Симпозиум «ПРОГНОЗ-2023»
Физические основы прогнозирования
гелиогеофизических процессов и событий
г. Москва, г. Троицк
31 мая 2023 г.

ВОЗМОЖНОСТИ РАЗВИТИЯ ЛУЧЕВЫХ МЕТОДОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ КВ РАДИОТРАСС В ЗАДАЧЕ ПРОГНОЗА ИОНОСФЕРНОЙ РАДИОСВЯЗИ

Носиков И. А.[1,2] , Падохин А. М.[2,3], Клименко М. В.[1],
Крашенинников И. В.[3], Бессараб П. Ф.[4,5]

[1] Калининградский филиал Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Калининград, Россия

[2] Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, г. Москва, Россия

[3] Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

[4] Университет Линней, г. Кальмар, Швеция

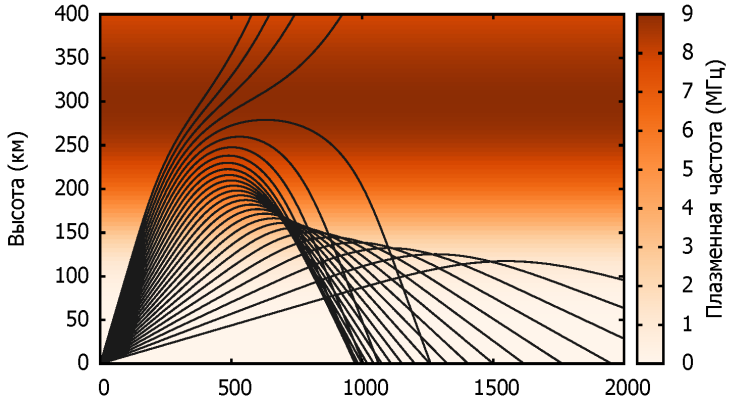
[5] Университет Исландии, г. Рейкьявик, Исландия

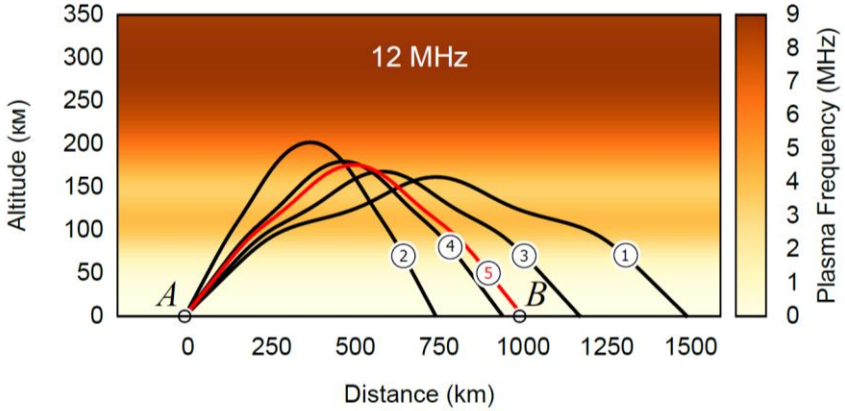
Содержание

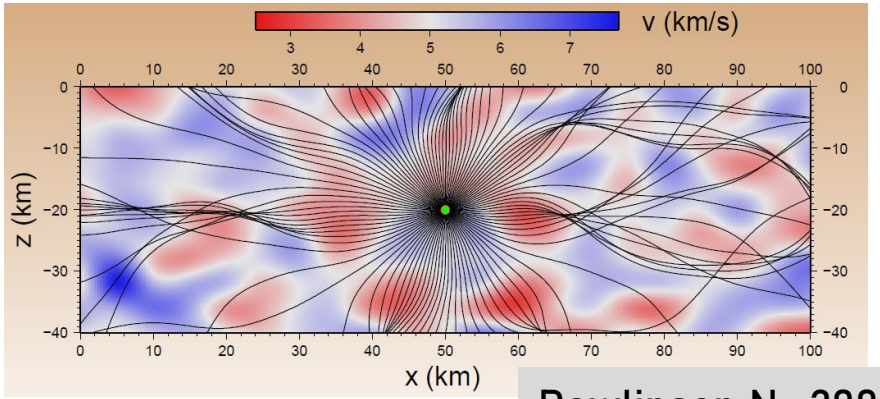
1. Система «Прогноз-ИЗМИРАН».
2. Инструменты моделирования:
   a. Пристрелка на основе глобальной оптимизации.
   b. Прямой вариационный метод.
4. Результаты моделирования в области минимальных частот.
5. Современные возможности методов.
6. Заключение.

Метод характеристик. Пристрелка

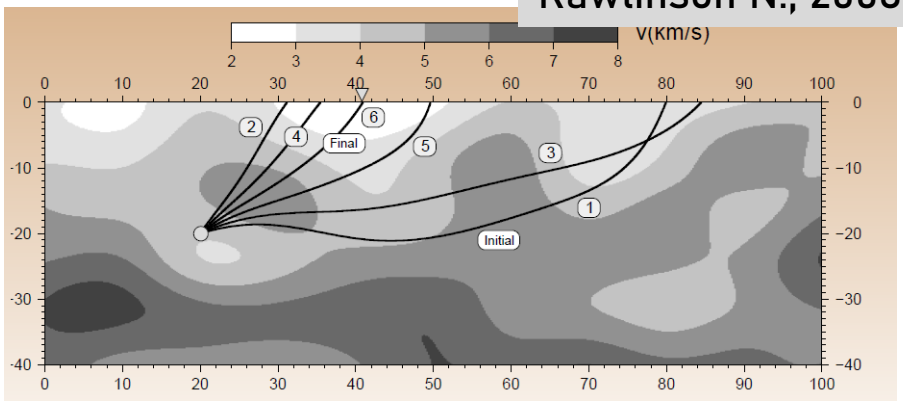
Наиболее распространенным подходом является численное решение системы лучевых уравнений для задачи Коши (метод бихарактеристик), дополненное алгоритмом пристрелки для решения краевой задачи.



