



XVI Конференция молодых ученых
«Взаимодействие полей и
излучения с веществом»
Иркутск, Россия, 16 – 21 сентября 2019

Применение прямого вариационного метода для расчета характеристик волн различной природы в приближении геометрической оптики

И.А. Носиков¹, **М.В. Клименко**¹, **П.Ф. Бессараб**²

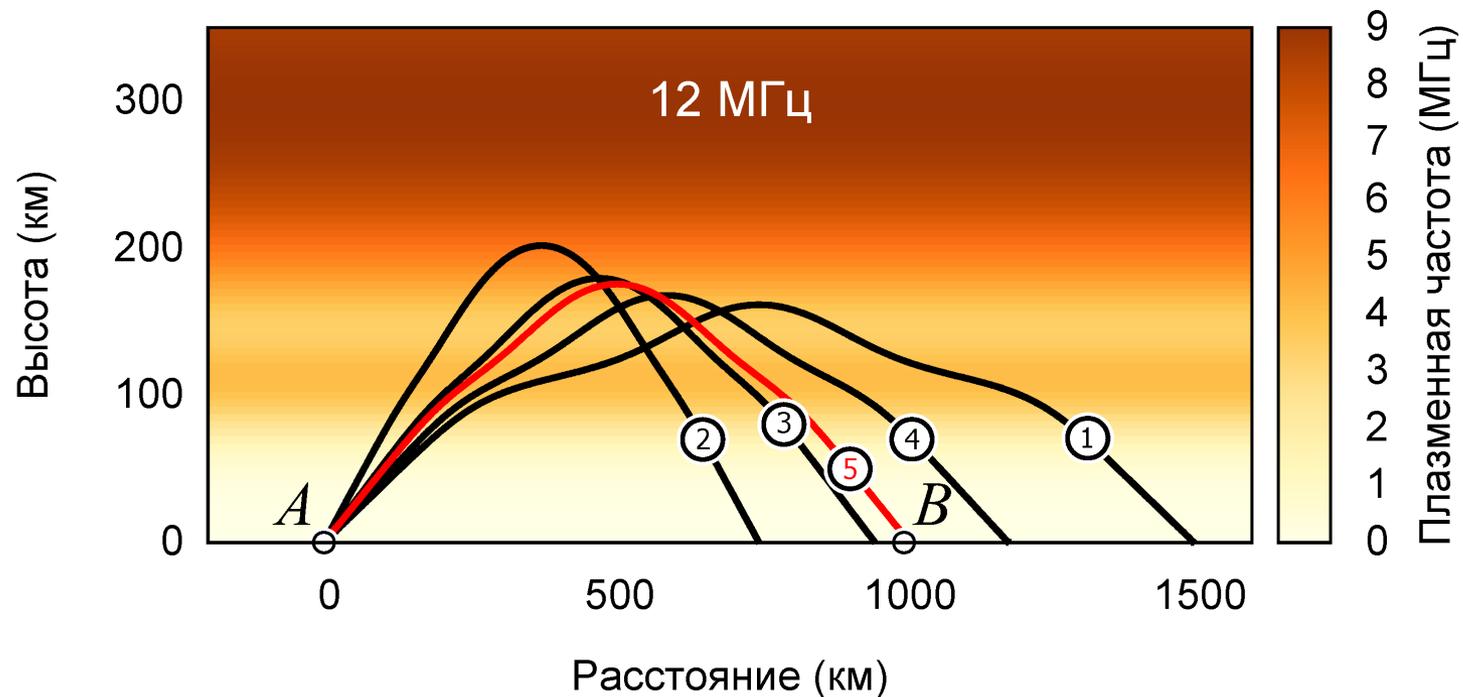
¹ Калининградский филиал ИЗМИРАН, Калининград, Россия

² Научный институт Университета Исландии, Рейкьявик, Исландия

Содержание

1. Мотивация
2. Вариационный подход к граничной задаче
3. Распространение КВ радиоволн
4. Распространение сейсмических волн
5. Распространение океанических волн (волны цунами)
6. Заключение

Граничная задача. Метод “стрельбы”



Вариационный подход. Принцип Ферма

Функционал оптической длины пути:

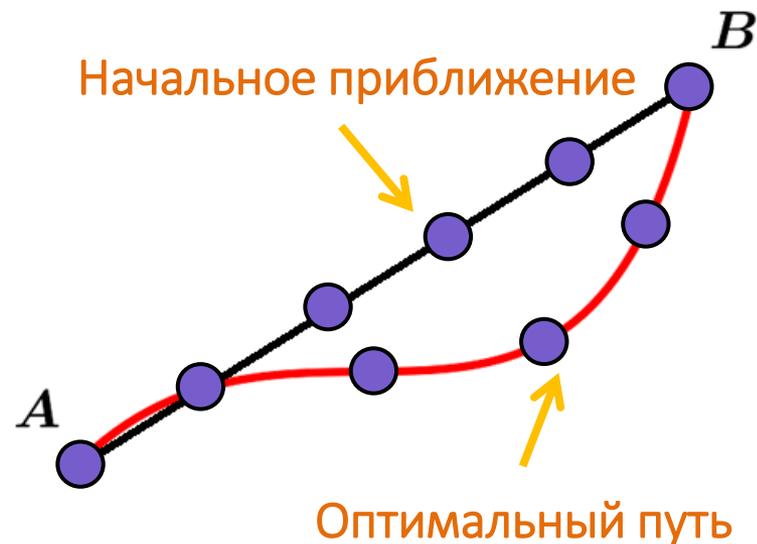
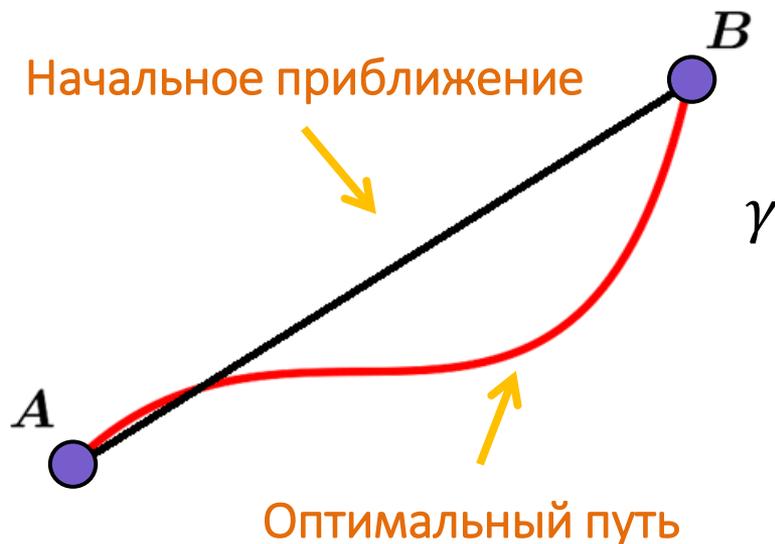
$$S[\gamma] = \int_A^B n(\vec{r}) dl,$$

