



Семенова Н.А.¹, Выборнов Ф.И.^{1,2}, Грач С.М.¹

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского,

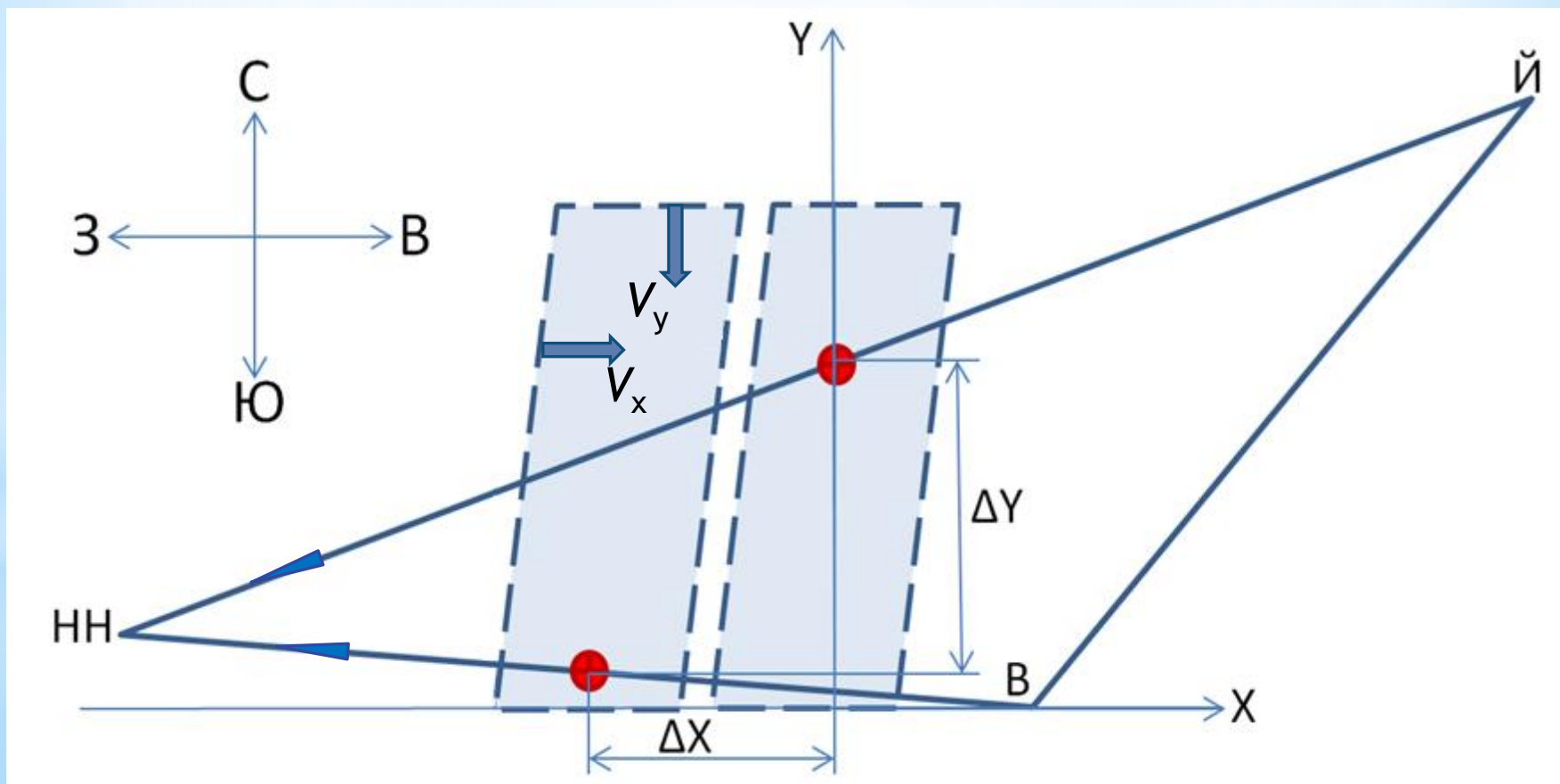
²ВГУВТ

О некоторых результатах моделирования распространения КВ радиоволн на слабонаклонных трассах среднеширотной ионосферы, связанных точкой приема, при прохождении ПИВ

Представлены результаты моделирования распространения КВ радиоволн на двух слабонаклонных трассах среднеширотной ионосферы во время регистрации перемещающегося ионосферного возмущения (ПИБ) типа “серп”. В качестве исходных экспериментальных данных использовались ионограммы вертикального и дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) наклонного зондирования ионосферы, полученные во время специального эксперимента по синхронной работе трех ЛЧМ пространственно-разнесенных ионозондов 19 декабря 2019 г. Моделирование проводилось синхронно для двух трасс, когда ЛЧМ-сигналы регистрировались в г. Нижний Новгород, а излучались последовательно в р/п Васильсурск и г. Йошкар-Ола с интервалом одна минута.

Моделирование распространения декаметровых волн проводилось в присутствии ПИВ. В приближении геометрической оптики выполнялся расчет траекторий лучей волн, распространяющихся в сферически-слоистой магнитоактивной ионосферной плазме. Для обыкновенной волны решались характеристические лучевые уравнения в сферической системе координат, которая была связана с реальными сферическими географической и магнитной системой координат. Наклонение геомагнитного поля 71.6° , склонение 11.0° , гирочастота 1.36 МГц, используемые в расчетах, соответствовали трассам моделирования.

Схема трасс распространения радиоволн и перемещения неоднородности (ПИВ) в проекции на поверхность Земли. Трасса 1 - Васильсурск-Нижний Новгород. Трасса 2 - Йошкар-Ола-Нижний Новгород. Красные кружки - средние точки трасс 1 и 2. ПИВ - перемещающийся серый параллелограмм. V_x , V_y - проекции скорости ПИВ на соответствующие оси координат.



Возмущение профиля электронной концентрации (неоднородность) при прохождении ПИВ моделировалось участком гармонической функции (плоской волны) размером в половину длины волны L (ось z параллельна вертикали):

при условии $|x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta| \leq \frac{L}{4}$

$$N(x, y, z) = N_0(z) \left[1 + \delta \cos \left(-\frac{2\pi}{L} (x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta) \right) \right],$$

при условии $|x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta| > \frac{L}{4}$

$$N(x, y, z) = N_0(z),$$

где $N_0(z)$ - значение электронной концентрации в невозмущенной ионосфере (невозмущённый профиль).

Параметры неоднородности:

δ - относительная амплитуда неоднородности;

$L/2$ - характерный масштаб неоднородности;

H - высота центра неоднородности над поверхностью Земли;

α - азимутальный угол направления распространения волны;

β - угол наклона фронта волны относительно вертикали.

Профиль электронной концентрации в невозмущенной ионосфере (без ПИВ) был восстановлен по ионограмме вертикального зондирования ионосферы, полученной в 08:45 UTC на ионозонде CAD1 в р/п Васильсурск перед появлением ПИВ.

Длины трасс и азимуты (отсчитываются от направления на север по часовой стрелке) из пунктов передачи в пункт приема составляют, соответственно:

Трасса 1 (Васильсурск - Нижний Новгород) - 130 км; $280,3^\circ$

Трасса 2 (Йошкар-Ола - Нижний Новгород) - 240 км; $263,6^\circ$

Теоретические и экспериментальные параметры ПИВ по обеим трассам дают наилучшее совпадение при следующих значениях:

$$\delta = 0,2, \quad a = 280,25^\circ, \quad B = 45^\circ, \quad H = 250 \text{ км}$$

$$L = 100 \text{ км}: \quad L_x = 72 \text{ км}, \quad L_y = 397 \text{ км}, \quad L_z = 71 \text{ км}$$