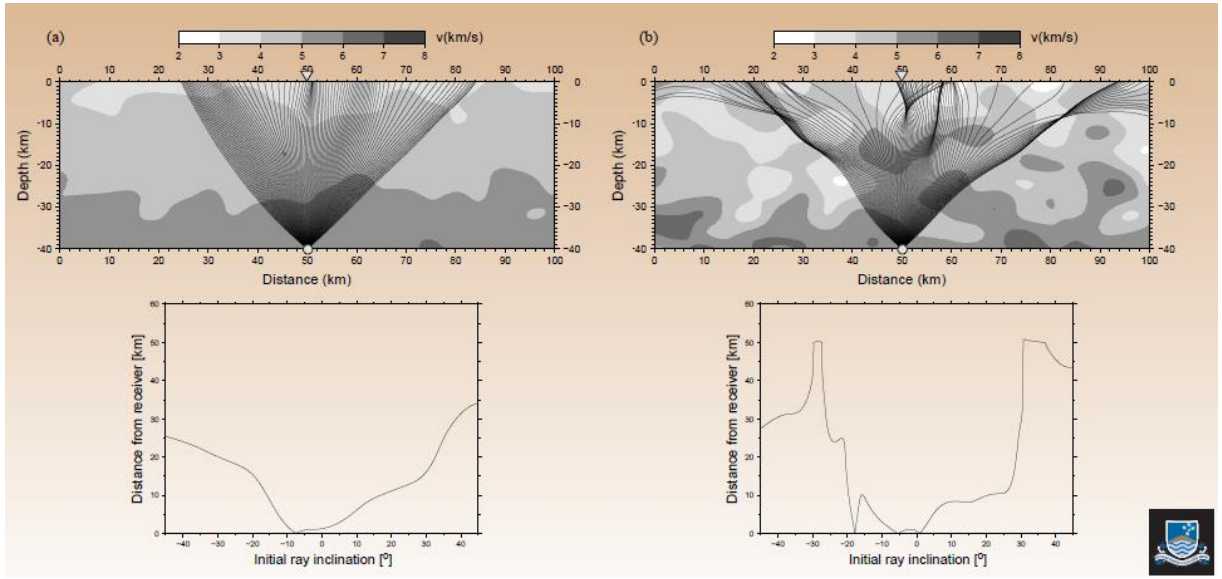




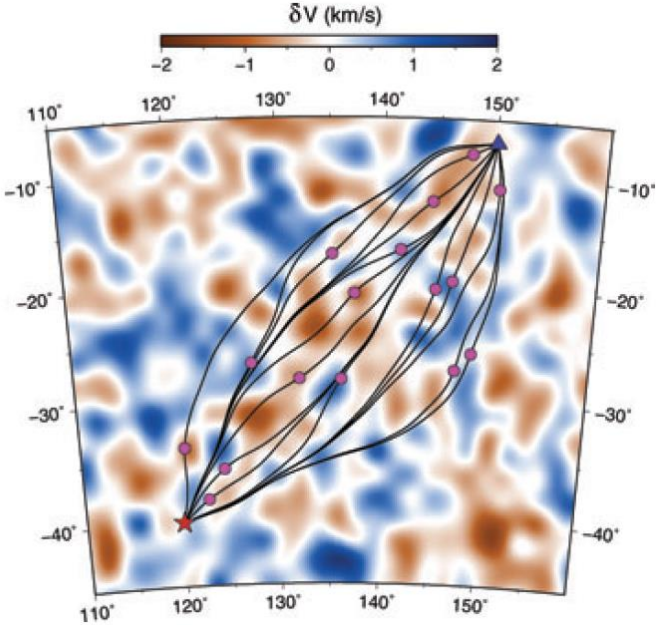
Rawlinson N., 2008



Особенности краевой задачи



Rawlinson N., 2008

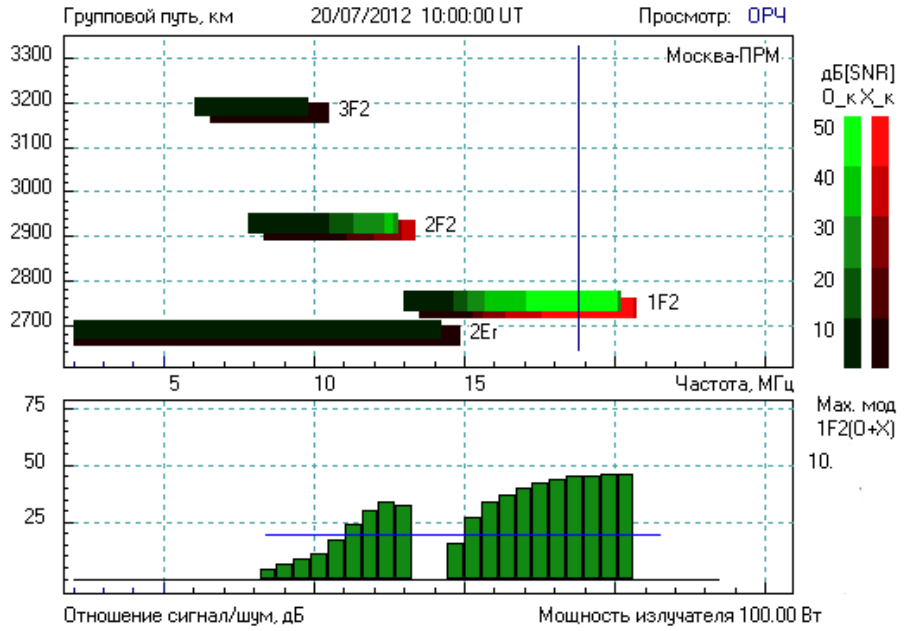


Rawlinson N., Sambridge M., Hauser J. //Geophysical Journal International. – 2010. – Т. 181. – №. 2. – С. 1077-1092.

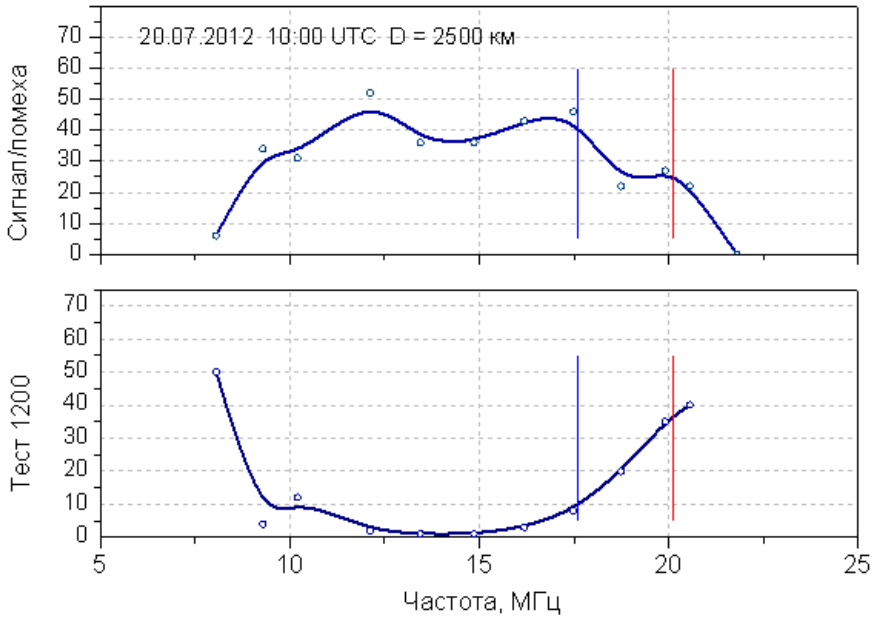
Система “Прогноз-ИЗМИРАН”

Ионосфера: модель GDMI

20 июля 2012 г. 10 UT

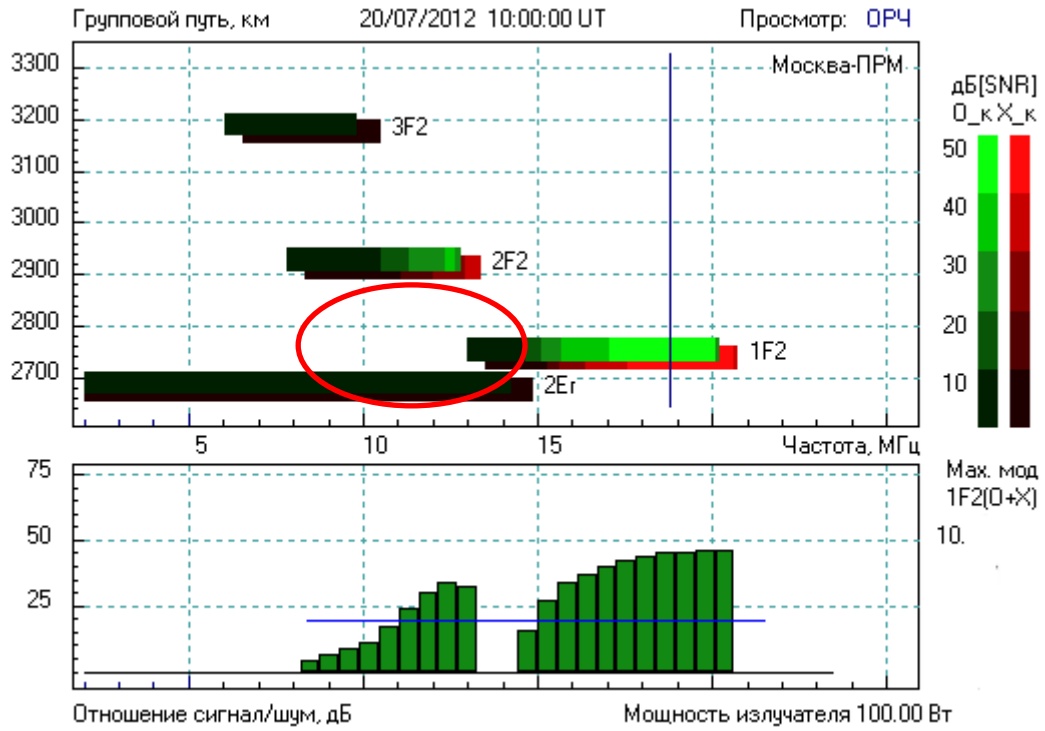


Эксперимент



Мотивация

Решение задачи о расчете всех лучевых траекторий области минимальных частот.



И. А. Носиков, А. М. Падохин, И. В. Крашенинников, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб. Особенности расчёта минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.

Содержание

1. Система «Прогноз-ИЗМИРАН».
2. Инструменты моделирования:
   a. Пристрелка на основе глобальной оптимизации.
   b. Прямой вариационный метод.
4. Результаты моделирования в области минимальных частот.
5. Современные возможности методов.
6. Заключение.