Принцип Ферма:

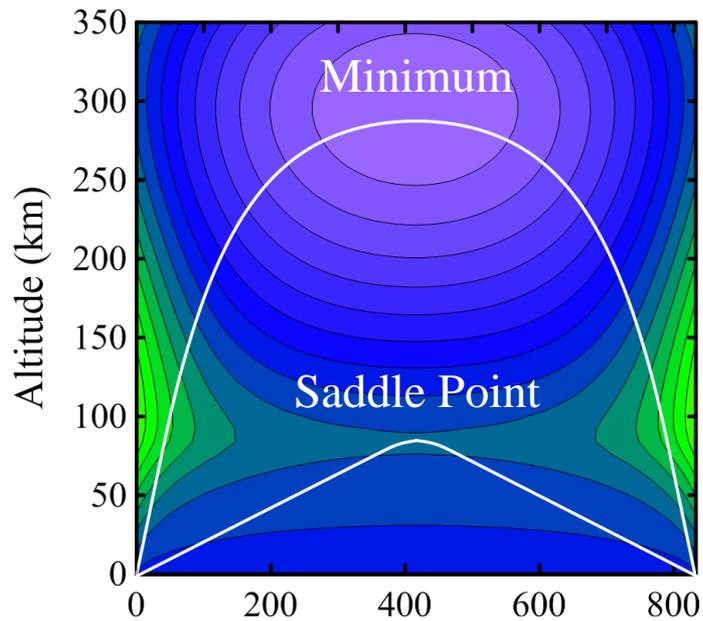
$$\delta S = 0, \quad [1]$$

Применяя метод трапеций для функционала $S[\gamma]$:

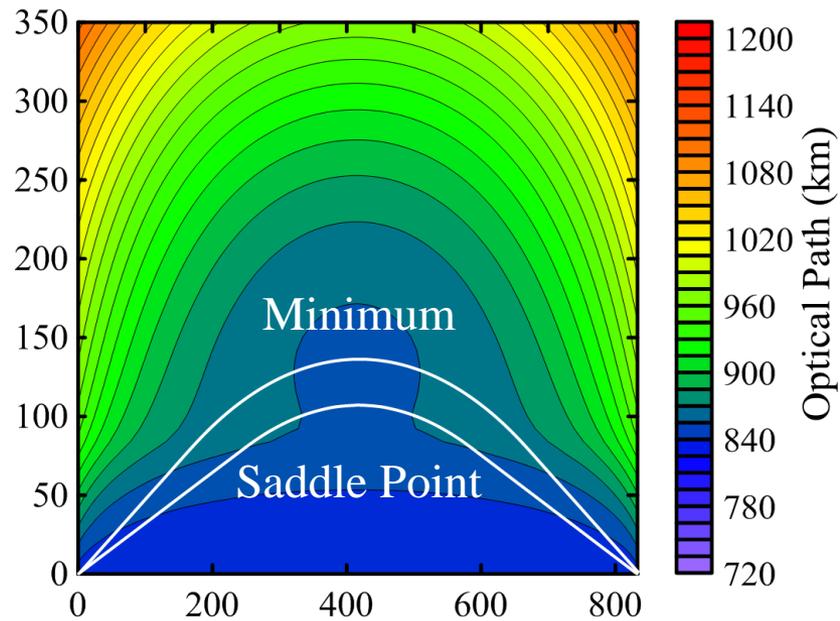
$$S[\gamma] = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N (n(\vec{r}_{i+1}) + n(\vec{r}_i)) |\vec{r}_{i+1} - \vec{r}_i|,$$



