



Метод построения траектории акустического луча от импульсного источника

Закиров М.Н., Куличков С.Н.



Вулкан Хунга-Тонга-Хунга-Хаапай 15 января 2022 года





Цель работы

Создание математической модели построения траектории акустических лучей в неоднородной атмосфере.



Основной глобальной системой мониторинга инфразвуковых волн является Международная система наблюдения (**IMS**).

Помимо IMS, существуют национальные системы.

Россия: ИФА РАН, ФИЦ ЕГС, ИДГ, ИСЗФ, ИМГиГ

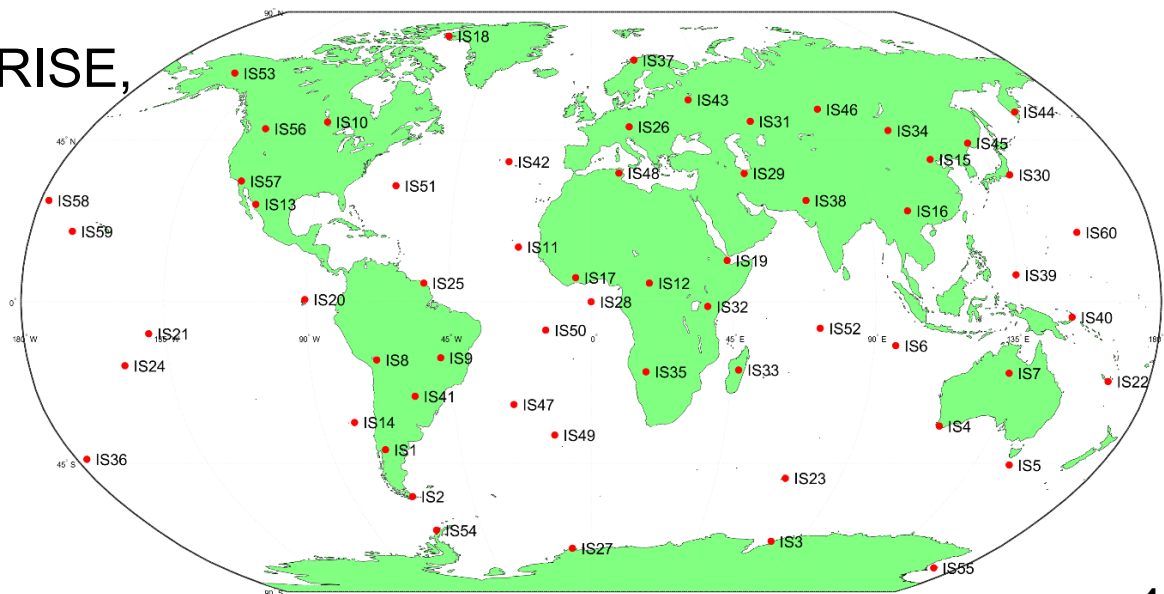
США: USGS (Геологическая служба), USArray, NASA Langley Research Center, Earth System Research Laboratory, Университет Аляски

Европа: NORSAR, ARISE,
Сеть Центральной и
Восточной Европы
(CEEIN)

Китай

Австралия

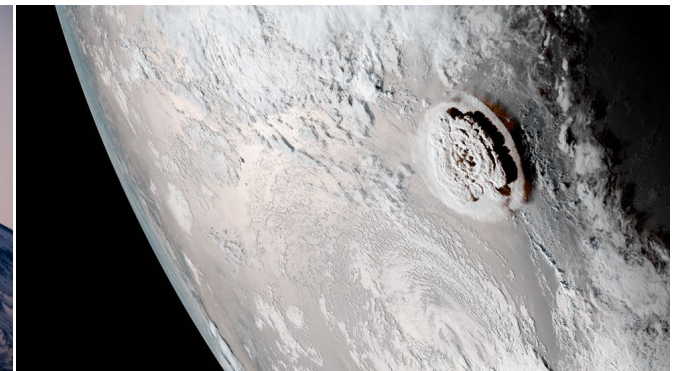
Канада





Источники инфразвука:

- Извержения вулканов
- Взрывы
- Землетрясения
- Микробаромы
- Метеориты
- Техногенная деятельность





Для мониторинга инфразвука в настоящее время применяется несколько подходов:

- F-статистика;
- метод STA/LTA;
- корреляционные методы;
- спектральный анализ;
- метод РМСС;
- поиск характерных особенностей источника;
- комбинированные методы.