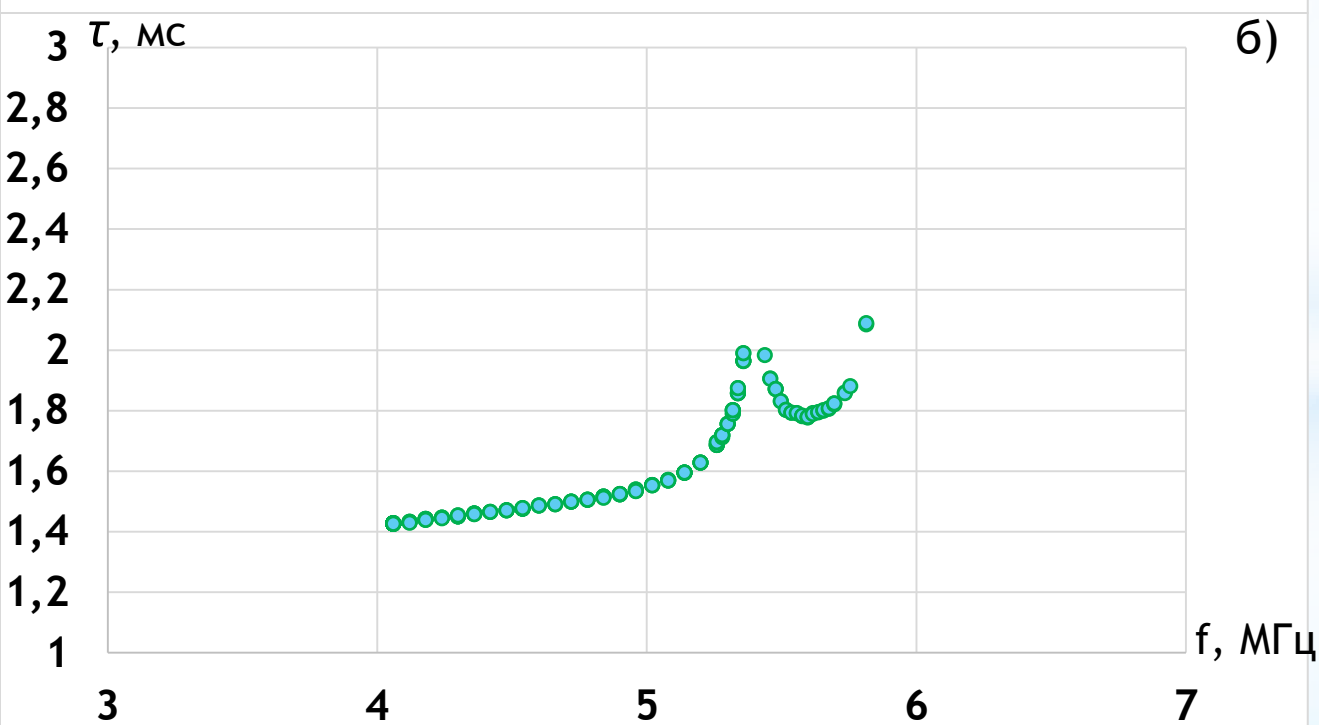
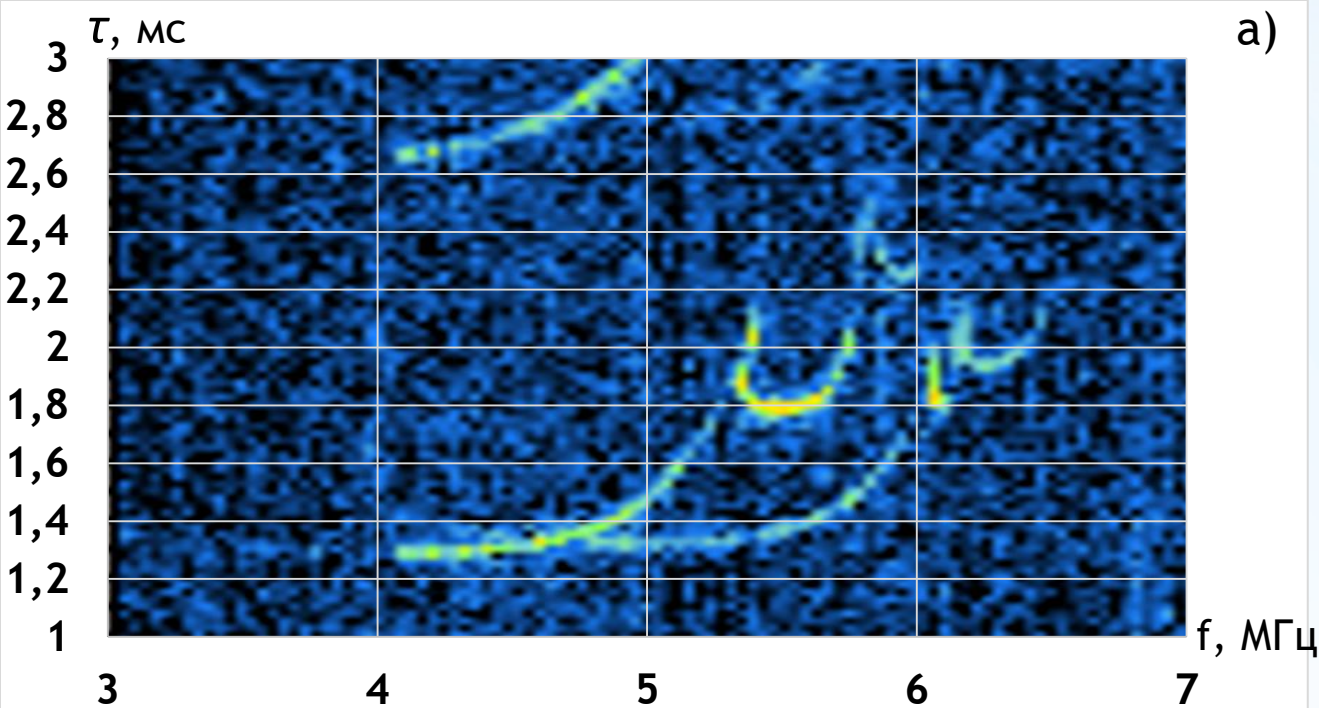
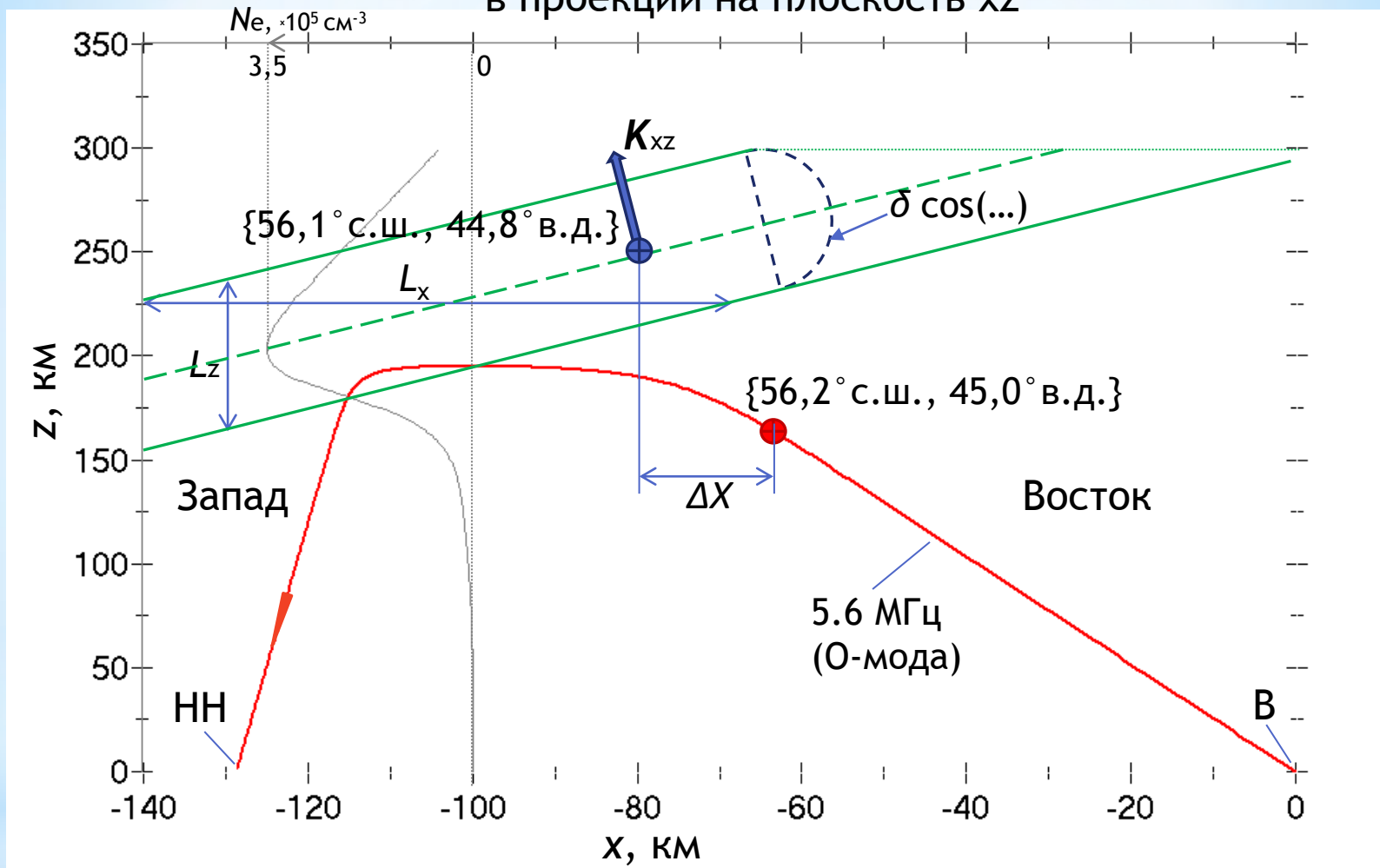
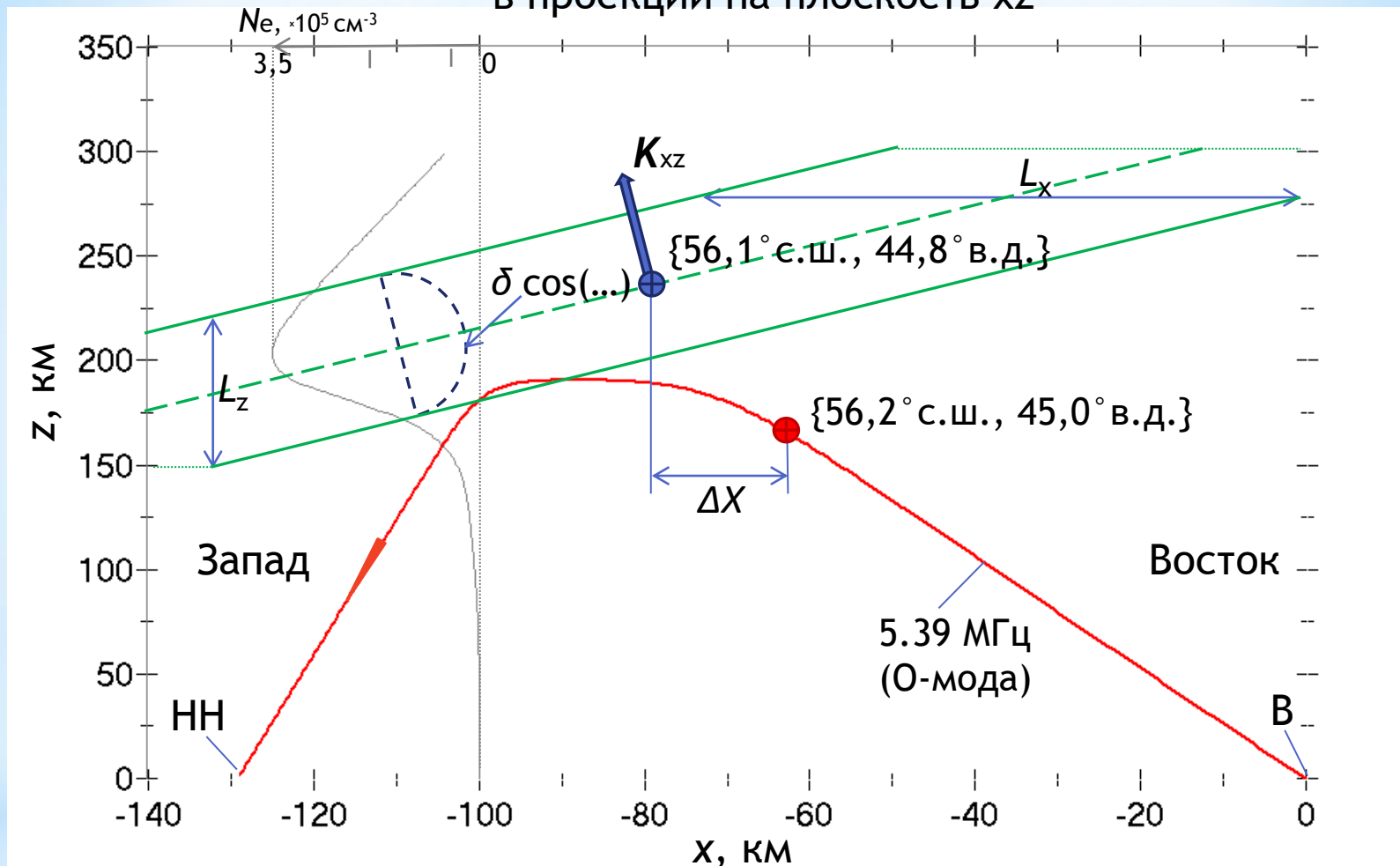