2а. Пристрелка на основе глобальной оптимизации

В работе [1] предложен метод пристрелки на основе алгоритма глобальной оптимизации:

$$min\ \|\boldsymbol{r}(\beta_0, f) - \boldsymbol{r}_{rec}\|^2$$

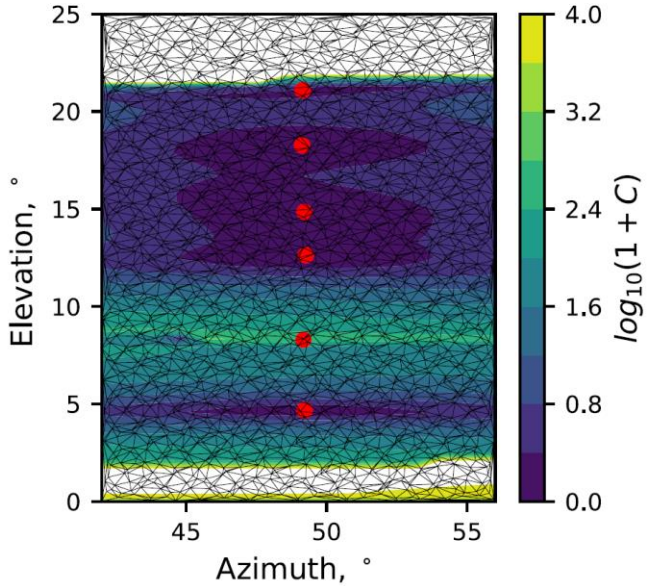
Особенности подхода:

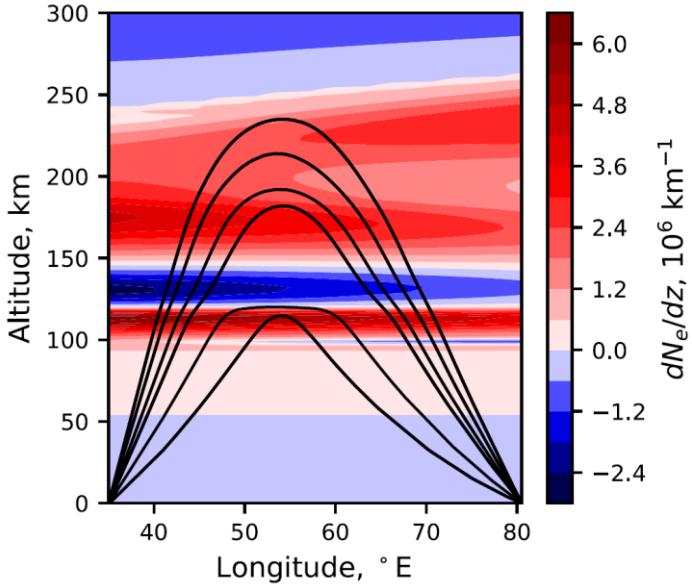
1. Алгоритм не требует расчет производной функции.
2. Определяет все локальные минимумы.

[1] Padokhin, A. M., et al., (2019). Modeling the HF ray trajectories and vertical and oblique ionograms in the artificially disturbed ionosphere based on radiotomographic data. Mosc. Univ. Phys. Bull, 74(3), 282-290.

2а. Пристрелка на основе глобальной оптимизации

Целевая функция и лучевые траектории
для частоты 10.48 MHz





Padokhin, A. M., et al., (2019). Modeling the HF ray trajectories and vertical and oblique ionograms in the artificially disturbed ionosphere based on radiotomographic data. Mosc. Univ. Phys. Bull, 74(3), 282-290.

2б. Прямой вариационный метод

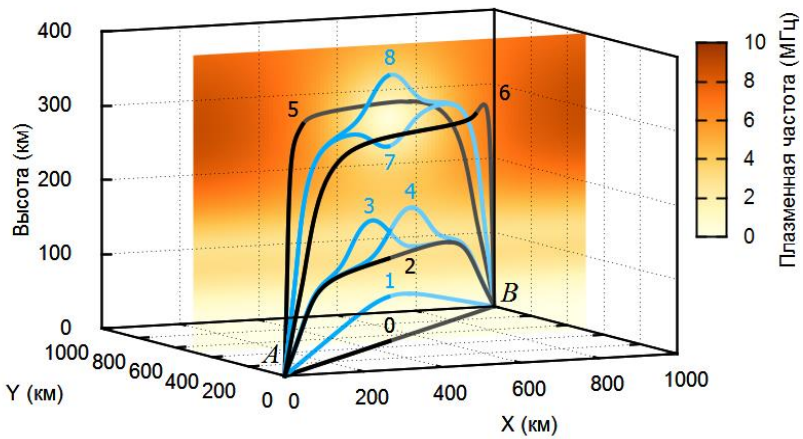
Принцип стационарности для функционала лучевой траектории:

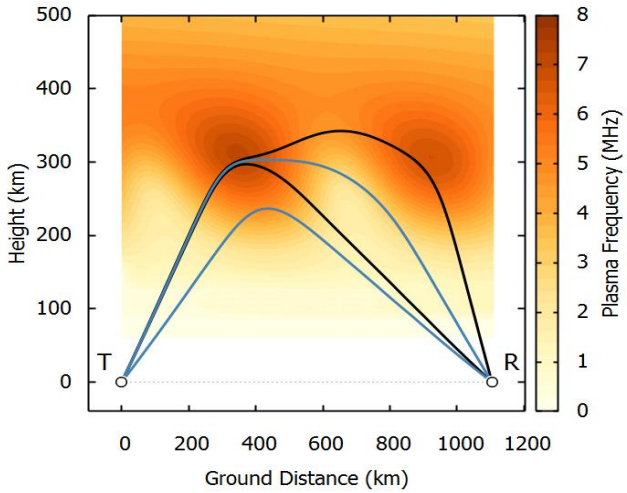
$$\delta S[\gamma] = \delta \int_A^B n(\vec{r})\, dl = 0, \qquad [1]$$

→ minima
saddle points

где $n(\vec{r})$ — показатель преломления в точке $\vec{r}$; dl — элемент длины луча γ.

Задача о расчете лучей сводится к поиску стационарных точек функционала $S(\mathrm{r})$.