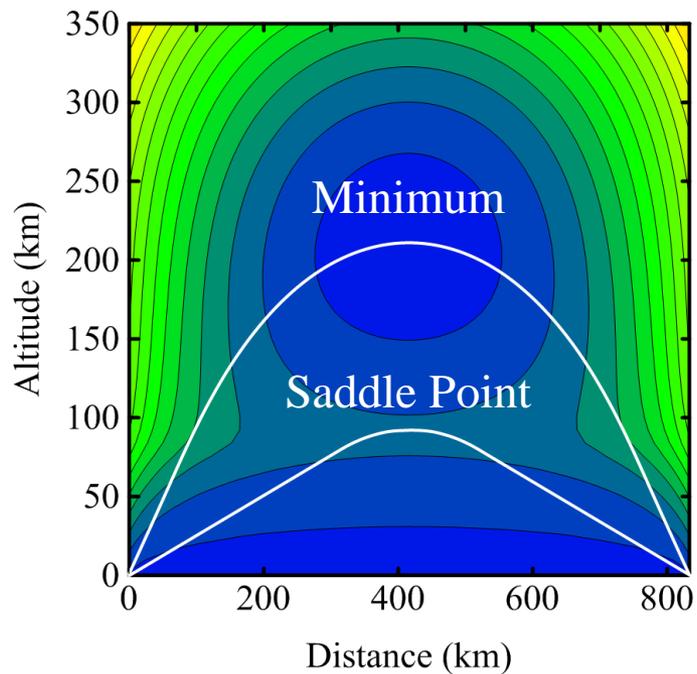
10 MHz



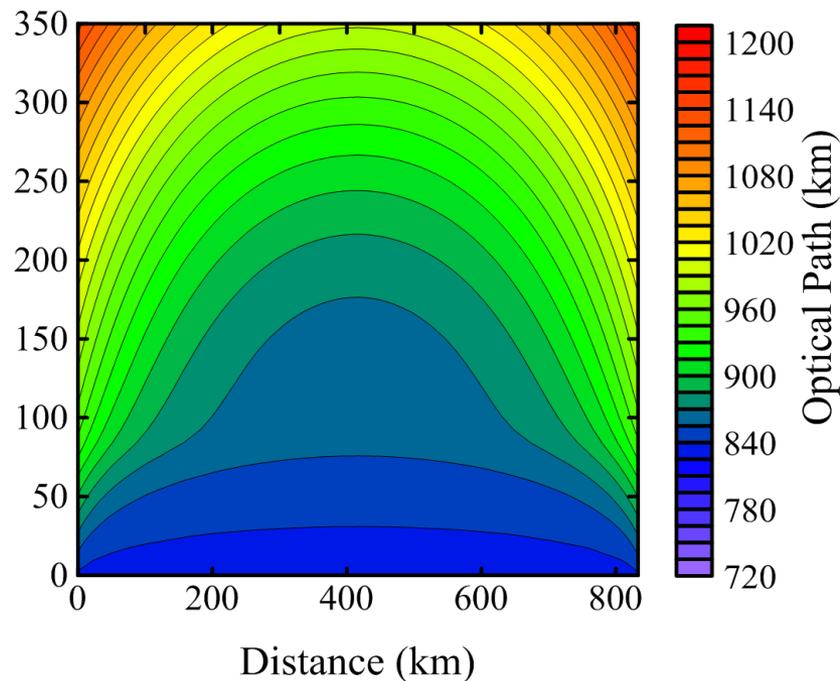
14 MHz



12 MHz



15 MHz



Граничная задача



Лучевые траектории



Минимум / максимум



Прямая
минимизация / максимизация
(Nudged Elastic Band)