Схема прохождения луча через область неоднородности на трассе 1 в проекции на плоскость xz



Красный кружок - средняя точка трассы 1. Область между двумя сплошными зелеными линиями - срез неоднородности в плоскости xz , проходящей через ее центр на высоте $H=250$ км (синий кружок). K_{xz} - проекция волнового вектора на плоскость xz . Луч для волны с частотой $f=5.6$ МГц имеет минимальную задержку T_{\min} (нижняя точка петли ПИВ) при положении центра неоднородности над точкой с координатами $\{56,1^\circ \text{ с.ш.}, 44,8^\circ \text{ в.д.}\}$. Серая кривая - невозмущенный профиль.

Схема прохождения луча через область неоднородности на трассе 1 в проекции на плоскость xz

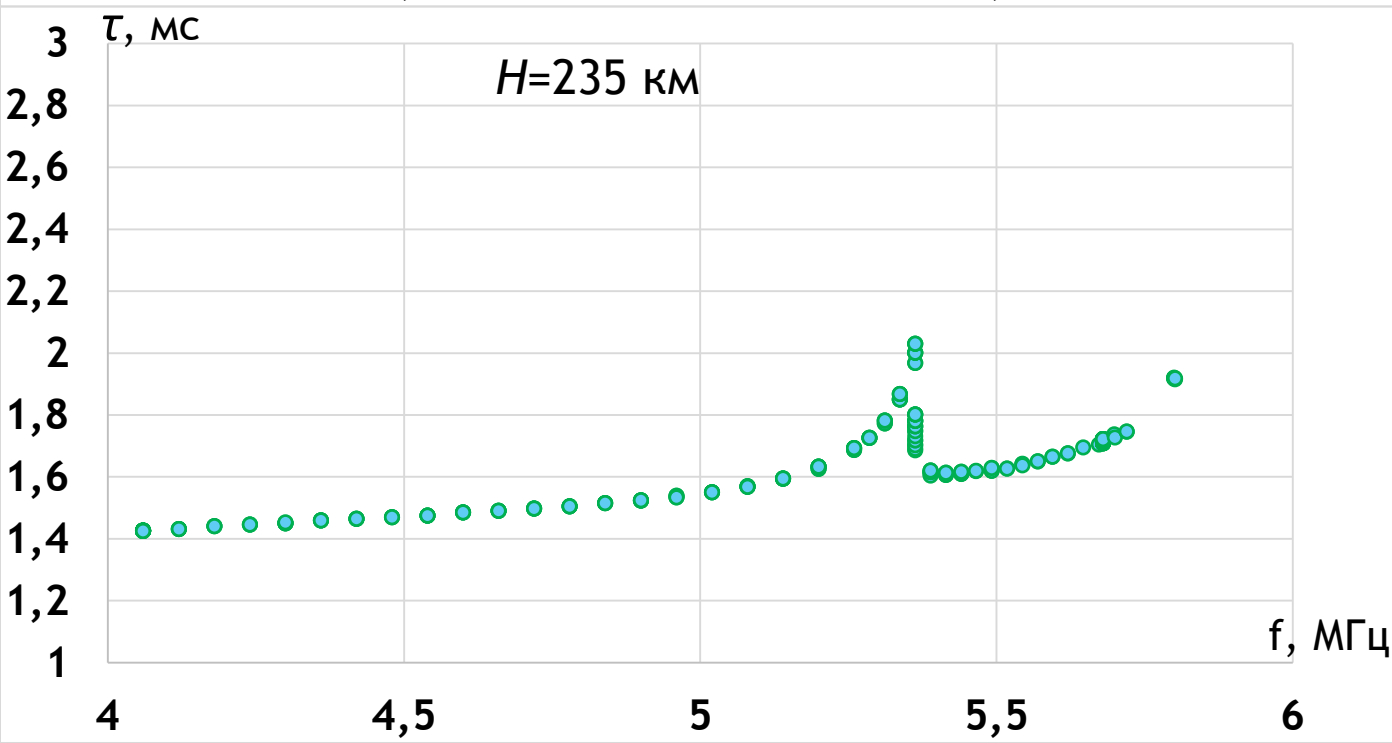
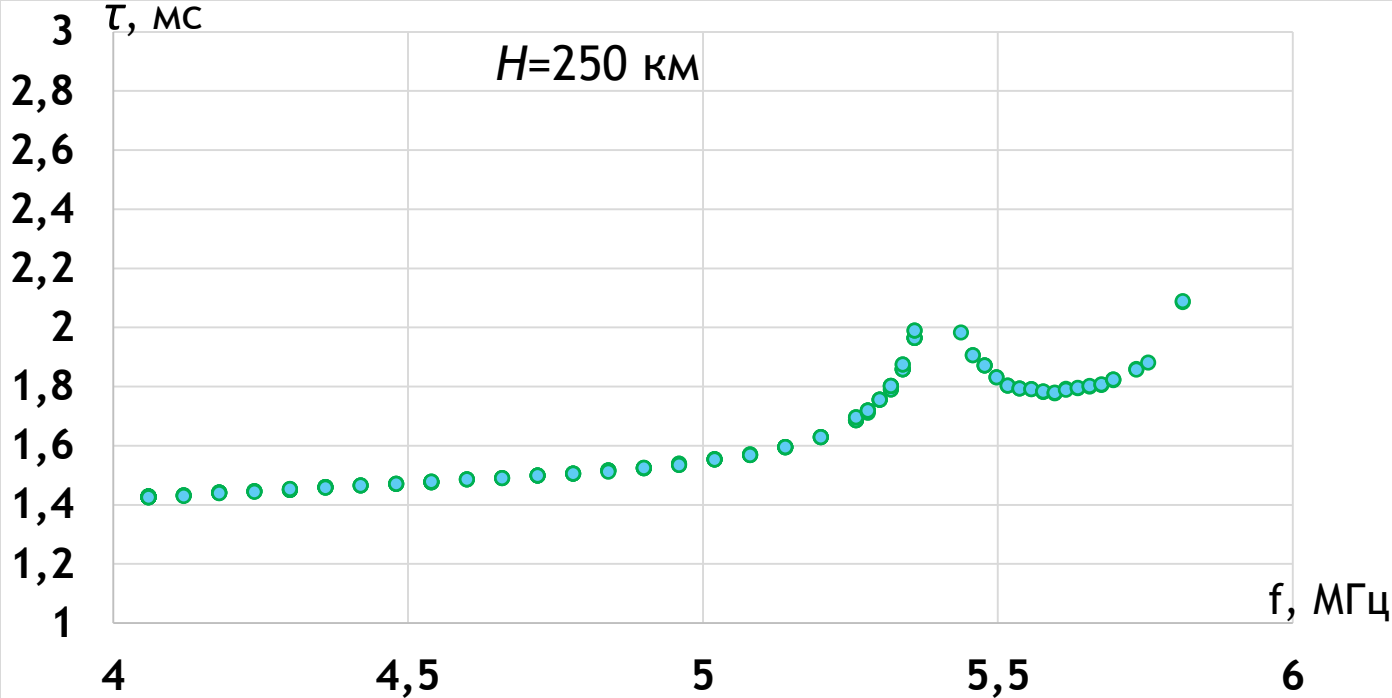