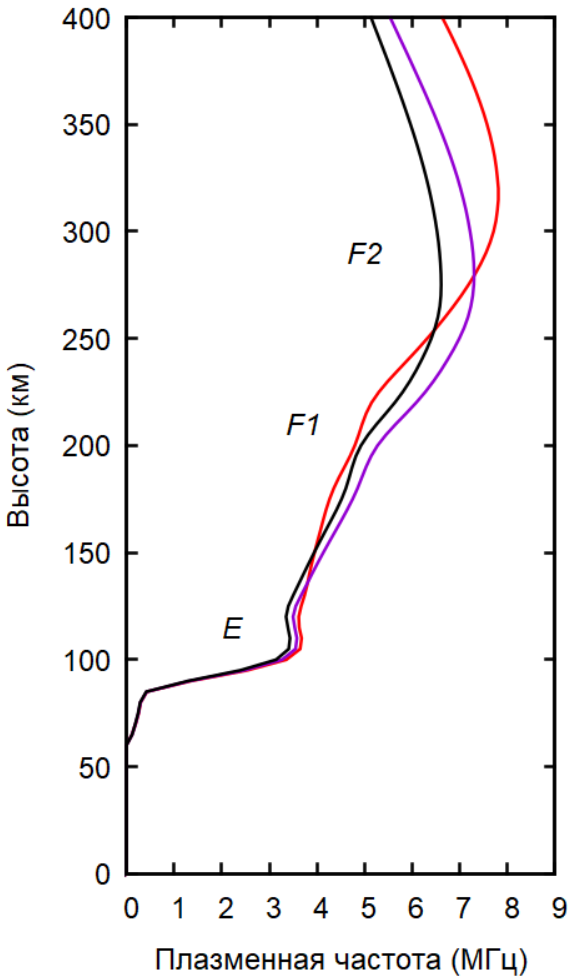


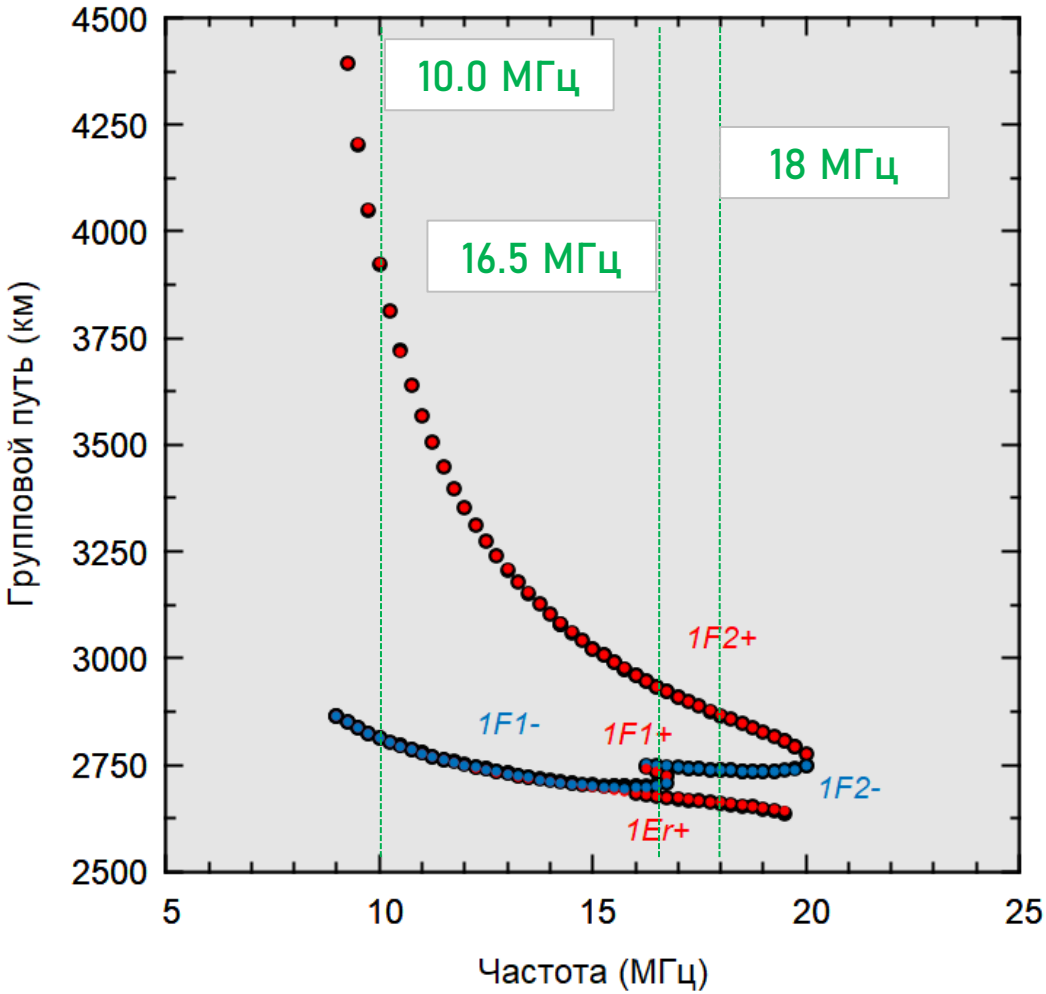
Nosikov, I. A., Klimenko, M. V., Zhbankov, G. A., Podlesnyi, A. V., Ivanova, V. A., Bessarab, P. F. (2019). *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, *68*(1), 455-467.

Содержание

1. Система «Прогноз-ИЗМИРАН».
2. Инструменты моделирования:
   a. Пристрелка на основе глобальной оптимизации.
   b. Прямой вариационный метод.
4. Результаты моделирования в области минимальных частот.
5. Современные возможности методов.
6. Заключение.

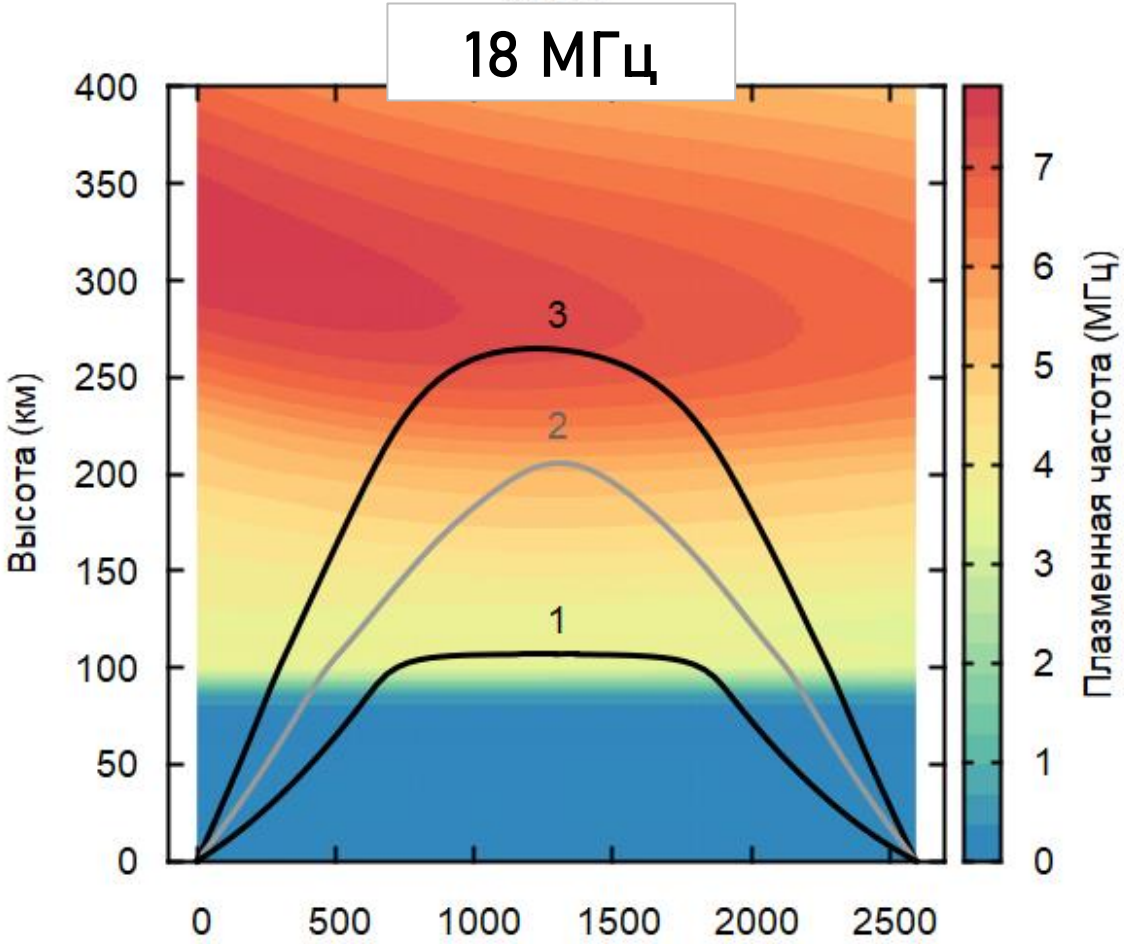
Моделирование ионограмм Н3





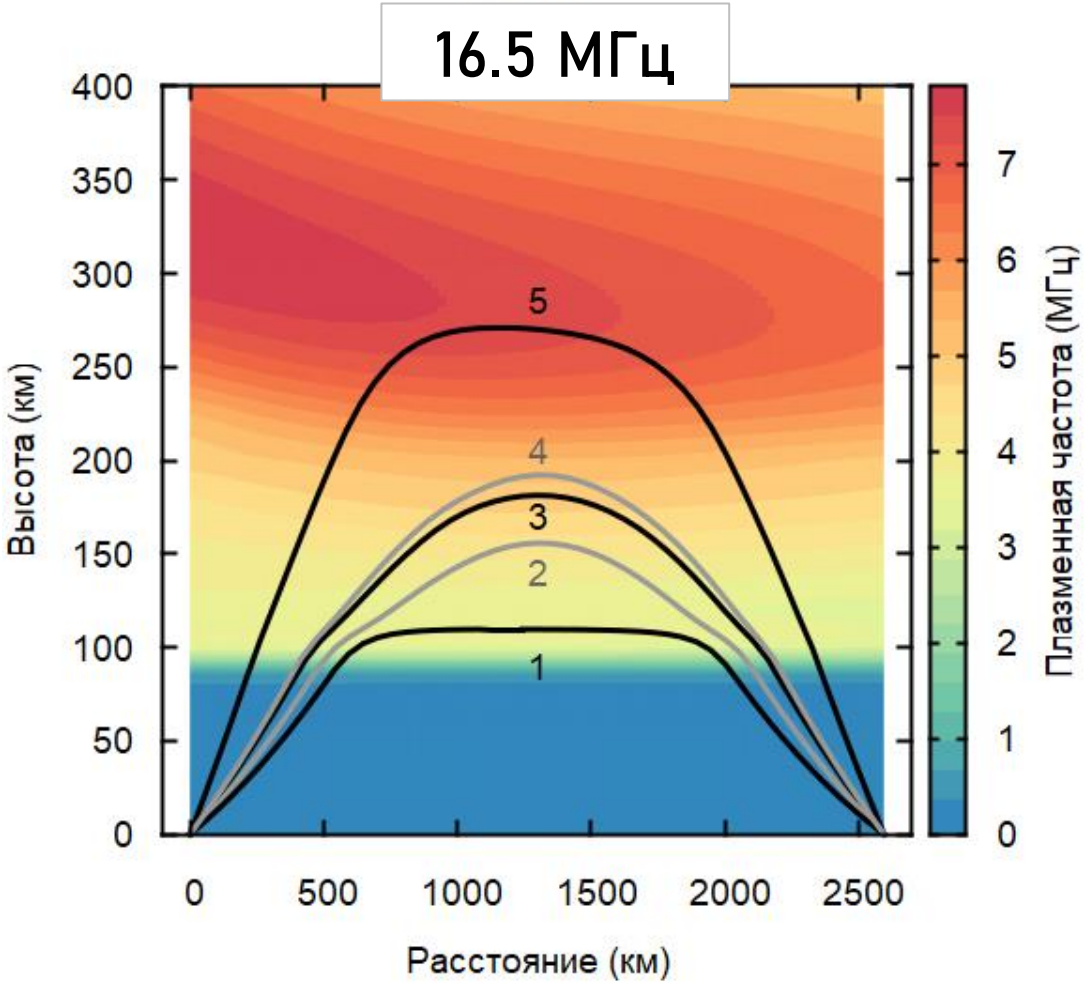
И. А. Носиков, А. М. Падохин, И. В. Крашенинников, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб. Особенности расчёта минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.