Методы решения задачи распространения звука:

- конечных элементов;
- конечных элементов во временной области (FDTD);
- параболического уравнения;
- трассировки лучей (ray tracing).



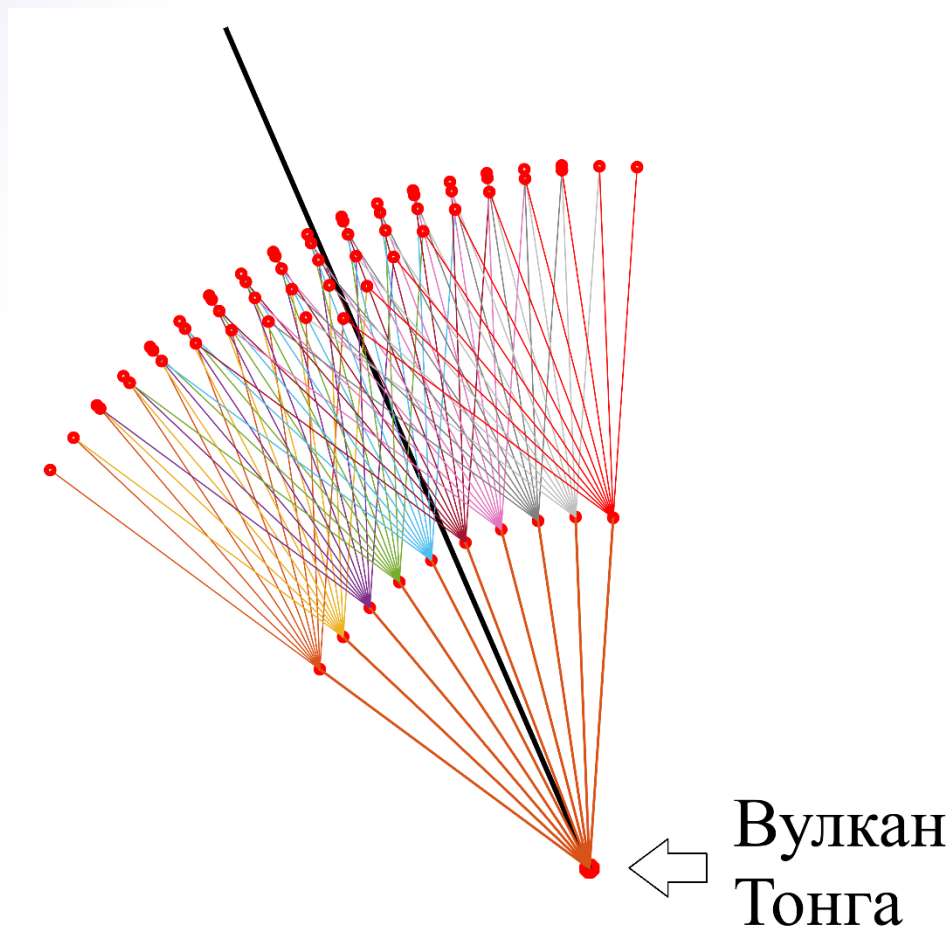
Идея – принцип наименьшего действия

- Траектория луча выбирается так, чтобы минимизировать полное время распространения сигнала.

Алгоритм основан на построении специального графа.