Красный кружок - средняя точка трассы 1. Область между двумя сплошными зелеными линиями - срез неоднородности в плоскости xz , проходящей через ее центр на высоте $H=235$ км (синий кружок). K_{xz} - проекция волнового вектора на плоскость xz . Луч для волны с частотой $f=5.39$ МГц имеет минимальную задержку T_{\min} (нижняя точка петли ПИВ) при положении центра неоднородности над точкой с координатами $\{56,1^\circ \text{ с.ш.}, 44,8^\circ \text{ в.д.}\}$. Серая кривая - невозмущенный профиль.

При моделировании перемещение фронта плоской волны задавалось сдвигом центра неоднородности (при $H=\text{const}$), главным образом, в четырех направлениях:

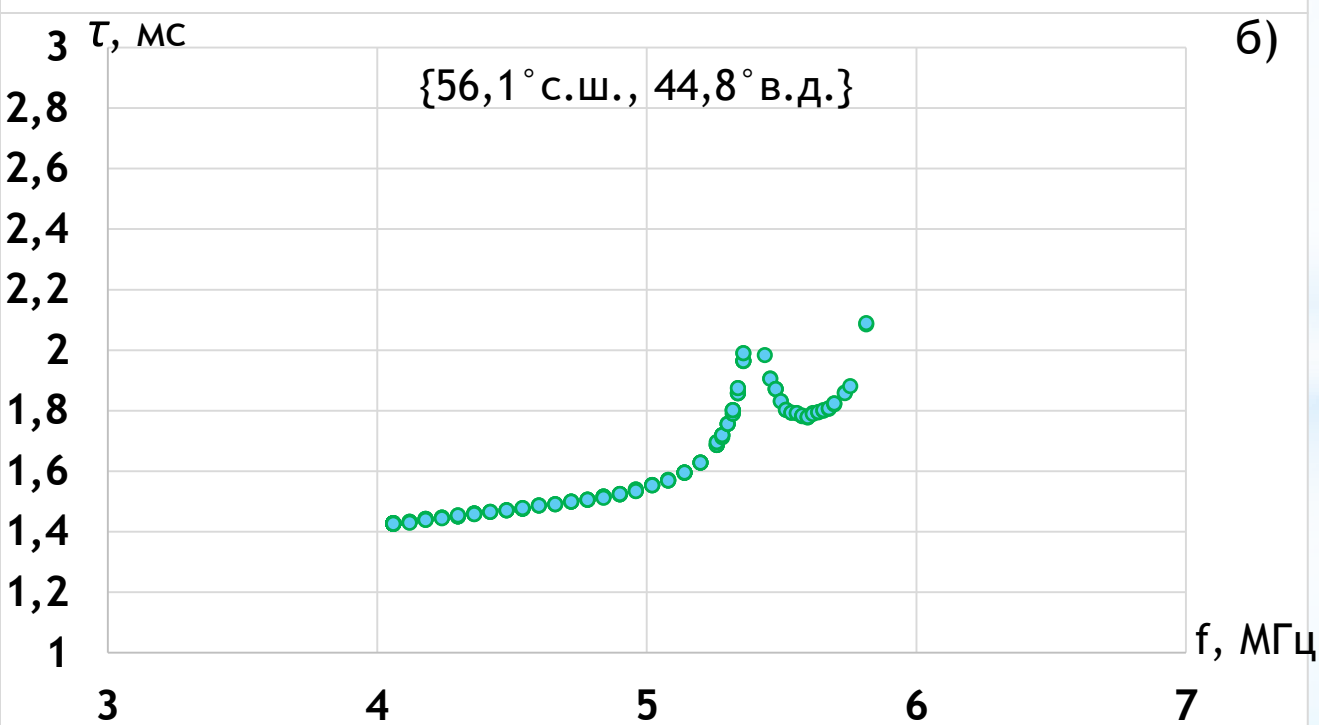
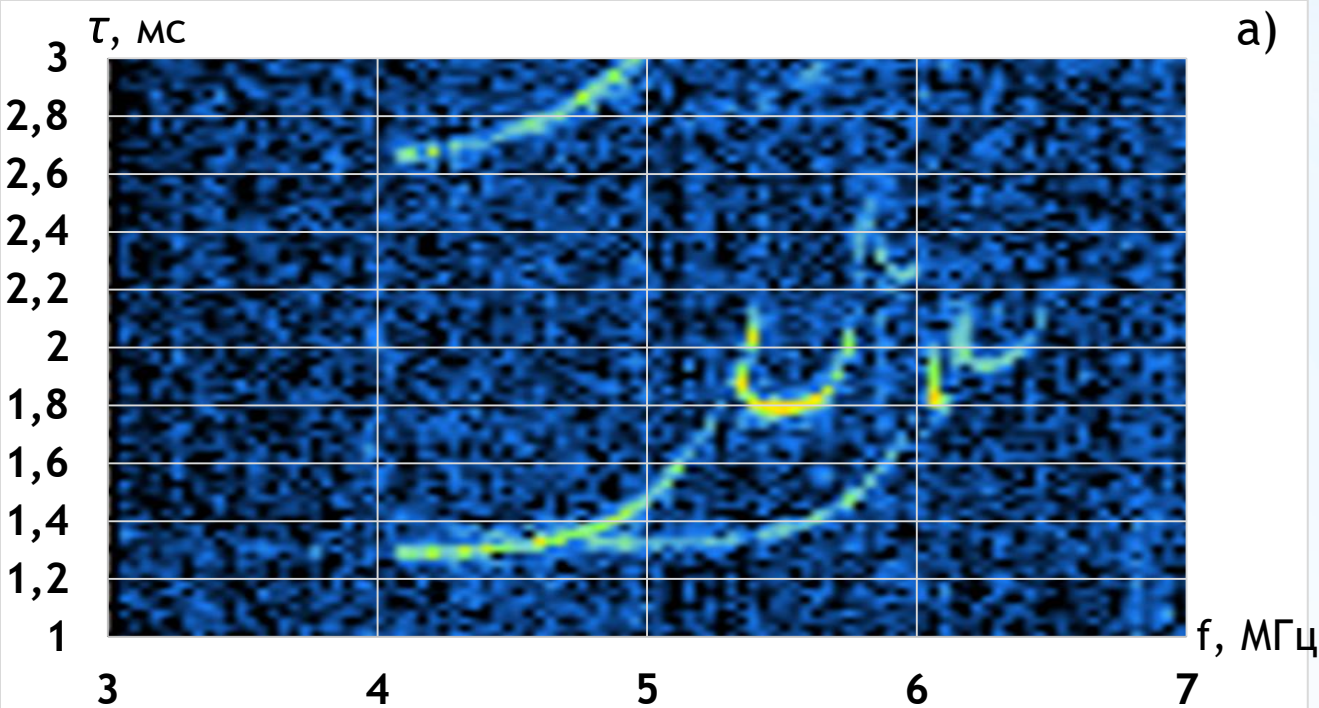
1. Вдоль линии широты средней точки трассы 1 с запада на восток.
2. Вдоль линии меридиана средней точки трассы 1 с севера на юг.
3. Вдоль линии широты средней точки трассы 2 с запада на восток.
4. Вдоль линии меридиана средней точки трассы 2 с севера на юг.