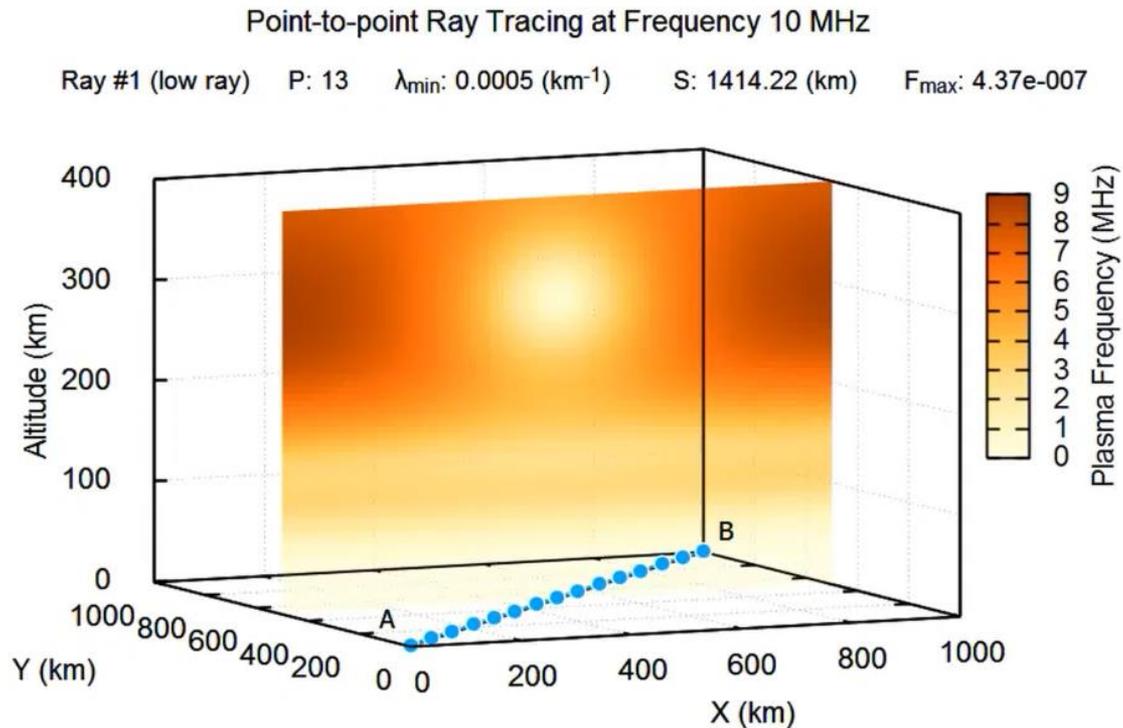


Седловые точки



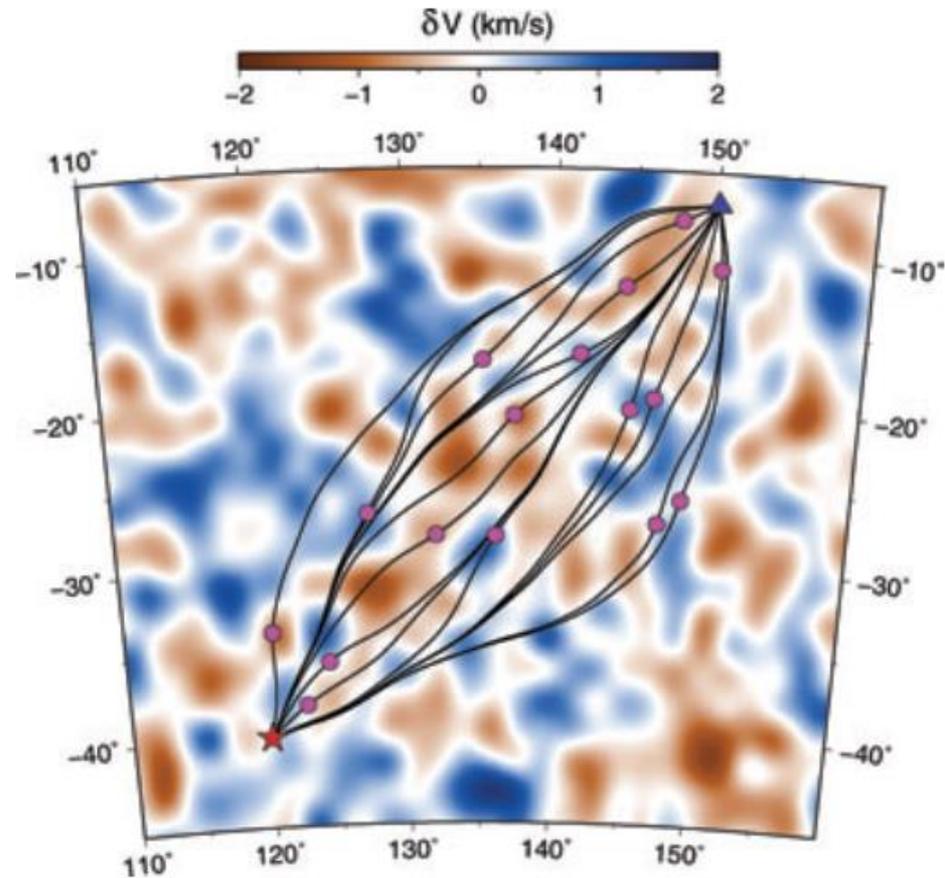
Поиск седловых точек
(Nudged Elastic Band
+
Minimum Mode Following)

Глобальная оптимизация лучей



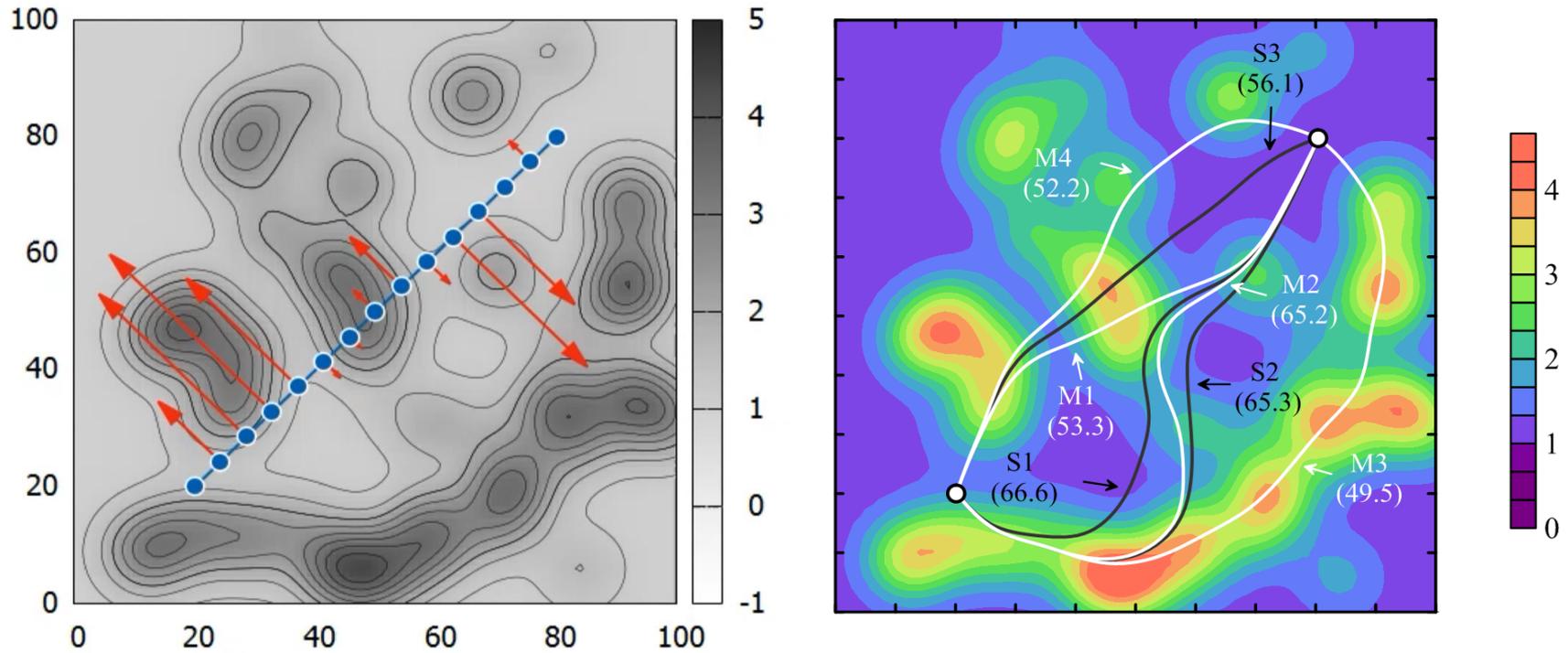
In: I. Nosikov, M. Klimenko, G. Zhbakov, A. Podlesnyi, V. Ivanova and P. F. Bessarab, (2019) "Generalized Force Approach to Point-to-Point Ionospheric Ray Tracing and Systematic Identification of High and Low Rays," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation. doi: 10.1109/TAP.2019.2938817