Частота 18 МГц



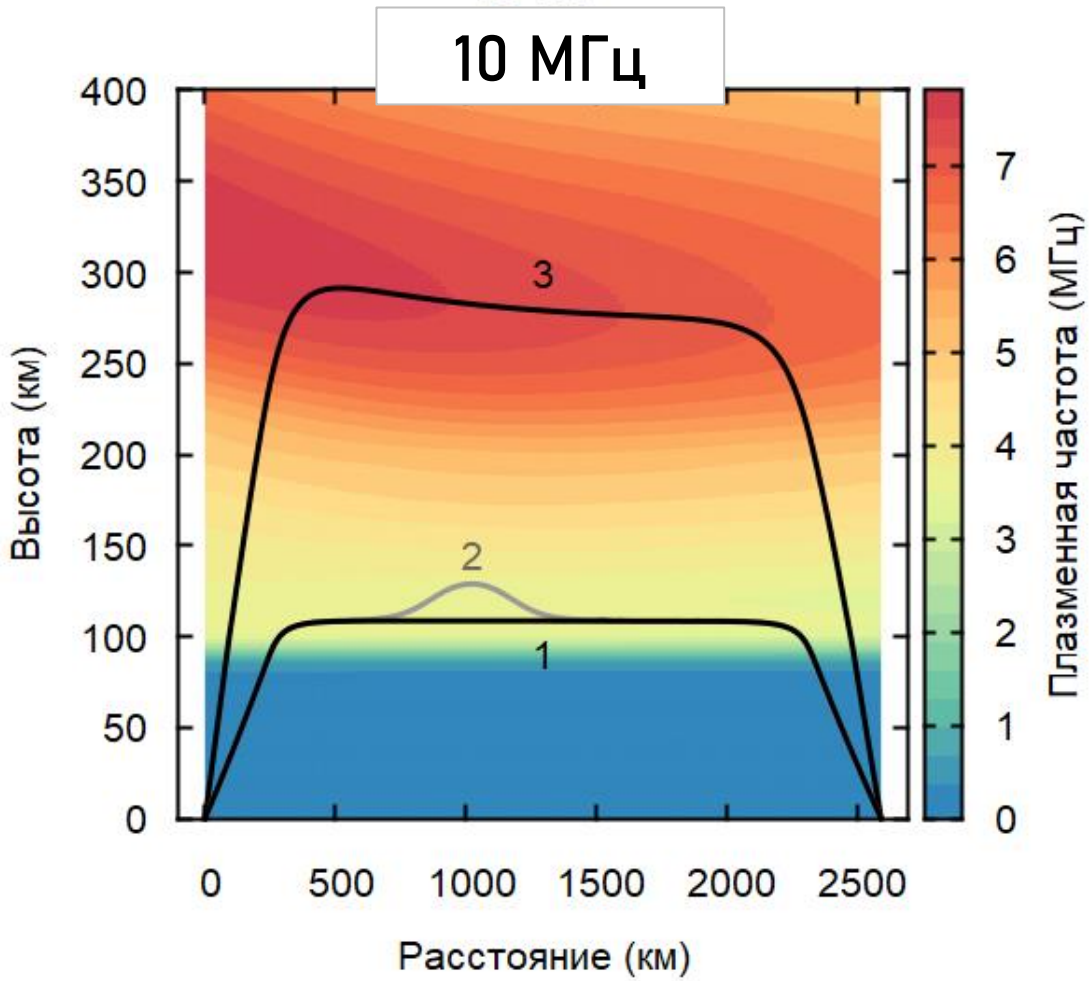
И. А. Носиков, А. М. Падохин, И. В. Крашенинников, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб. Особенности расчёта минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.

Частота 18 МГц



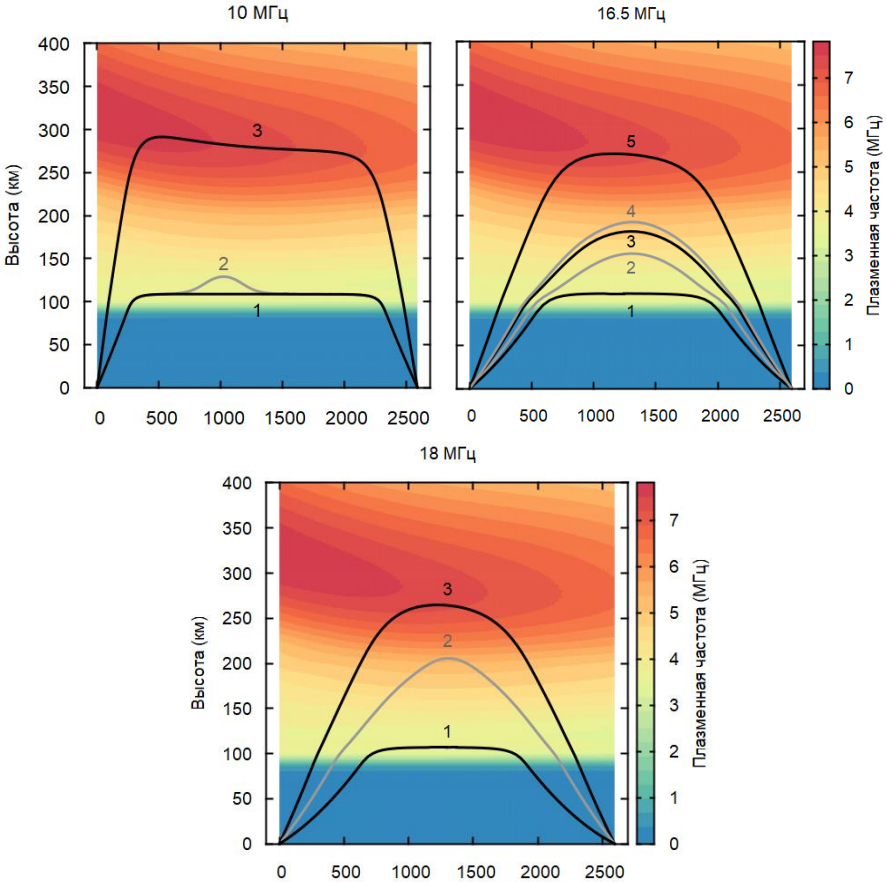
И. А. Носиков, А. М. Падохин, И. В. Крашенинников, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб. Особенности расчёта минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.

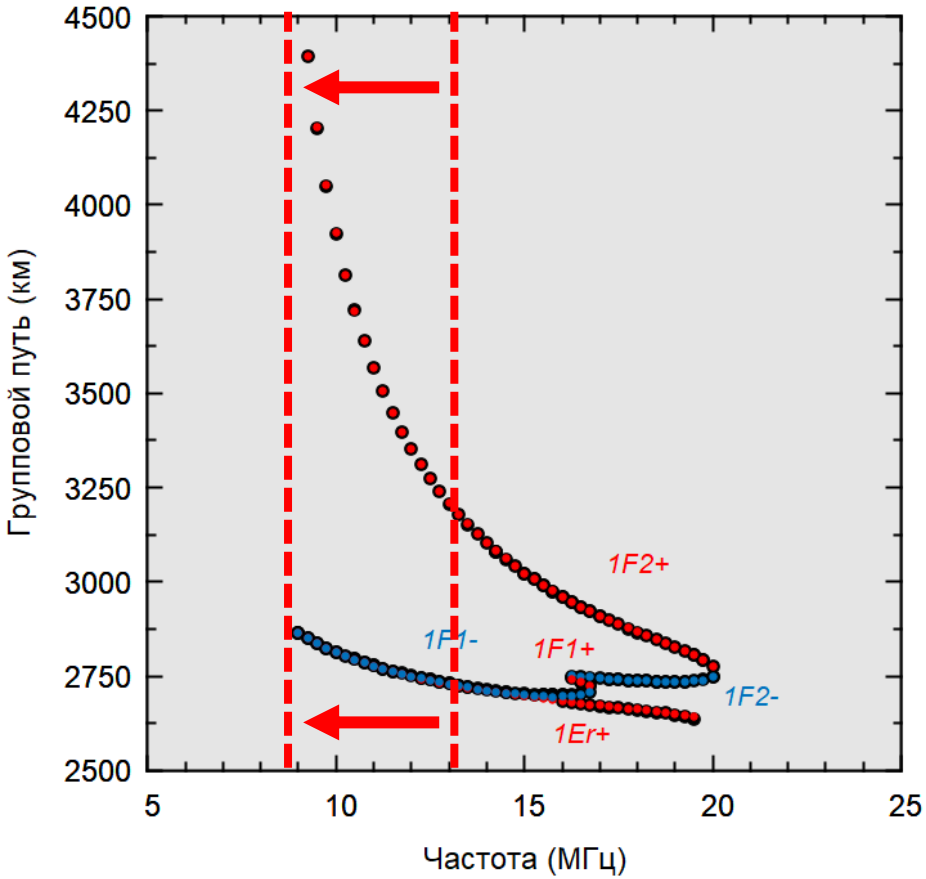
Частота 10 МГц



И. А. Носиков, А. М. Падохин, И. В. Крашенинников, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб. Особенности расчёта минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.