Изображение графа после двух итераций





Формулы

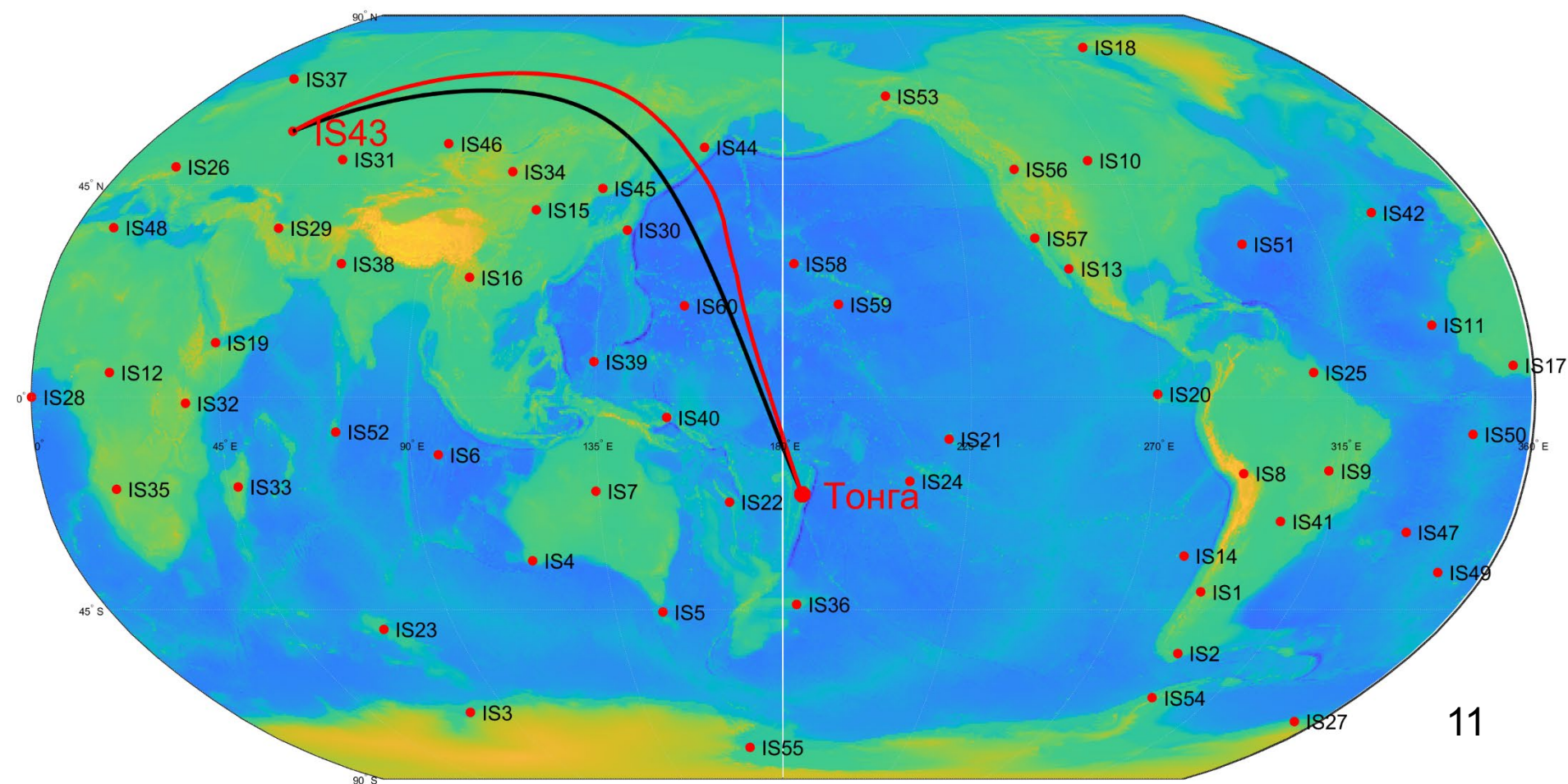
$$\tau = \int_L \frac{|d\mathbf{l}|}{c_{avg.}(\mathbf{l})} \quad \langle f \rangle = \frac{\int_0^{+\infty} \varepsilon(z) f(z) dz}{\int_0^{+\infty} \varepsilon(z) dz}$$