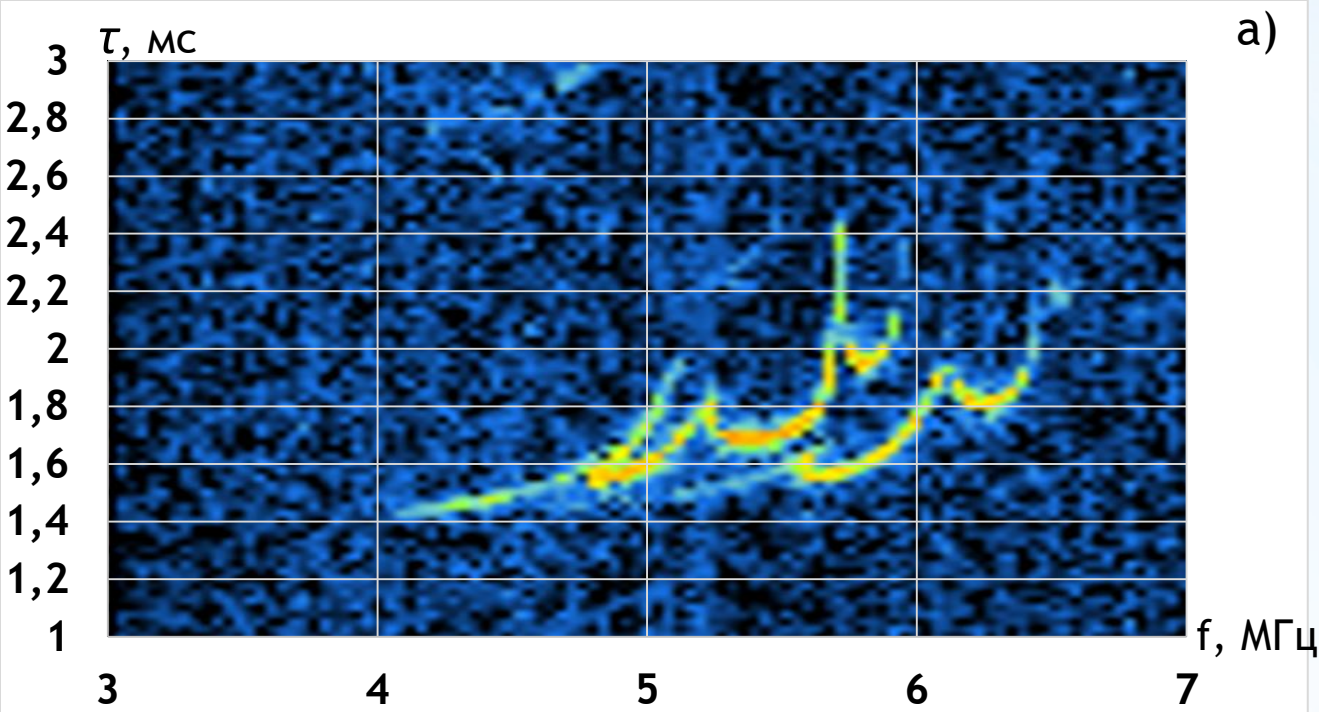
Поскольку неоднородность имеет большую (практически бесконечную) протяженность в плоскости, перпендикулярной K_{xz} , то моделирование перемещения неоднородности посредством движения ее центра в горизонтальном направлении (при $H=\text{const}$) эквивалентно изменению эффективной высоты взаимодействия луча с неоднородностью, т.е. определяет участок луча, попадающий в область неоднородности. При этом данный участок луча может не захватывать координату средней точки трассы, а форма траектории значительно отклоняется от траектории луча в невозмущенной ионосфере.



Результаты моделирования временных задержек τ в зависимости от частоты волны f для трассы 1 для O-компоненты при положении центра неоднородности $\{56,1^\circ \text{ с.ш.}, 44,8^\circ \text{ в.д.}\}$ и двух значениях его высоты H .

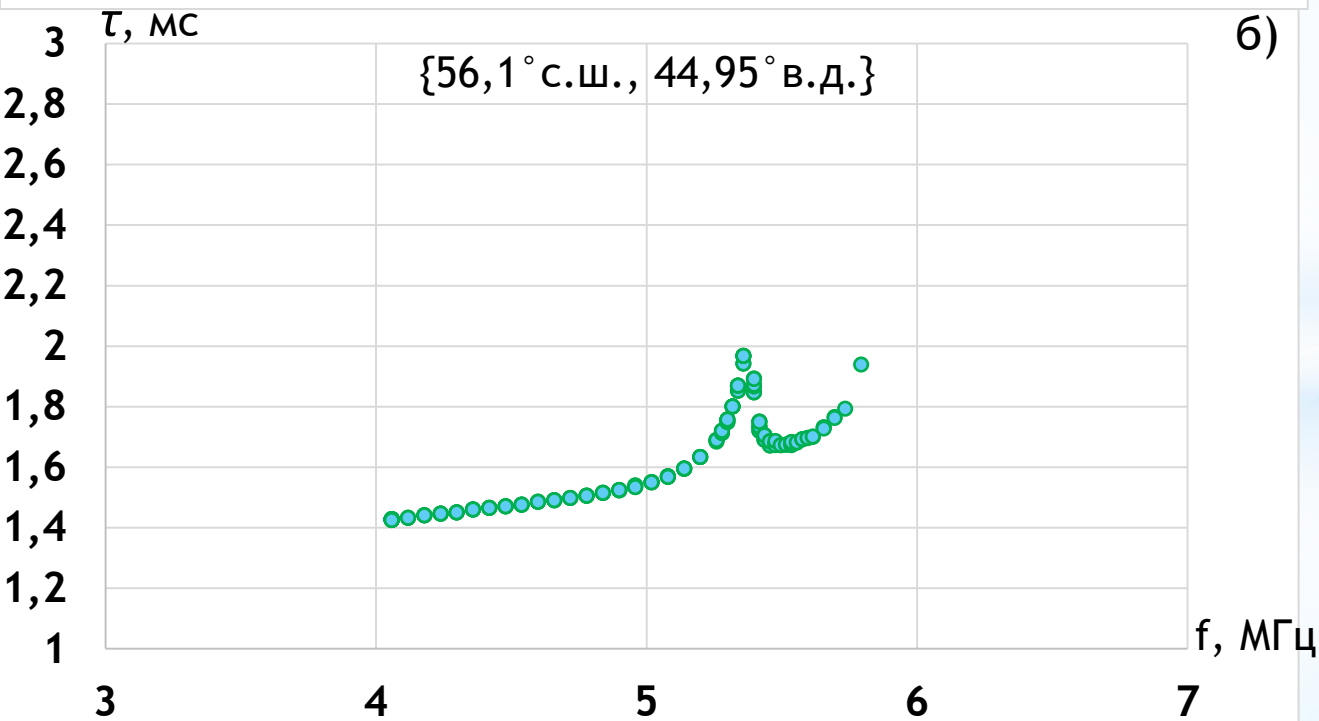
Минимальное значение задержки τ_{\min} (в нижней точке петли ПИВ) убывает и сдвигается по частоте в сторону более низких частот при снижении высоты центра неоднородности.