Моделирование ионограммы НЗ





И. А. Носиков, А. М. Падохин, И. В. Крашенинников, М. В. Клименко, П. Ф. Бессараб. Особенности расчёта минимальных частот мод в задаче прогнозирования условий ионосферной радиосвязи // Известия высших учебных заведений. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.

Сценарии совместного применения

1. Разделение по модам:

   вариационный метод – поиск верхних лучей,

   метод пристрелки – поиск нижних лучей.

2. Комбинированный алгоритм:

   быстрая предварительная оценка вариационным методом для определения «вилки»,

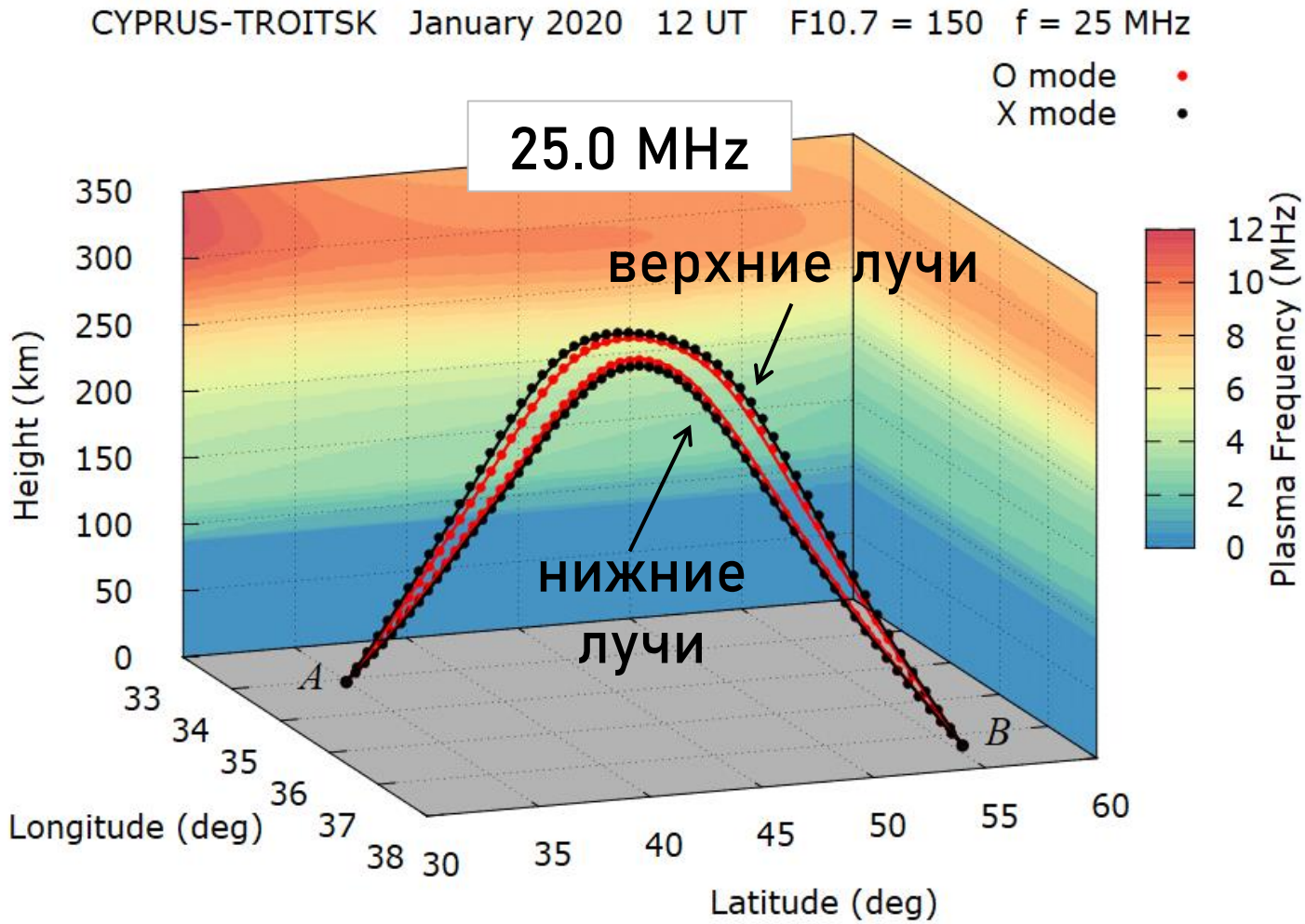
   далее – точный расчет пристрелкой.

Комбинированный подход в расчетах позволил ускорить время расчета в 3 раза [И. А. Носиков и др. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64, № 8-9. – С. 672-685.].

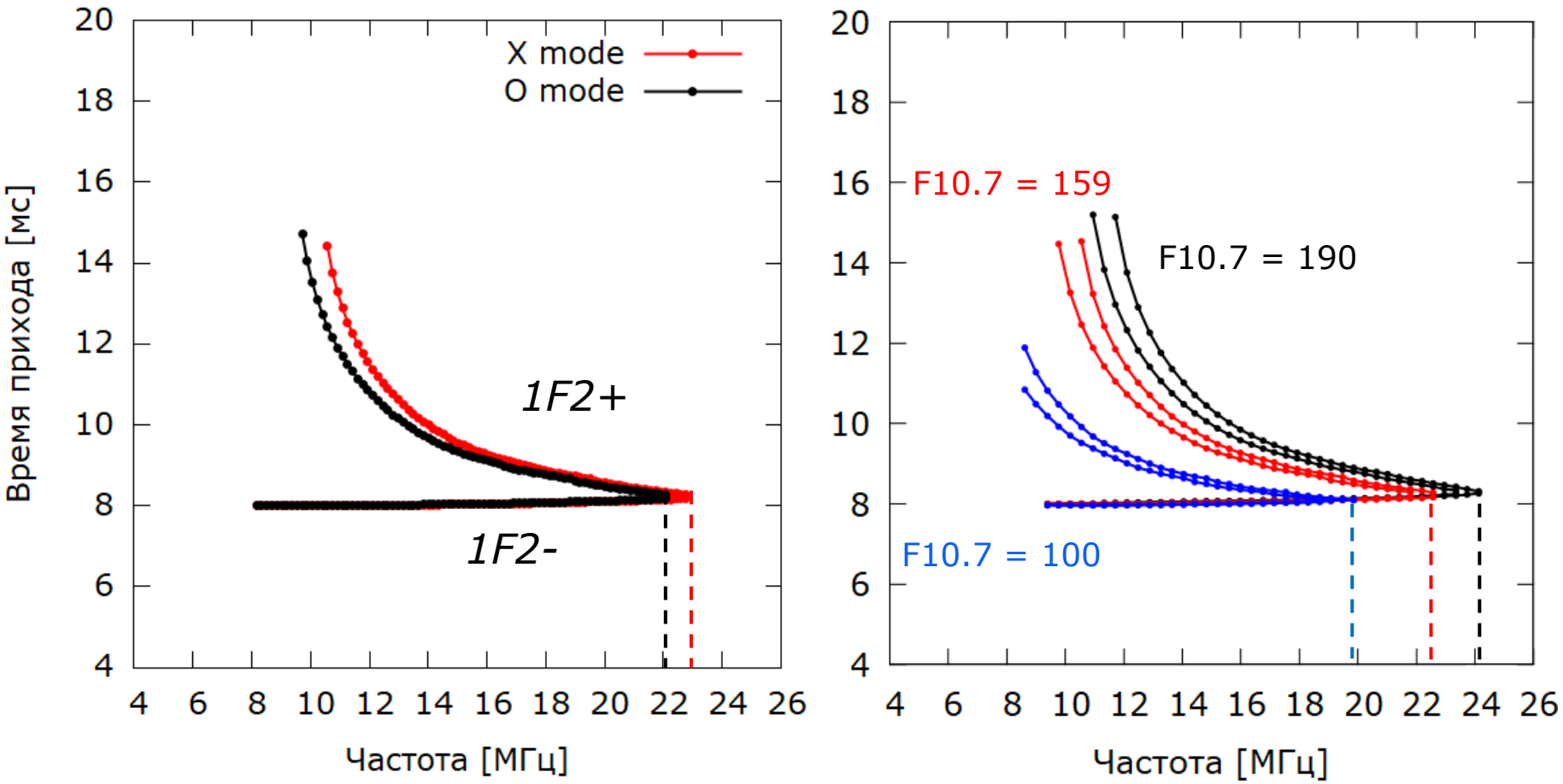
Содержание

1. Система «Прогноз-ИЗМИРАН».
2. Инструменты моделирования:
   a. Пристрелка на основе глобальной оптимизации.
   b. Прямой вариационный метод.
4. Результаты моделирования в области минимальных частот.
5. Современные возможности методов.
6. Заключение.