$$c_{avg.} = \sqrt{\frac{1}{\left\langle \frac{1}{c^2} \right\rangle}} \quad \varepsilon(\mathbf{l}, z) = \frac{p_0^{\frac{2}{\gamma}}(\mathbf{l}, z)}{\rho_0(\mathbf{l}, z)}$$

$$c = 20.06\sqrt{T} + V$$

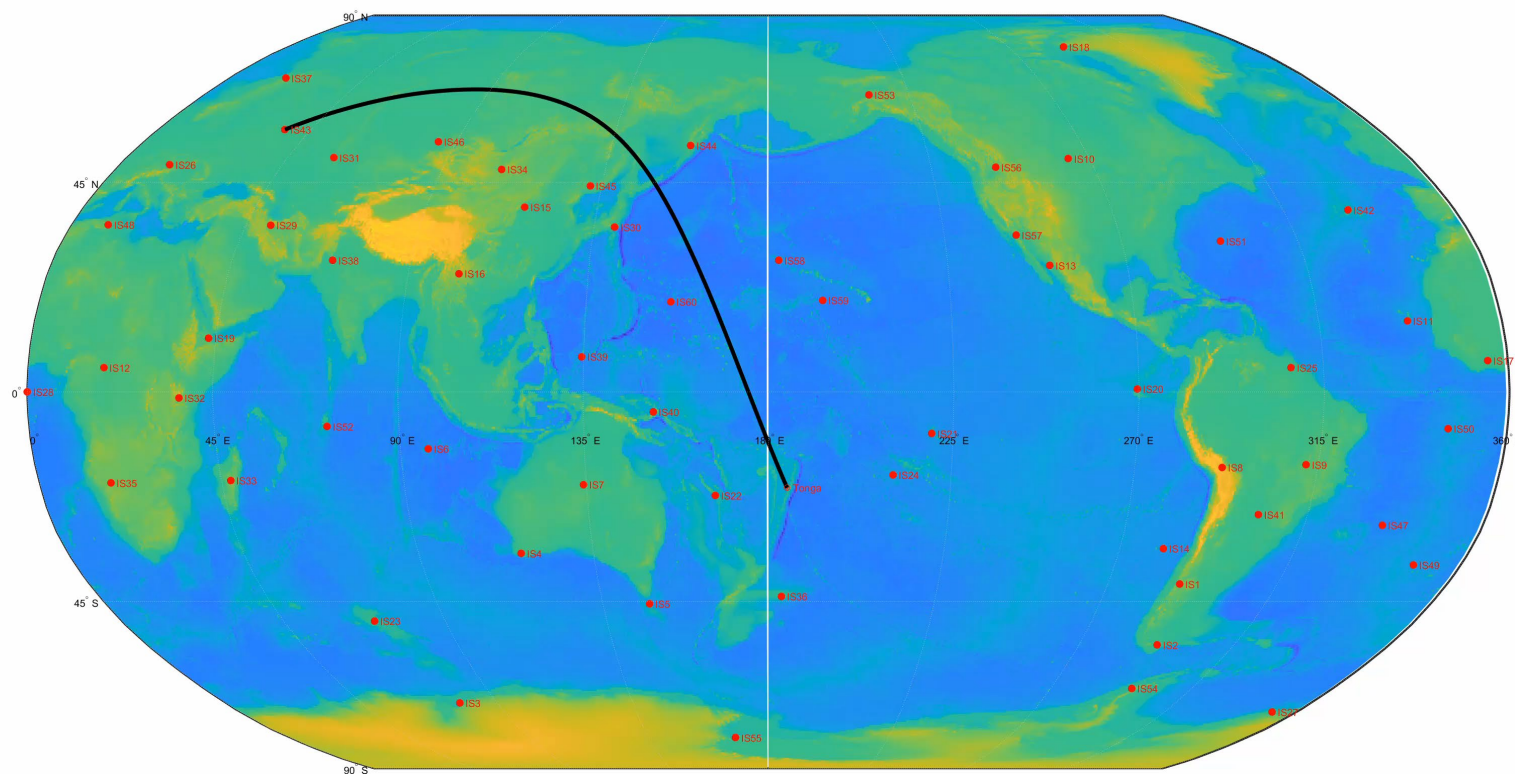


Время от Тонга до IS43: $(4.96 \pm 0.01) \cdot 10^4$ секунд