Лучевые траектории сейсмических волн

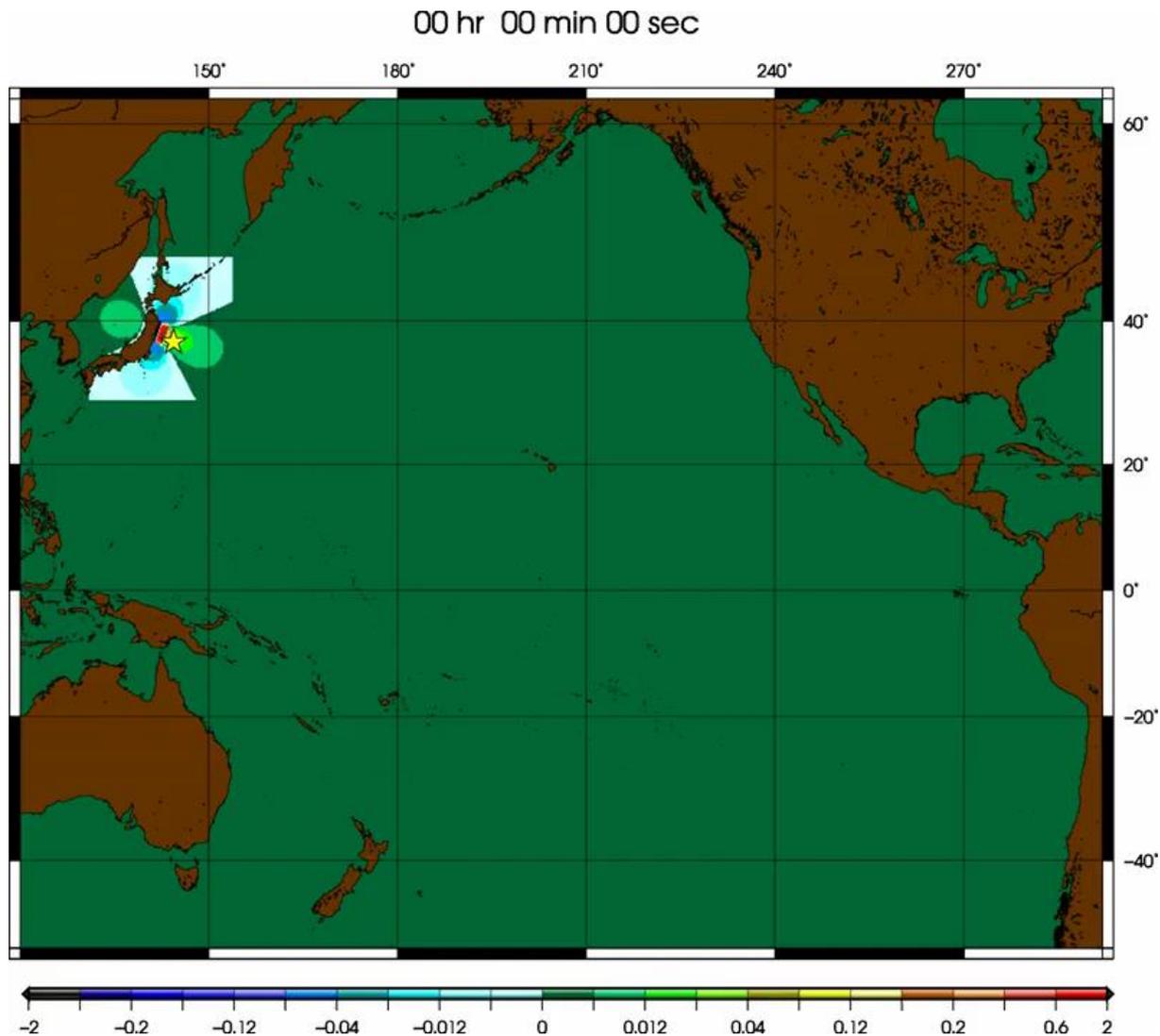


In: N. Rawlinson, M. Sambridge and J. Hauser, Multipathing, reciprocal traveltimes fields and raylets (2010), *Geophys. J. Int.*(2010)181,1077-1092

