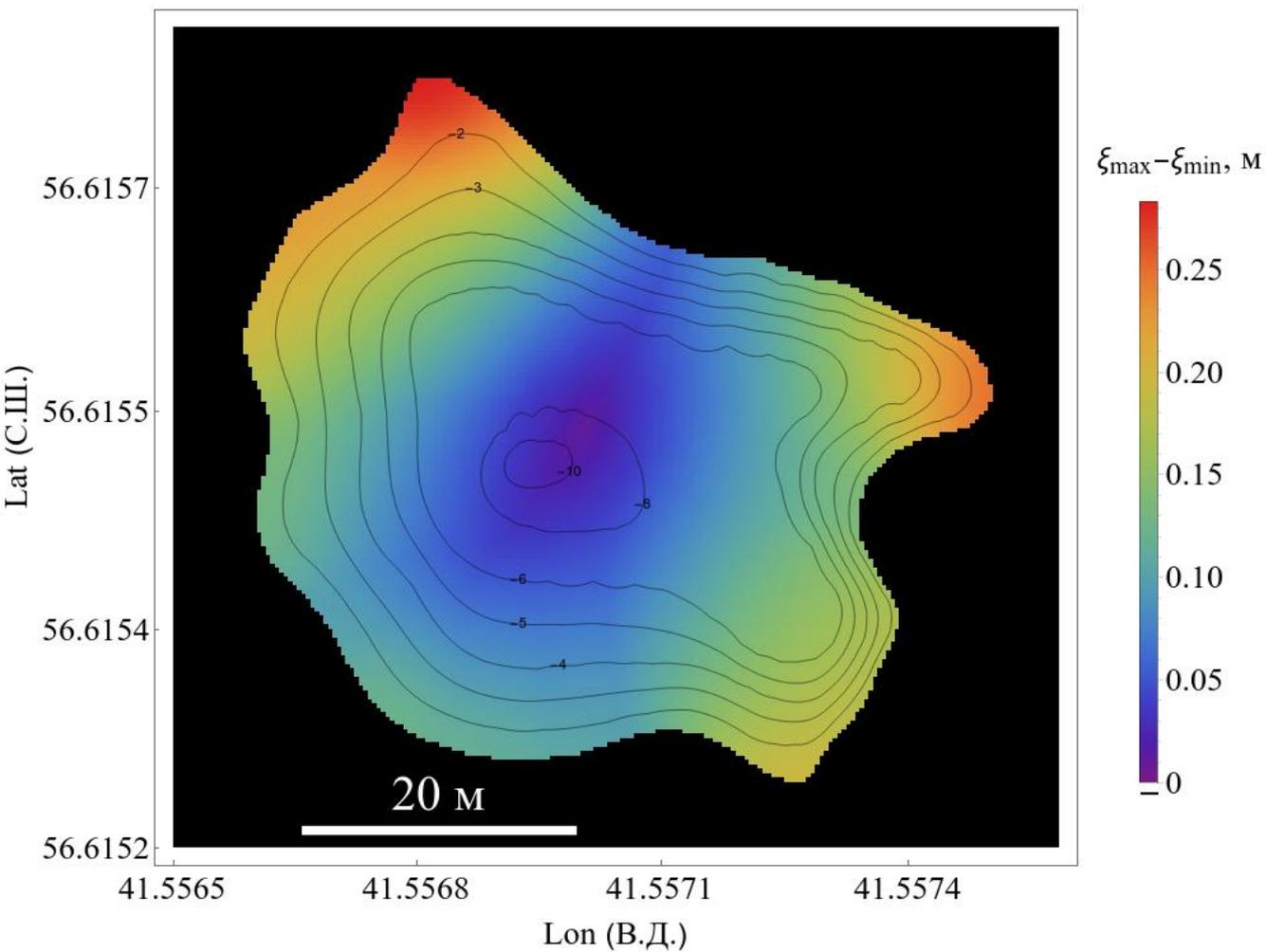
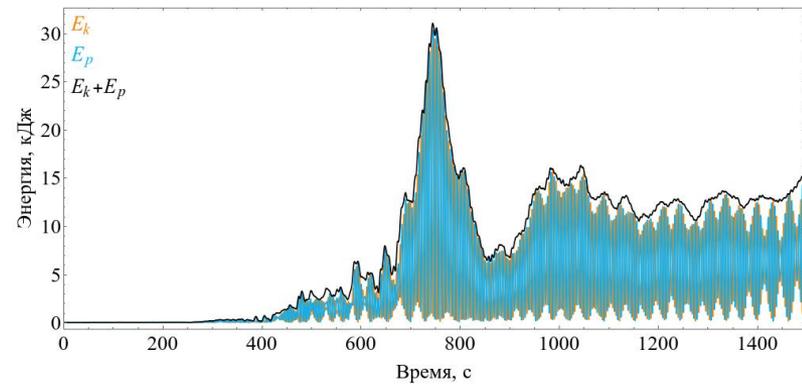
оз. Глубокое $\text{Max}(\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}) = 0.142 \text{ м}$