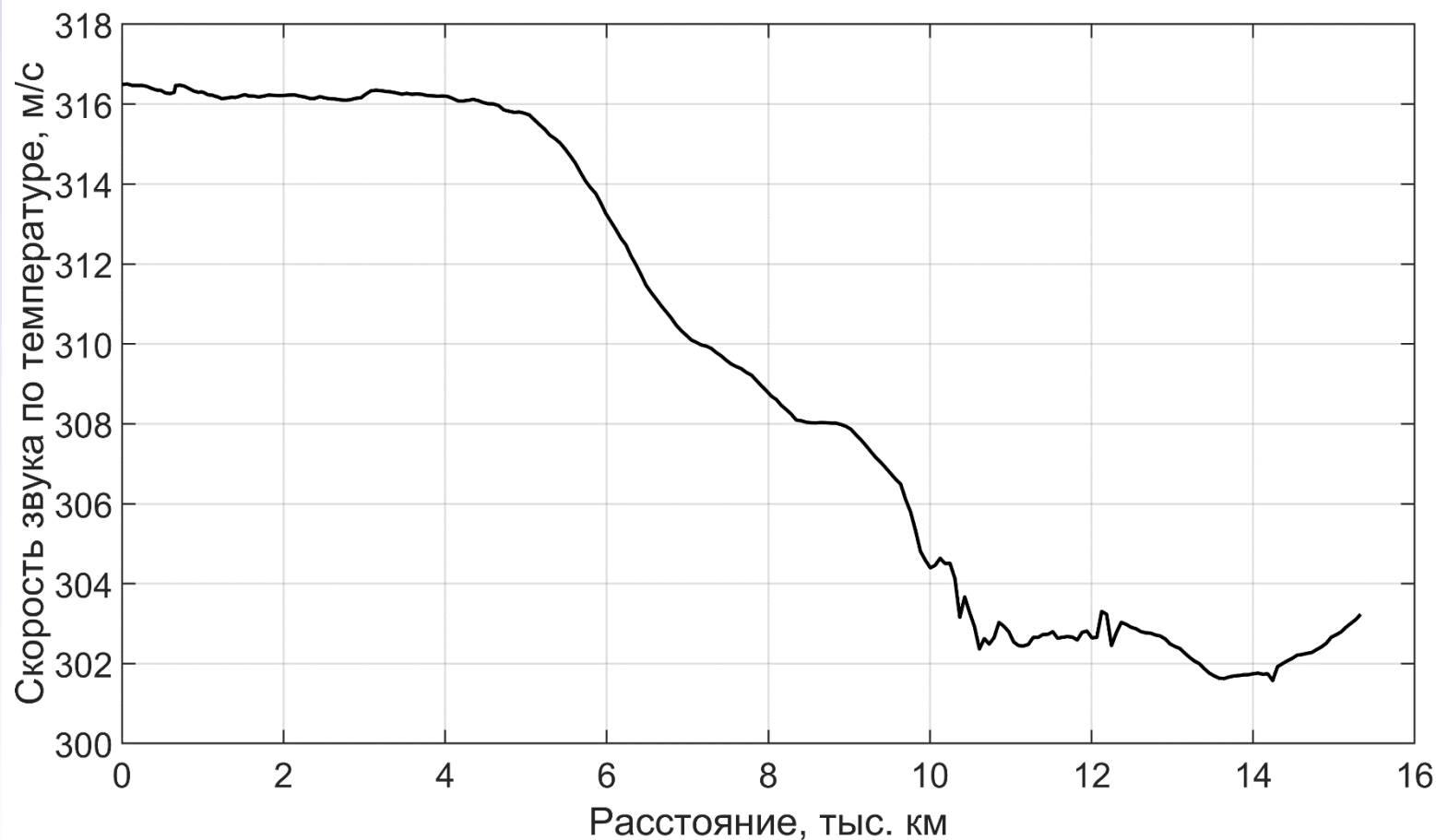


Результат расчета





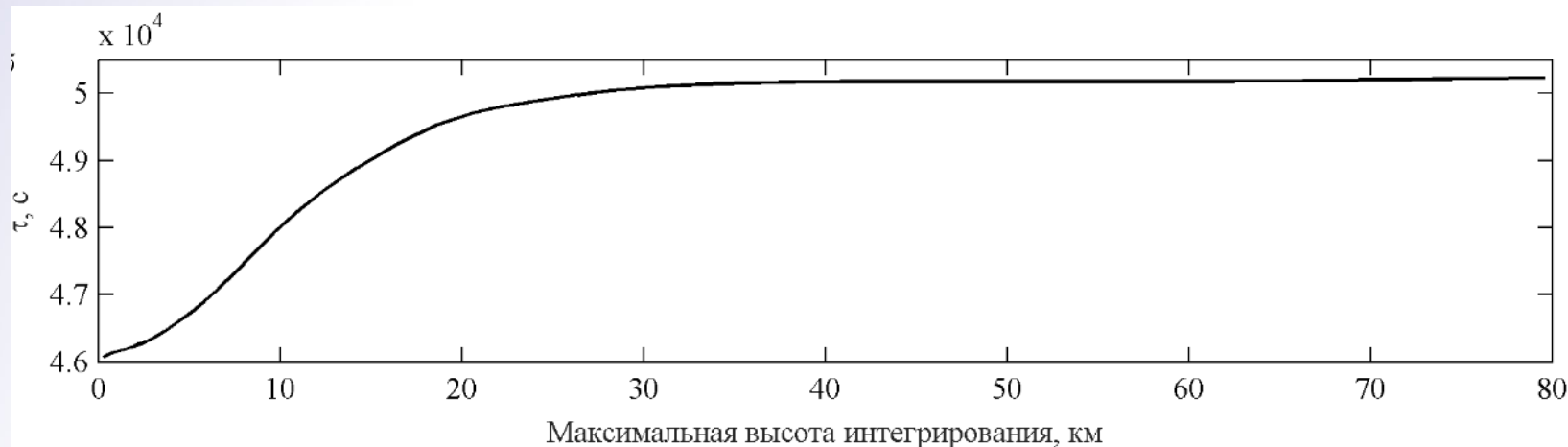
Зависимость скорости звука вдоль трассы

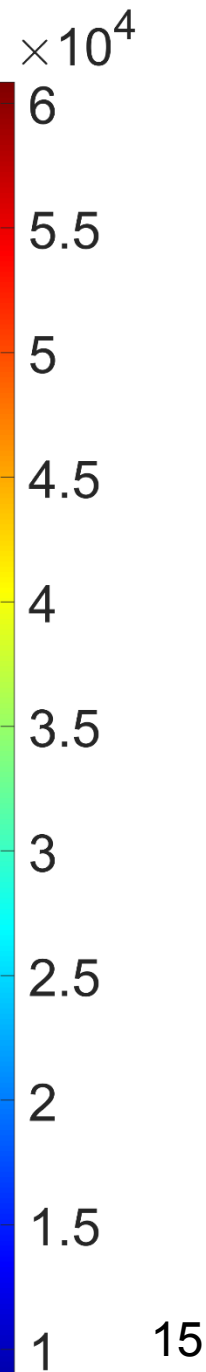
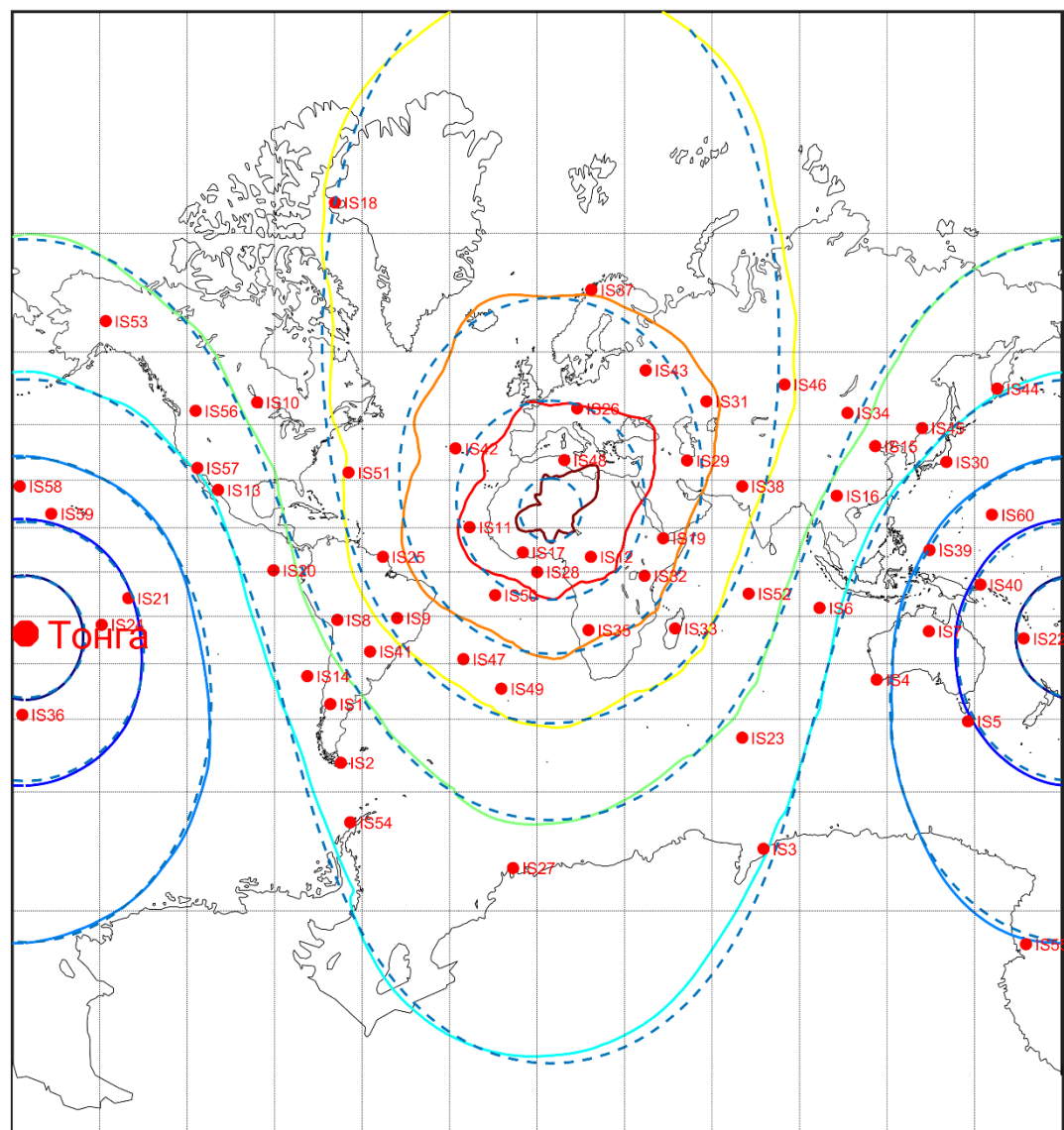




Зависимость времени распространения от высоты интегрирования

$$\langle f \rangle = \frac{\int_0^{+\infty} \varepsilon(z) f(z) dz}{\int_0^{+\infty} \varepsilon(z) dz}$$







Спасибо за внимание!

Работа выполнена при поддержке гранта
РНФ № 25-17-00060

Выводы

- Разработан метод построения траектории акустического луча.
- Представленный метод обеспечивает построение траекторий акустических лучей на значительные расстояния, учитывая параметры атмосферы и рельеф подстилающей.
- Сопоставление результатов моделирования с экспериментальными данными демонстрирует их хорошее согласование.
- Построены графики зависимости скорости звука вдоль трассы распространения.