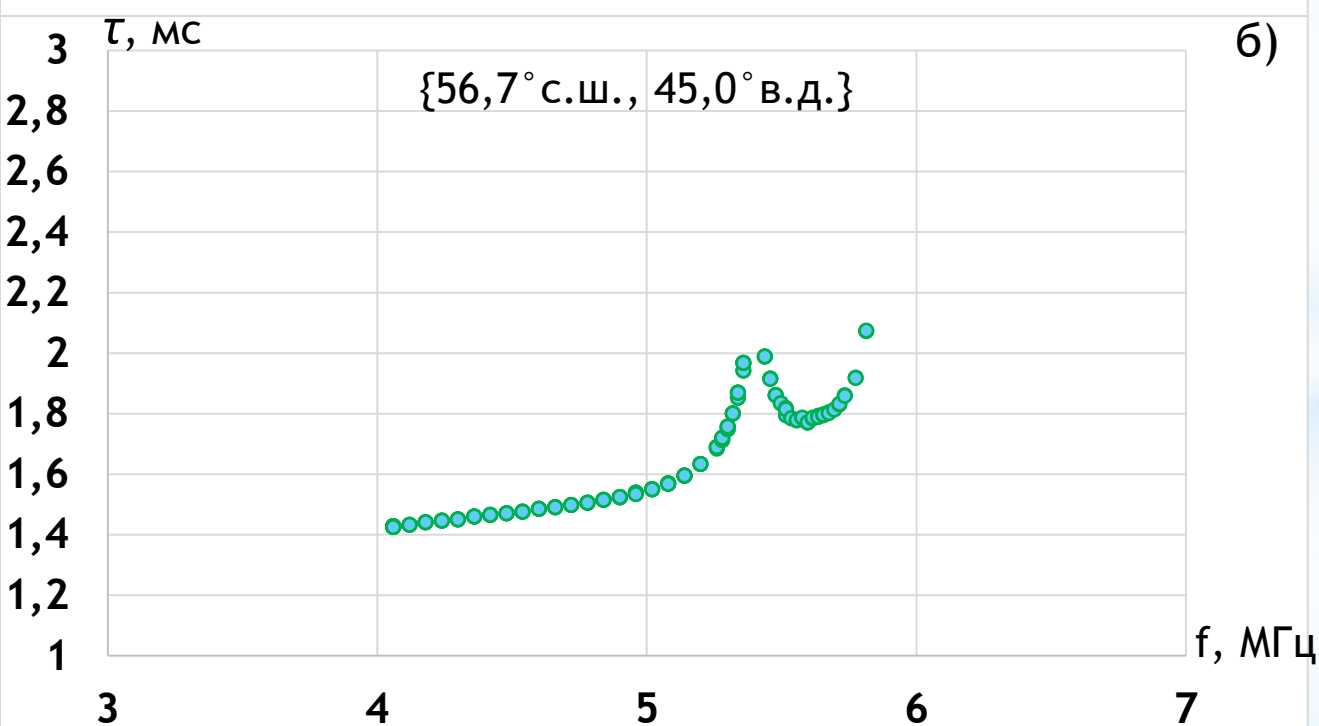
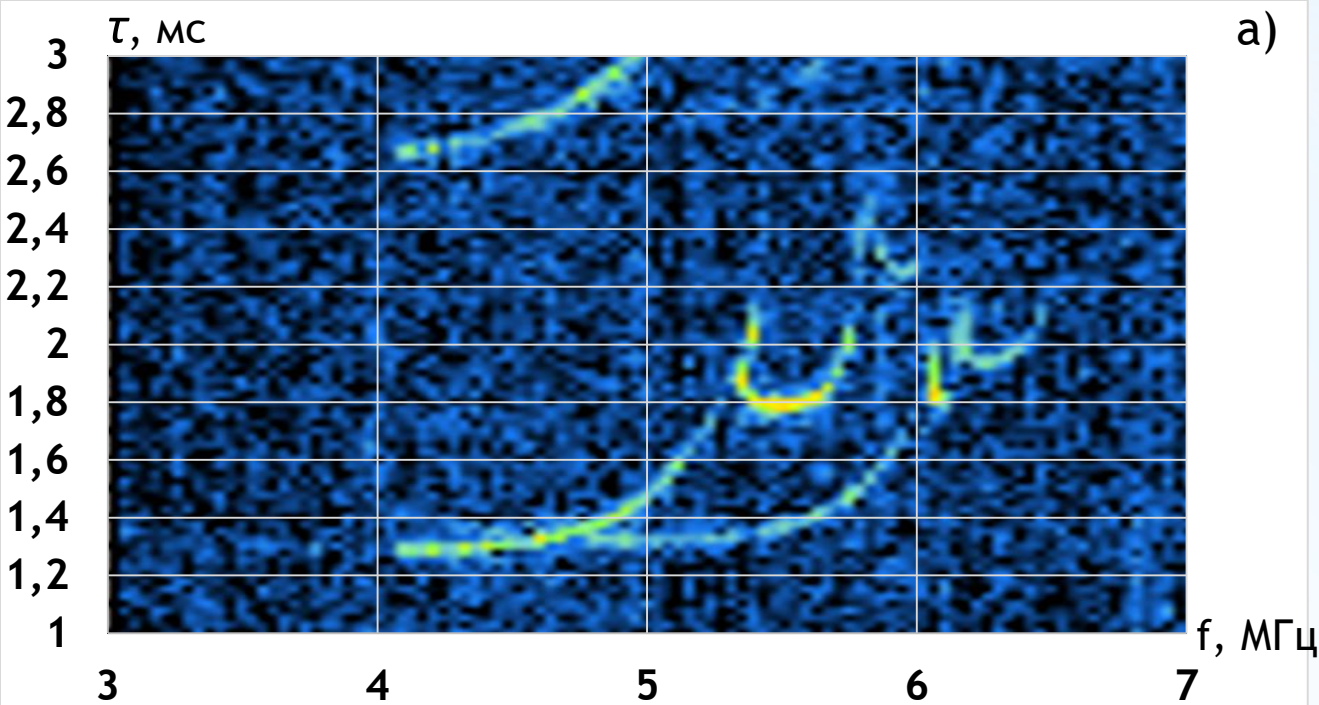
а) Графики временных задержек $\tau(f)$ (в мс) в зависимости от частоты волны (в МГц) для трассы 1.

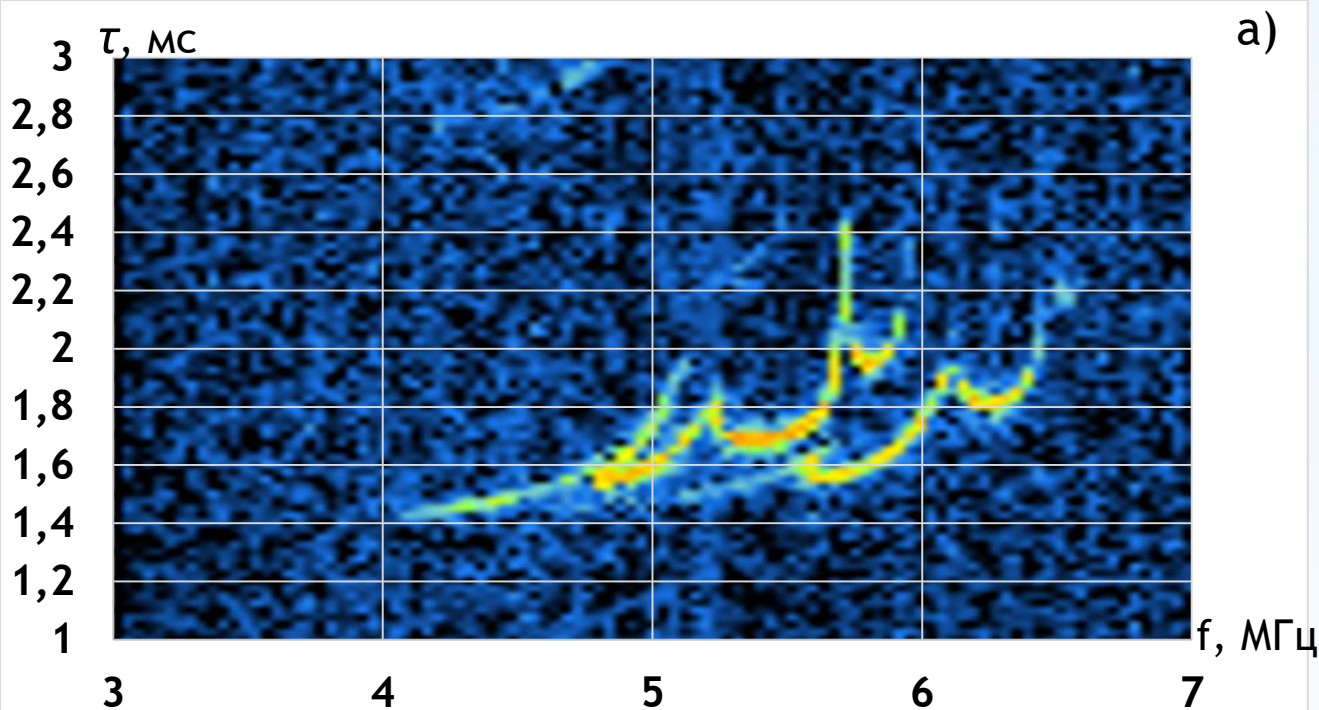
а) Экспериментальный след задержек для О- и Х-компонент, зарегистрированный в 8:38 UTC.



б) Результат моделирования для О-компоненты при положении центра неоднородности $\{56,1^\circ \text{ с.ш.}, 44,95^\circ \text{ в.д.}\}$, что соответствует движению ПИВ в направлении запад-восток.

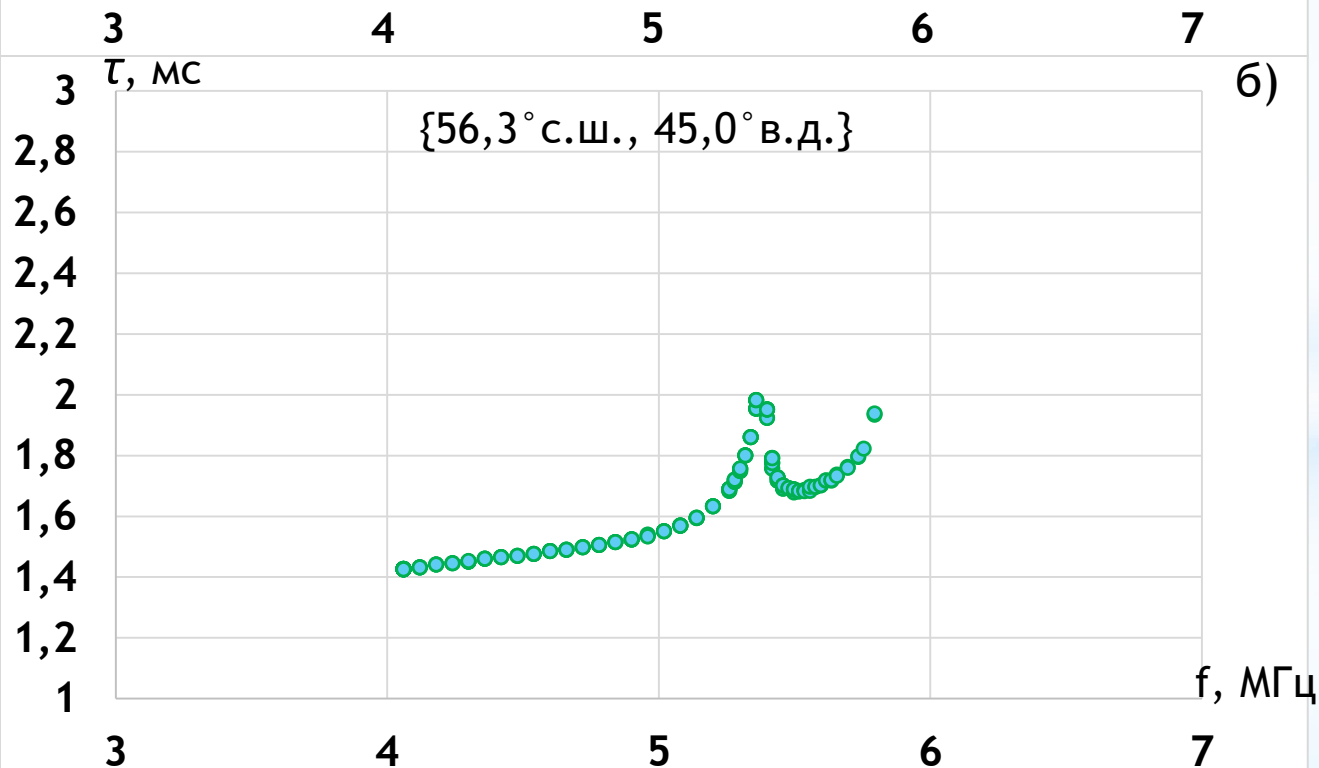
Оценка скорости движения ПИВ составляет $V_x \approx 50 \text{ м/с}$