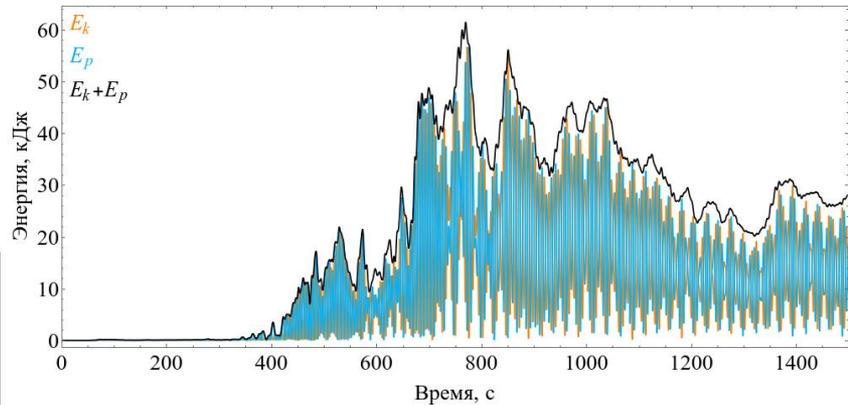
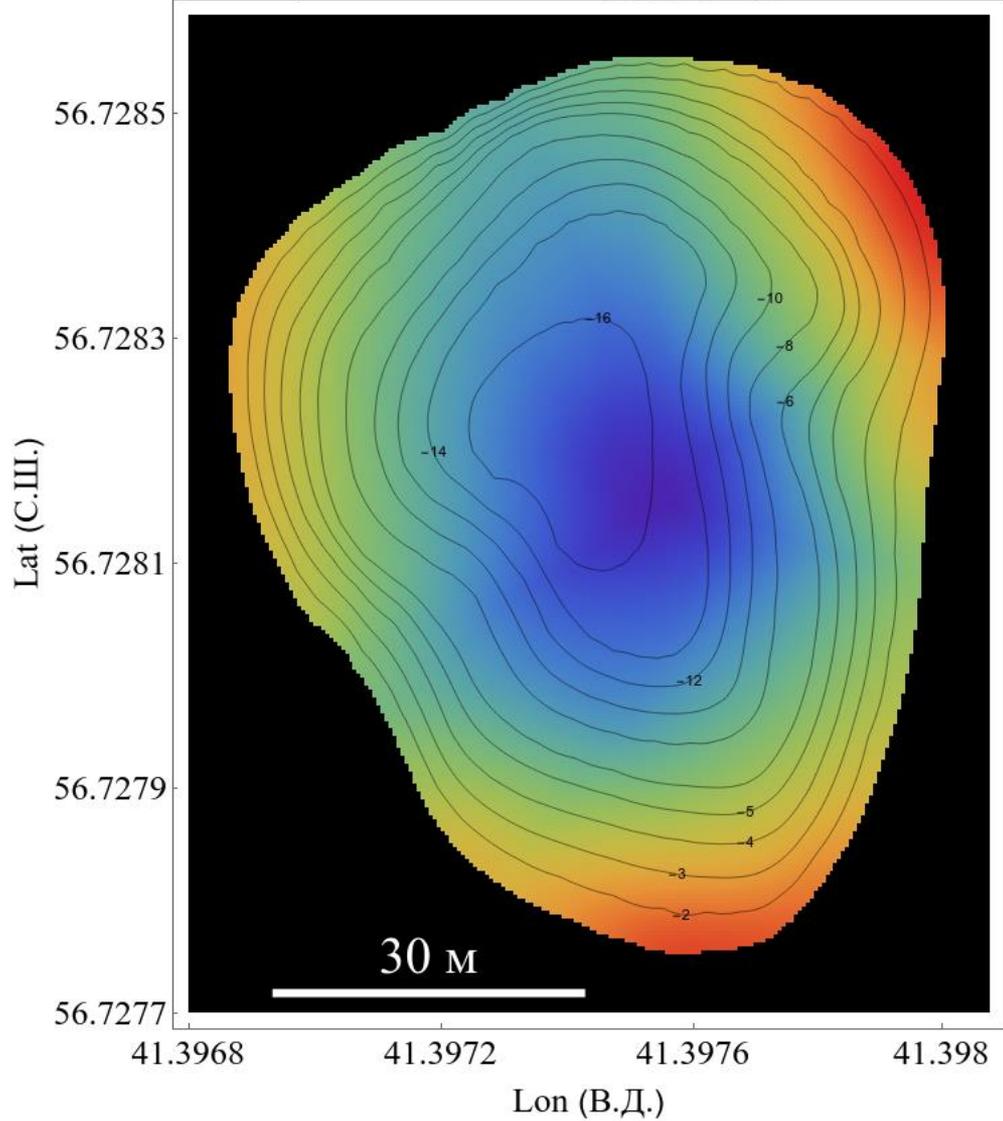
$\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}, \text{ M}$



оз. Колдун $\text{Max}(\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}) = 0.283 \text{ м}$



оз. Первое Русалочье $\text{Max}(\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}) = 0.270 \text{ м}$



$\xi_{\text{max}} - \xi_{\text{min}}, \text{ м}$