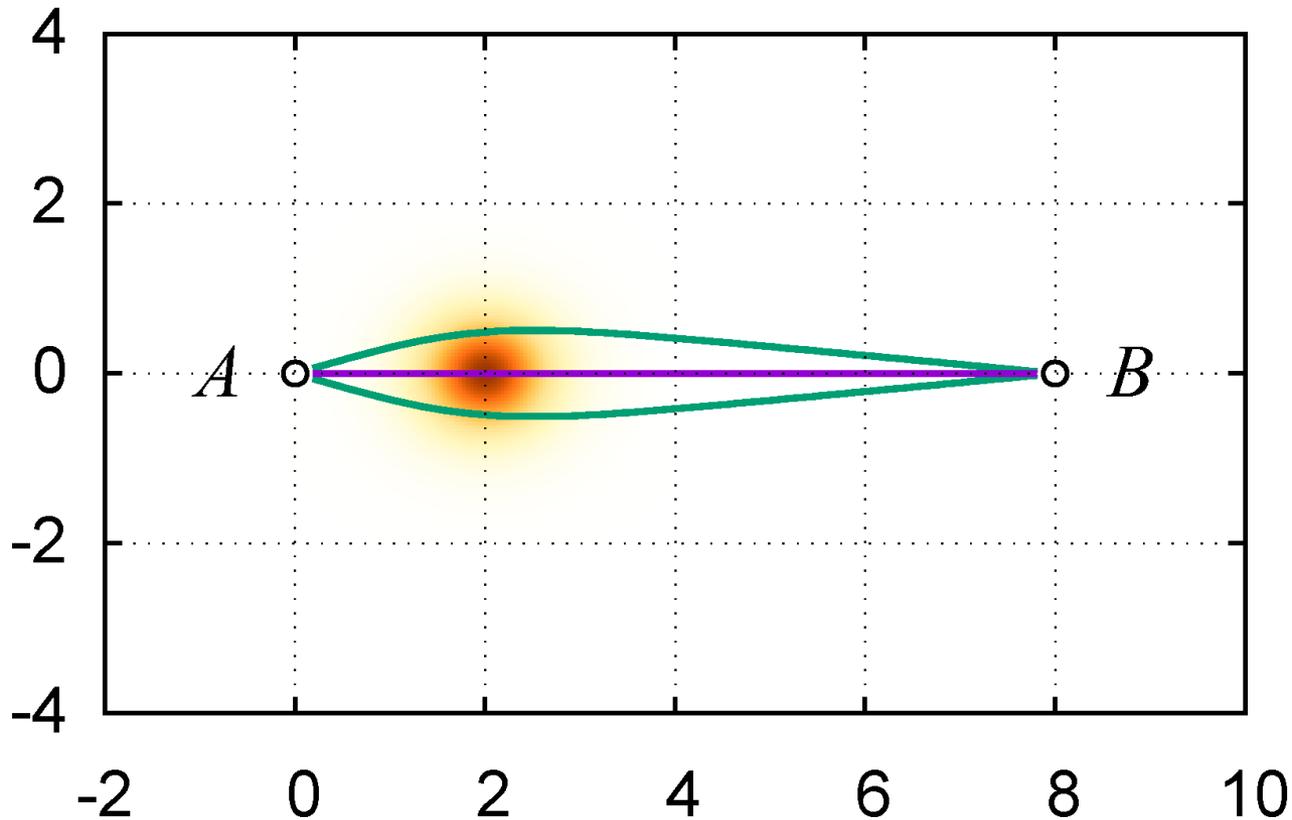
Лучевые траектории сейсмических волн



Лучи и фронты волн цунами



Лучи и фронты волн цунами. Модель подводной горы



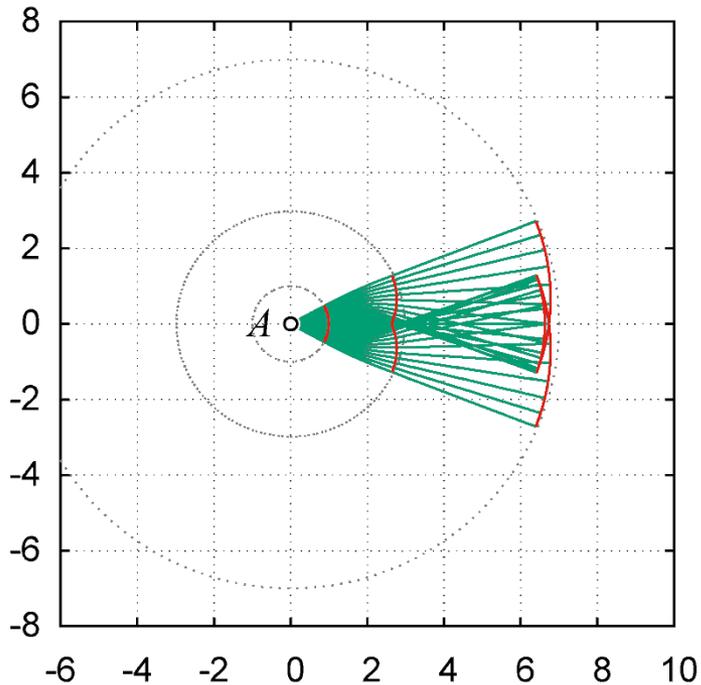
*Типы лучей
на рисунке:*

- минимум

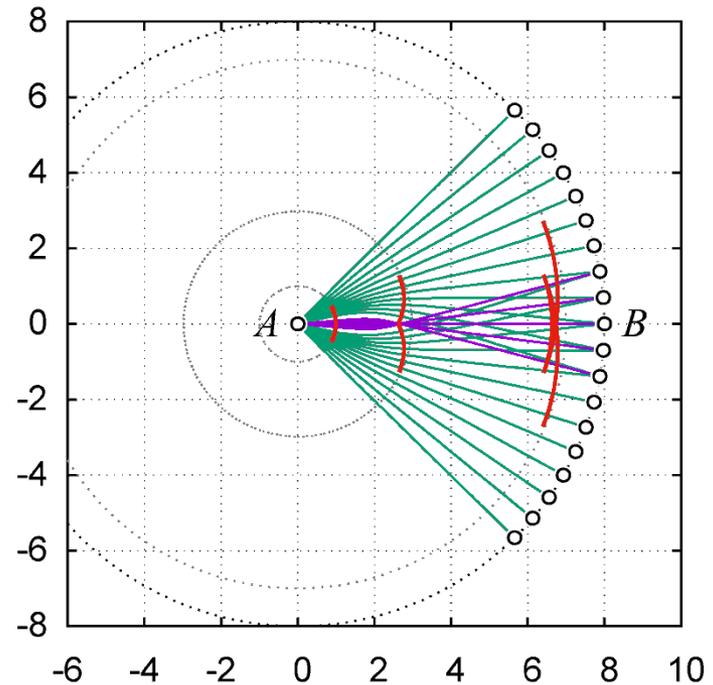
- седло 1-го порядка

Лучи и фронты волн цунами. Модель подводной горы

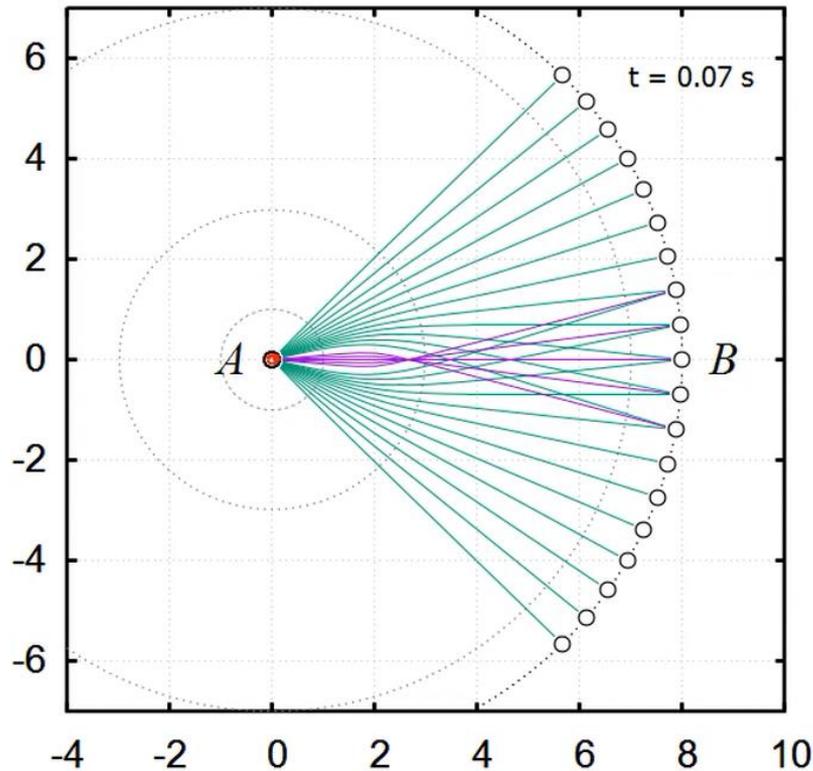
*Метод бихарактеристик
(А.А. Толченников)*