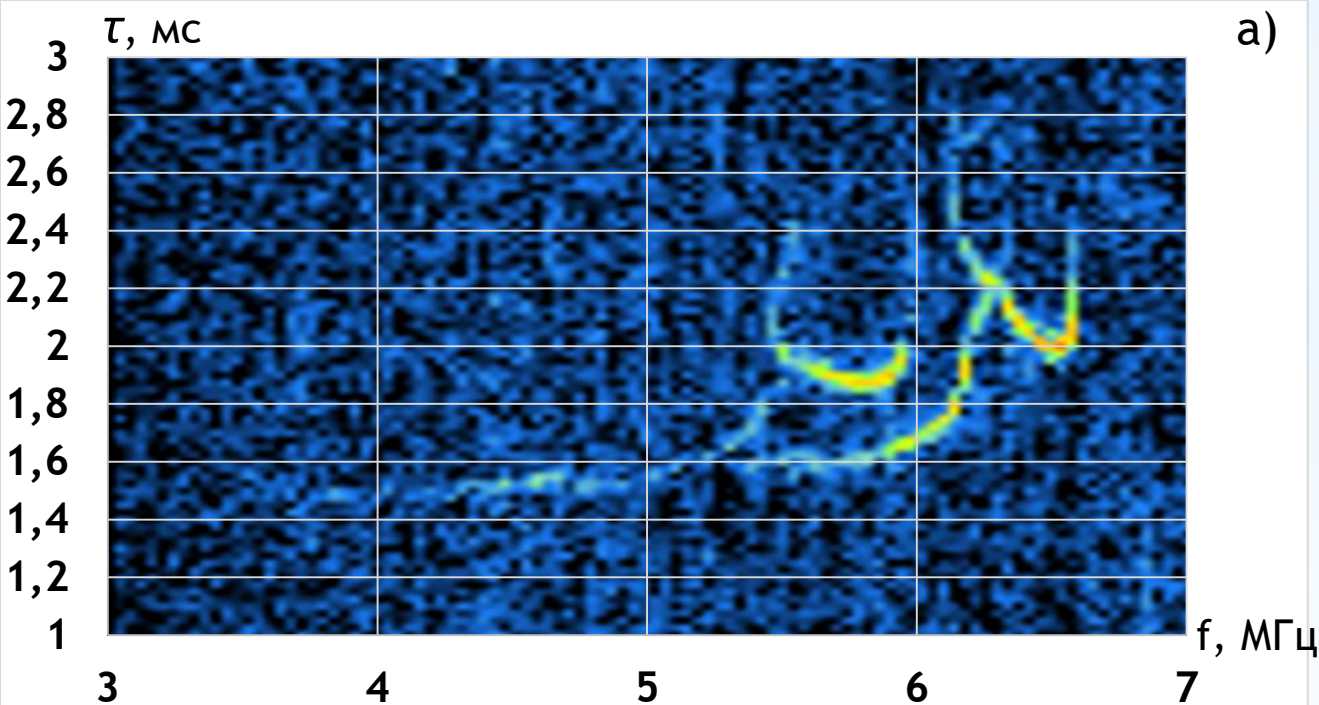
а) Графики временных задержек $\tau(f)$ (в мс) в зависимости от частоты волны (в МГц) для трассы 1.

а) Экспериментальный след задержек для О- и Х-компонент, зарегистрированный в 8:38 UTC.



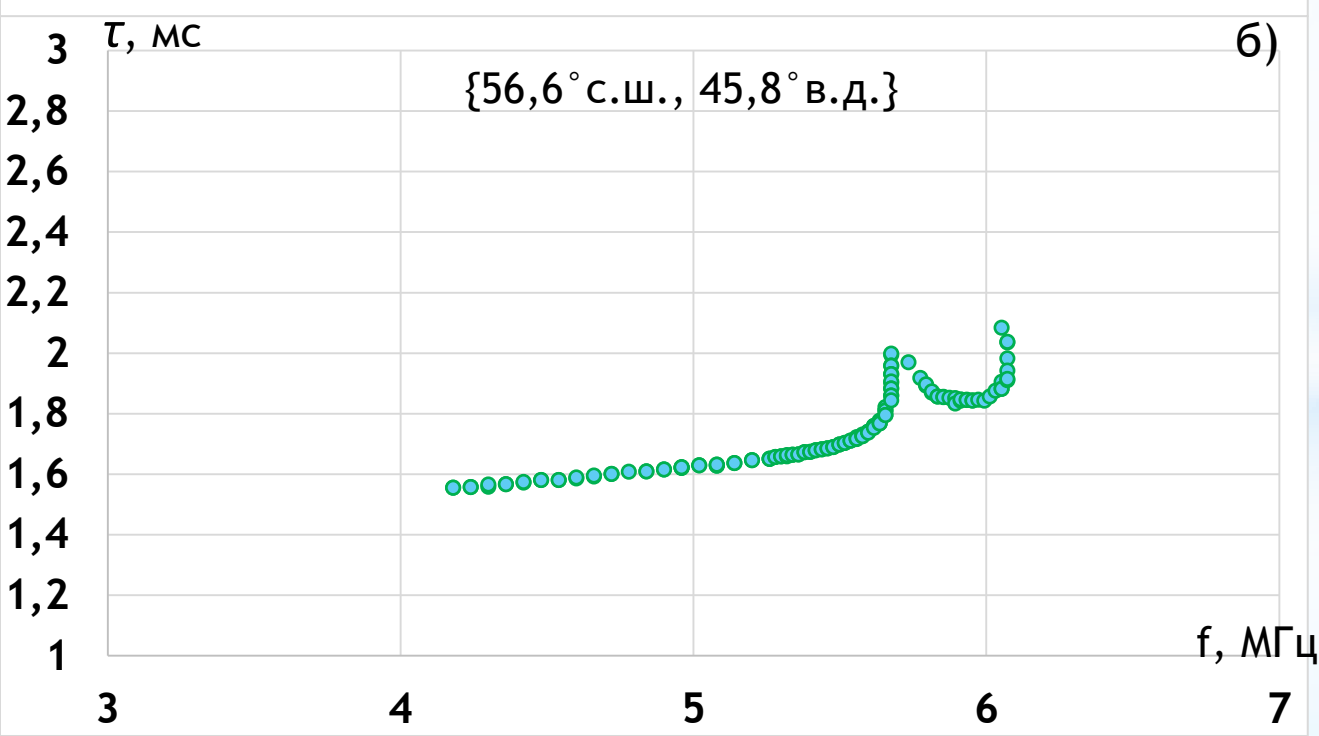
б) Результат моделирования для О-компоненты при положении центра неоднородности $\{56,3^\circ \text{ с.ш.}, 45,0^\circ \text{ в.д.}\}$, что соответствует движению ПИВ в направлении север-юг.