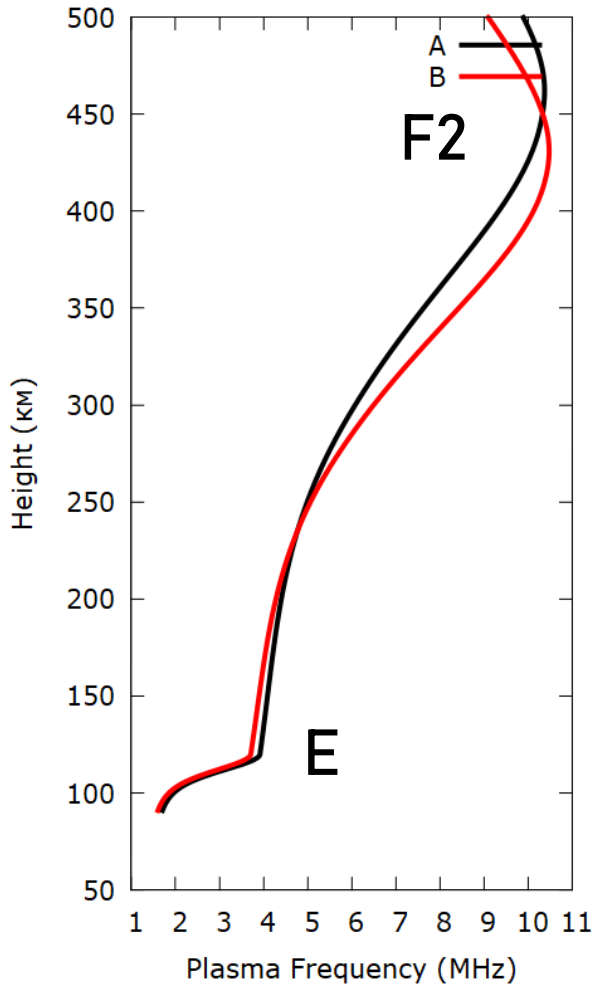
CYPRUS – IZMIRAN NeQuick2 IGRF13
01.2020 12 UT F10.7 = 150

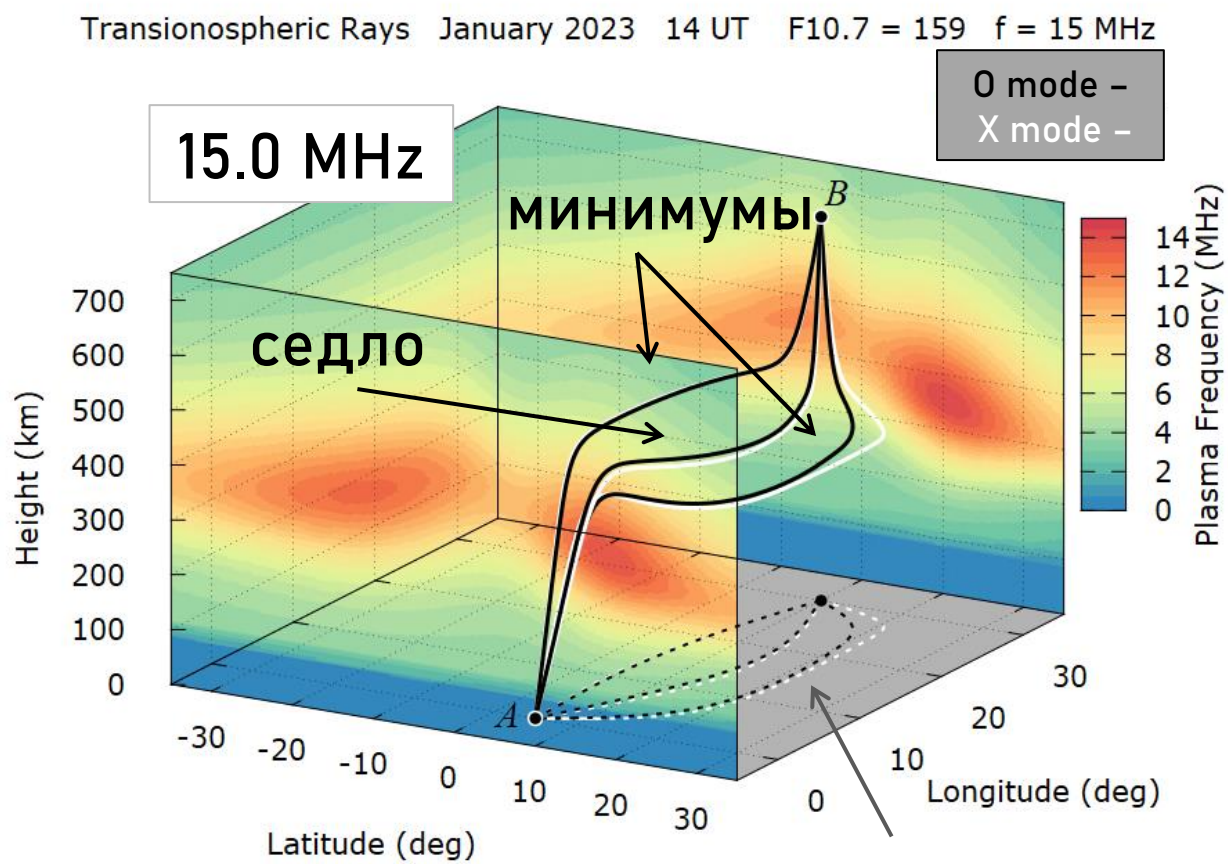


CYPRUS – IZMIRAN NeQuick2 IGRF13
01.2023 14 UT F10.7 = 159



TRANSIONOSPHERIC RAYS NeQuick2 IGRF13
01.2023 14 UT F10.7 = 159





проекции на земную поверхность

Заключение

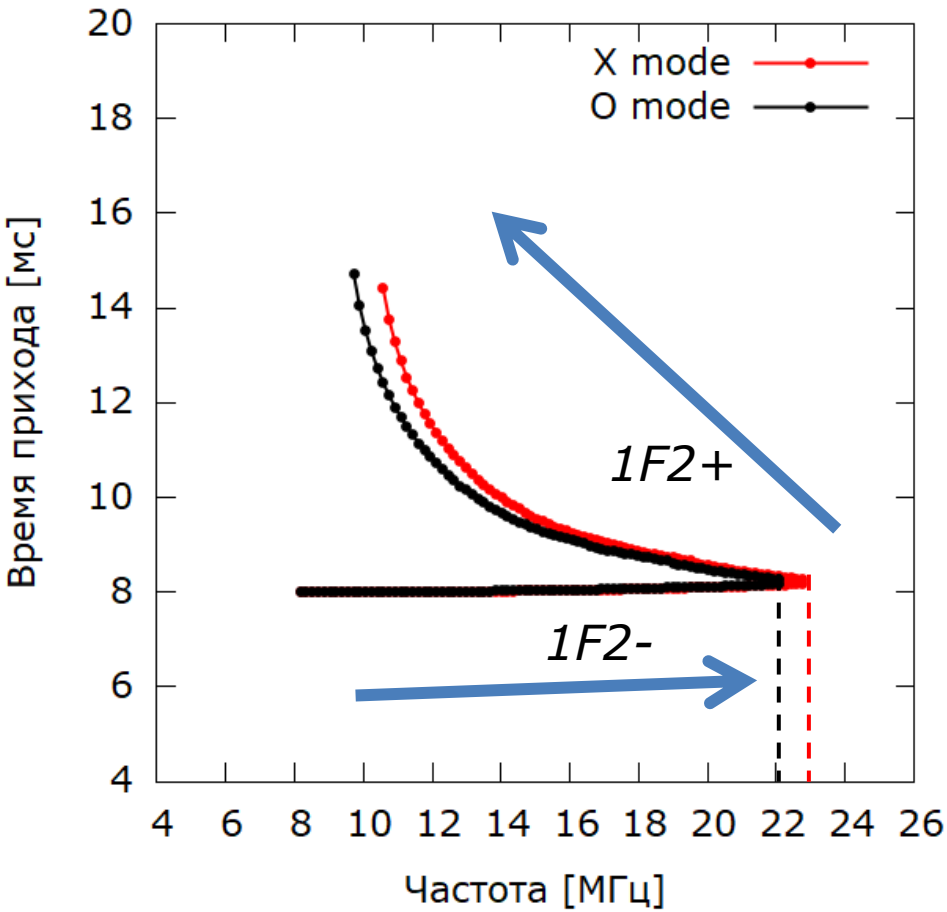
В работе представлено применение нового варианта метода пристрелки и прямого вариационного метода для расчета лучей в области минимальных частот выбранной радиотрассы:

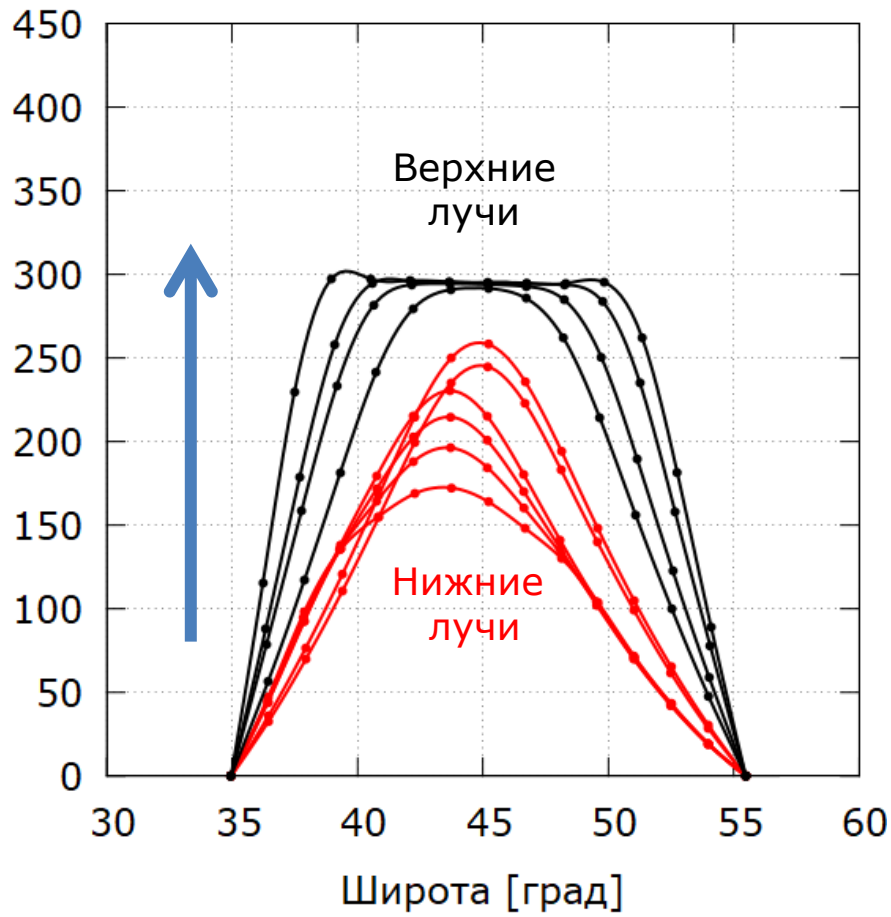
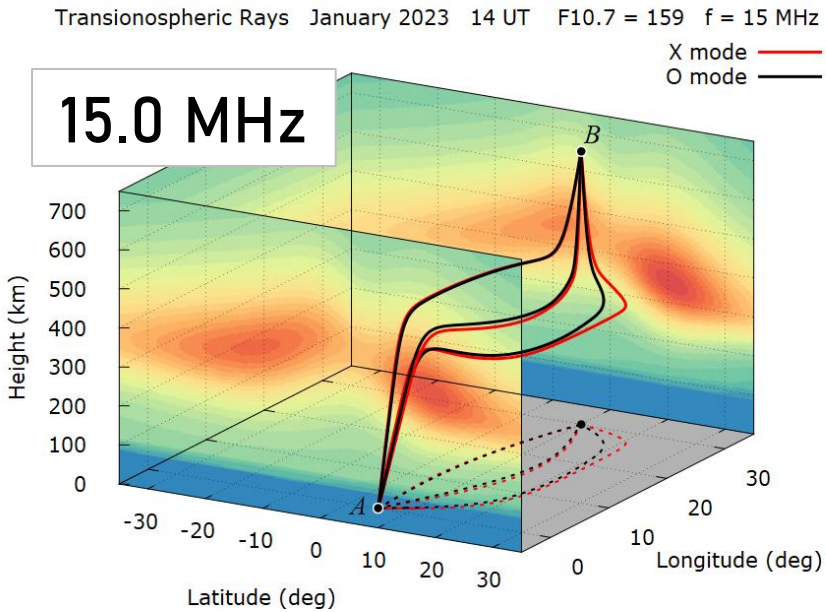
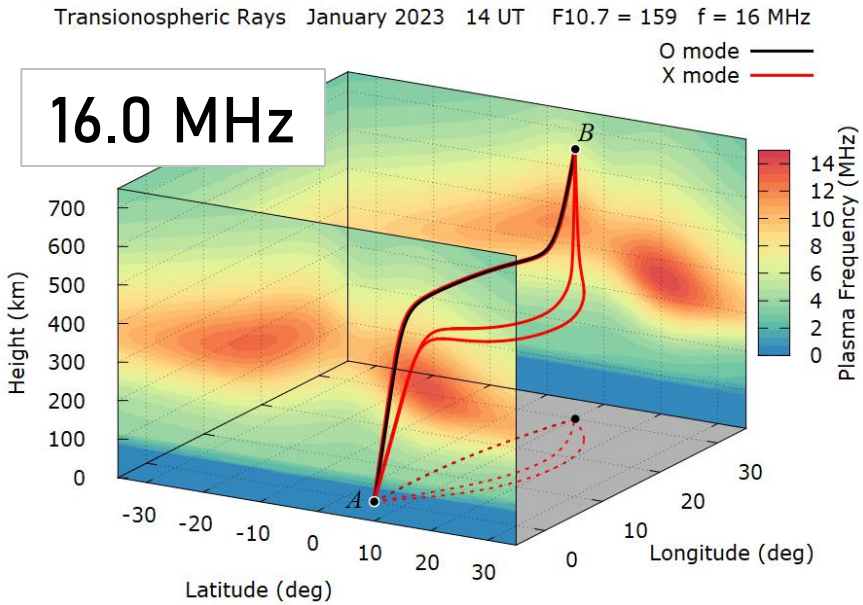
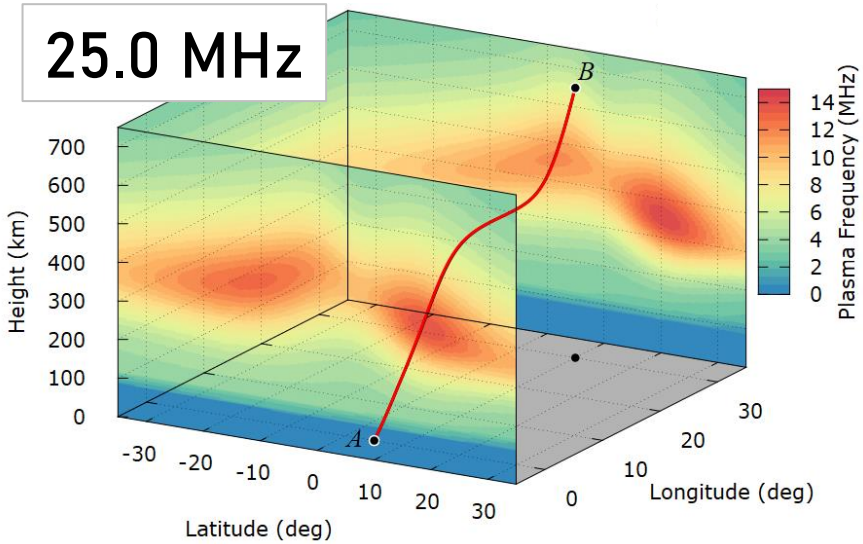
1. Представленные подходы позволили расширить частотный диапазон ионограммы в области минимальных частот.
2. Вариационный подход наиболее быстро и устойчиво находит верхние лучи (минимумы целевой функции).
3. Пристрелка наиболее эффективна в определении нижних лучей.
4. Совместное применение позволяет добиться ускорения расчетов.

Современные реализации данных методов позволяют рассчитывать лучи в трехмерной неоднородной анизотропной ионосфере.

Спасибо за внимание!

CYPRUS – IZMIRAN NeQuick2 IGRF13
01.2023 14 UT F10.7 = 159





TRANSIONOSPHERIC RAYS NeQuick2 IGRF13
01.2023 14 UT F10.7 = 159