Вариационный метод



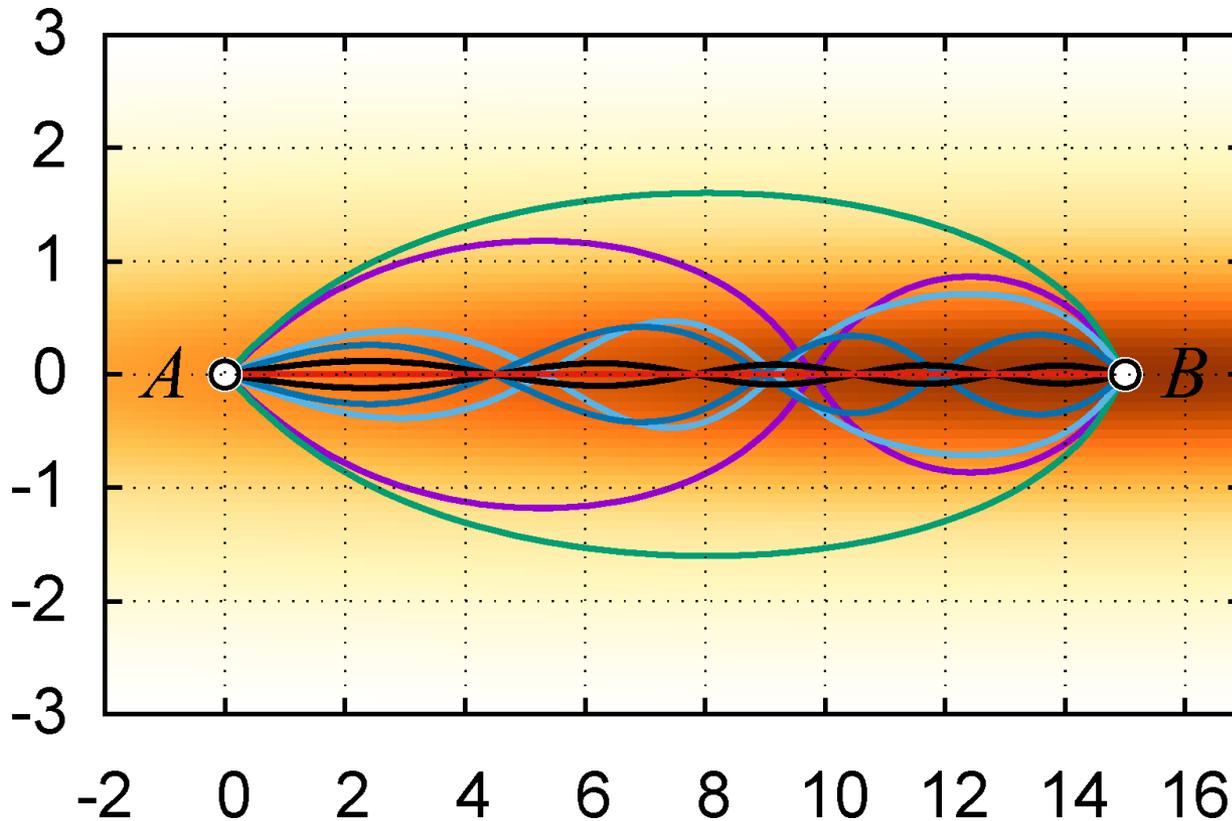
Лучи и фронты волн цунами. Модель подводной горы



Обозначения:

- минимум*
- седло 1-го порядка*
- фронт*

Лучи и фронты волн цунами. Модель подводного хребта

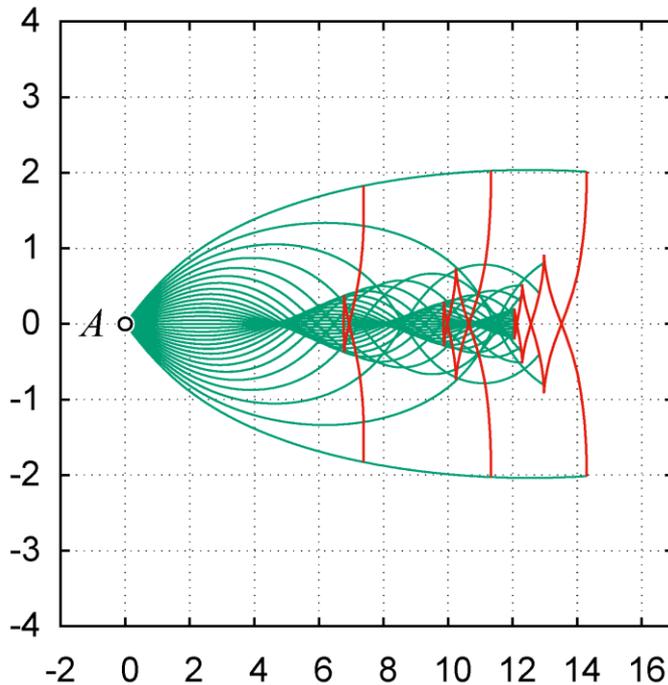


Типы лучей
на рисунке:

- минимум
- седло 1-го порядка
- седло 2-го порядка
- седло 3-го порядка
- седло 4-го порядка
- максимум

Лучи и фронты волн цунами. Модель подводного хребта

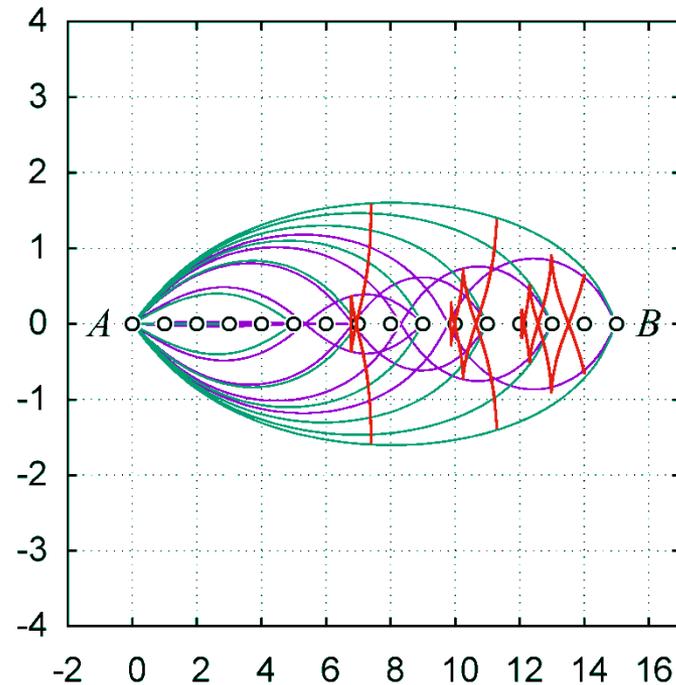
*Метод бихарактеристик
(А.А. Толченников)*



Обозначения:

- все лучи
- фронт

Вариационный метод

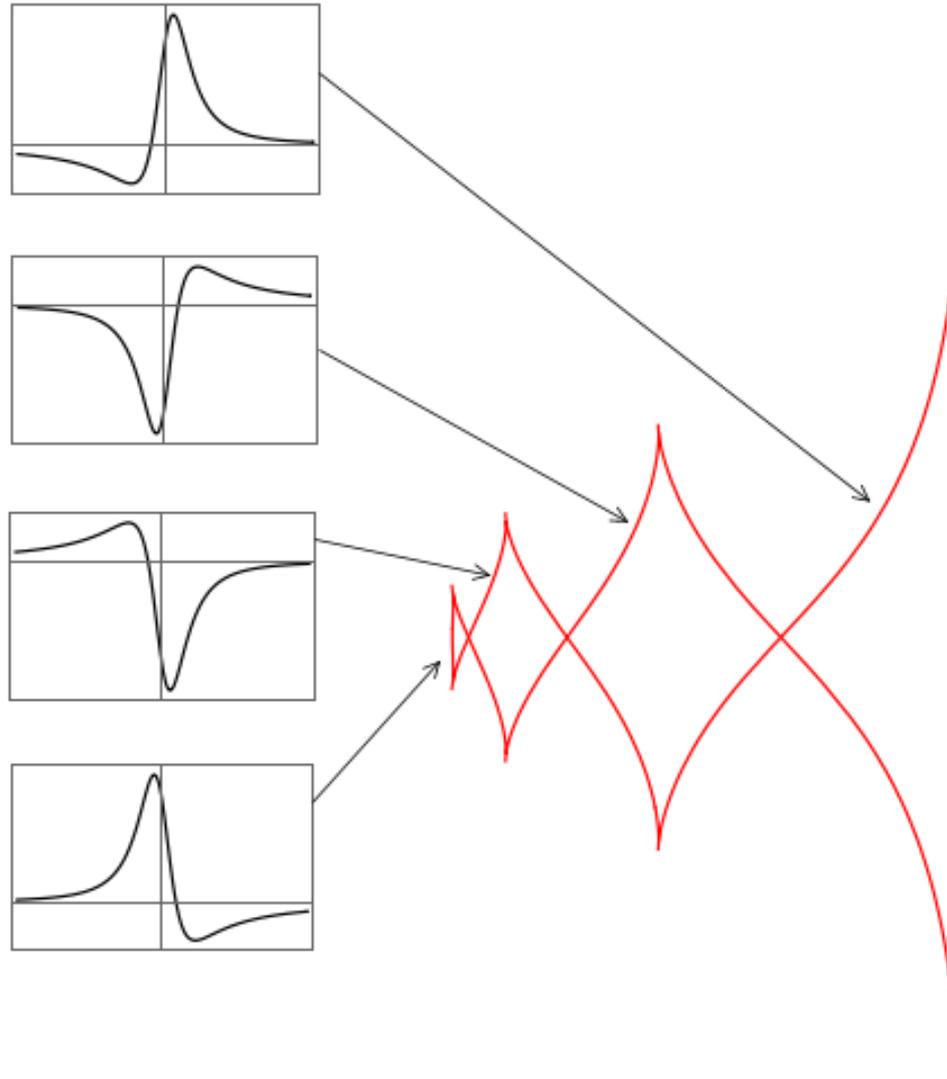


Обозначения:

- минимум
- седло 1-го порядка
- фронт

Профили волн цунами. Модель подводной горы

*Профили волны
цунами*



Заключение

- Создан **новый метод** решения граничной задачи на основе вариационного принципа Ферма.
- Вариационный подход позволяет находить как **верхние, так и нижние** ионосферные лучи. Апробация метода выполнена как в аналитических средах, так и модели IRI.
- На основе вариационного метода реализована **глобальная оптимизация** – алгоритм систематического поиска всех лучей.
- **Решена проблема задания начальных приближений луча.** Инициализация поиска осуществляется на прямой линии, соединяющей граничные точки. В процессе глобальной оптимизации каждое найденное решение является начальным приближением для последующего решения.

Спасибо за внимание!

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта
Президента РФ для молодых ученых (МК-2584.2019.5)