Оценка скорости движения ПИВ составляет $V_y \approx 96 \text{ м/с}$

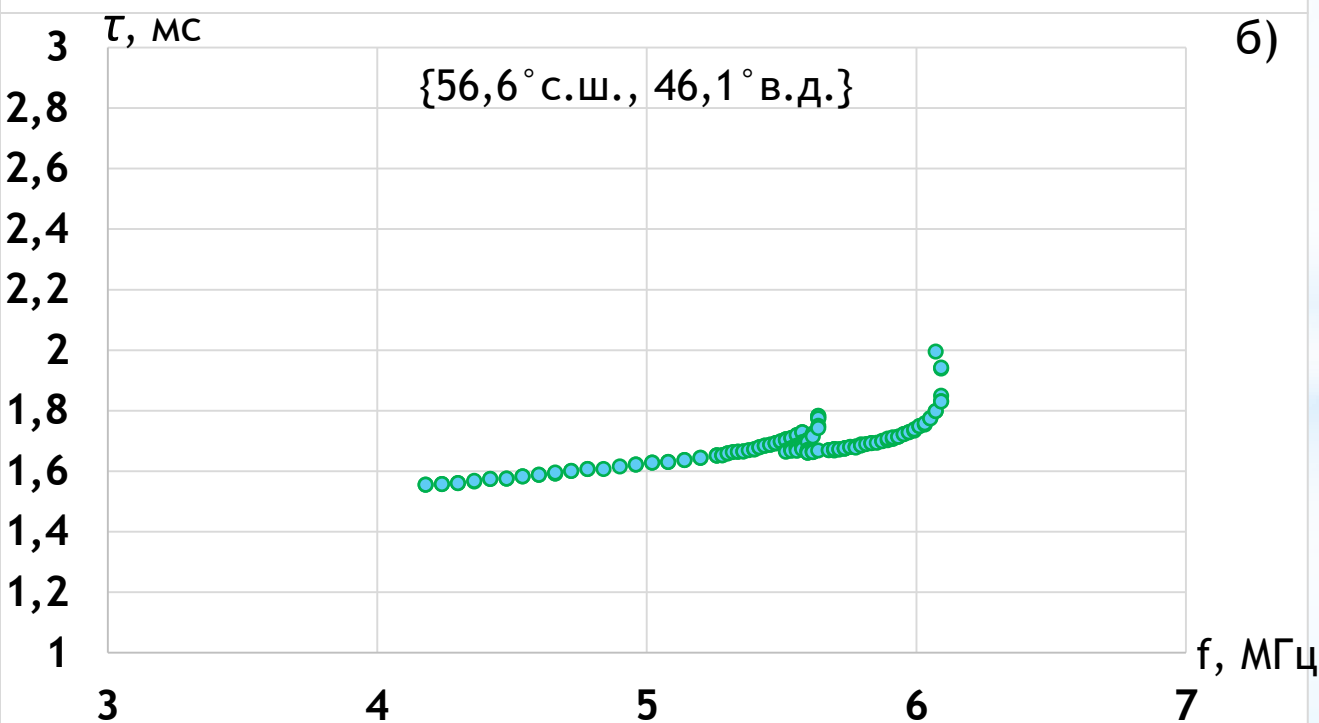
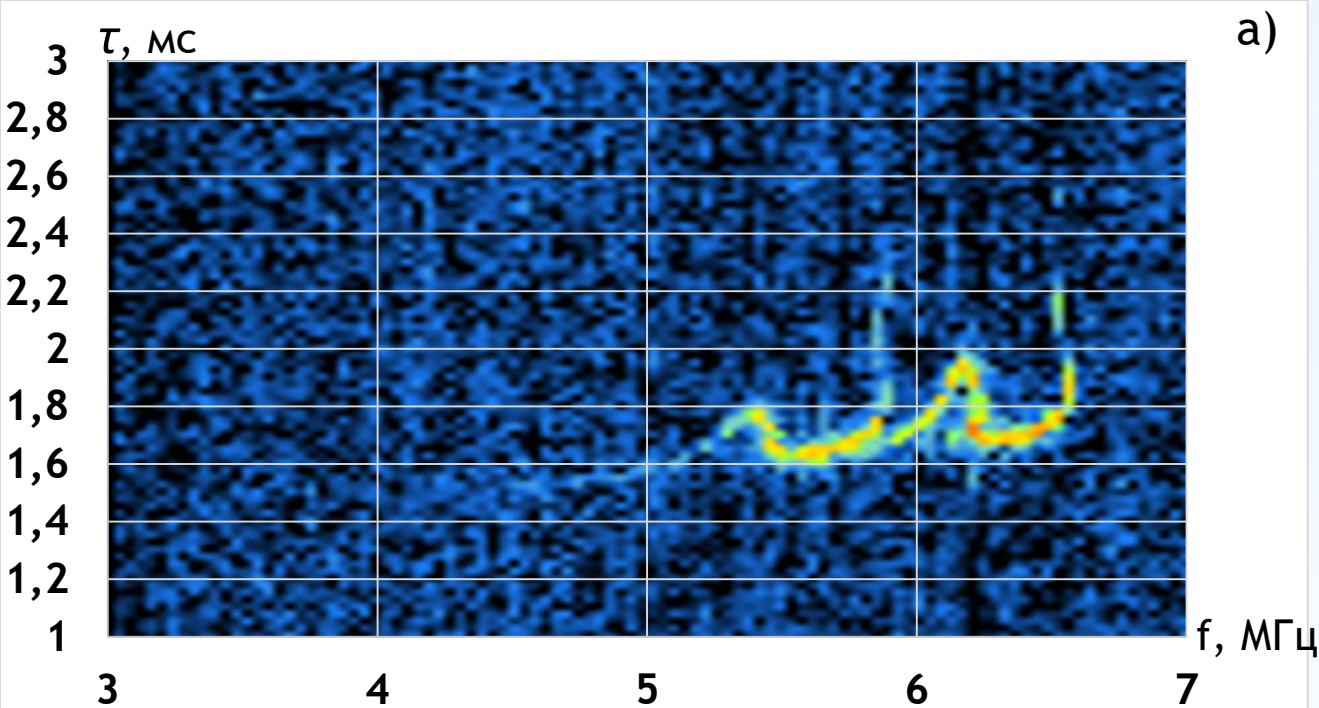


а) Графики временных задержек $\tau(f)$ (в мс) в зависимости от частоты волны (в МГц) для трассы 2.

а) Экспериментальный след задержек для О- и Х-компонент, зарегистрированный в 8:39 UTC.



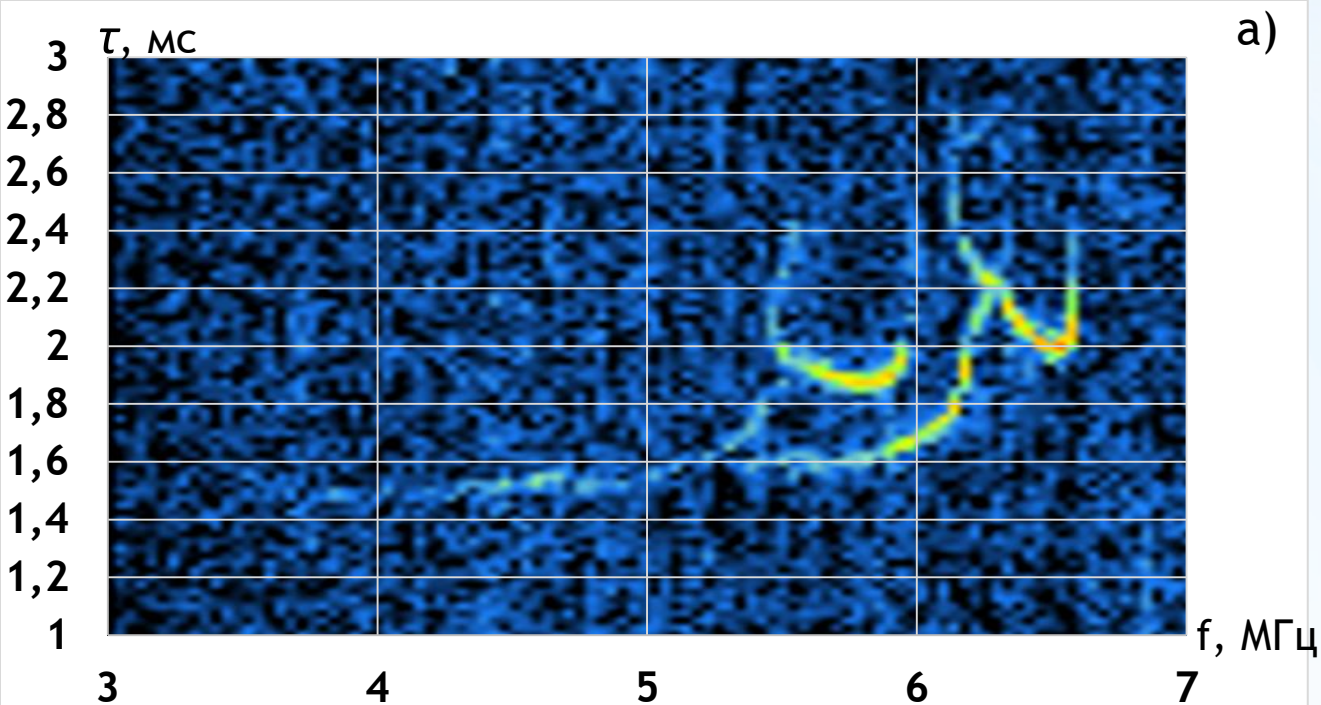
б) Результат моделирования для О-компоненты при положении центра неоднородности {56,6° с.ш., 45,8° в.д.}.



а) Экспериментальный след задержек для О- и Х-компонент, зарегистрированный в 8:42 UTC.

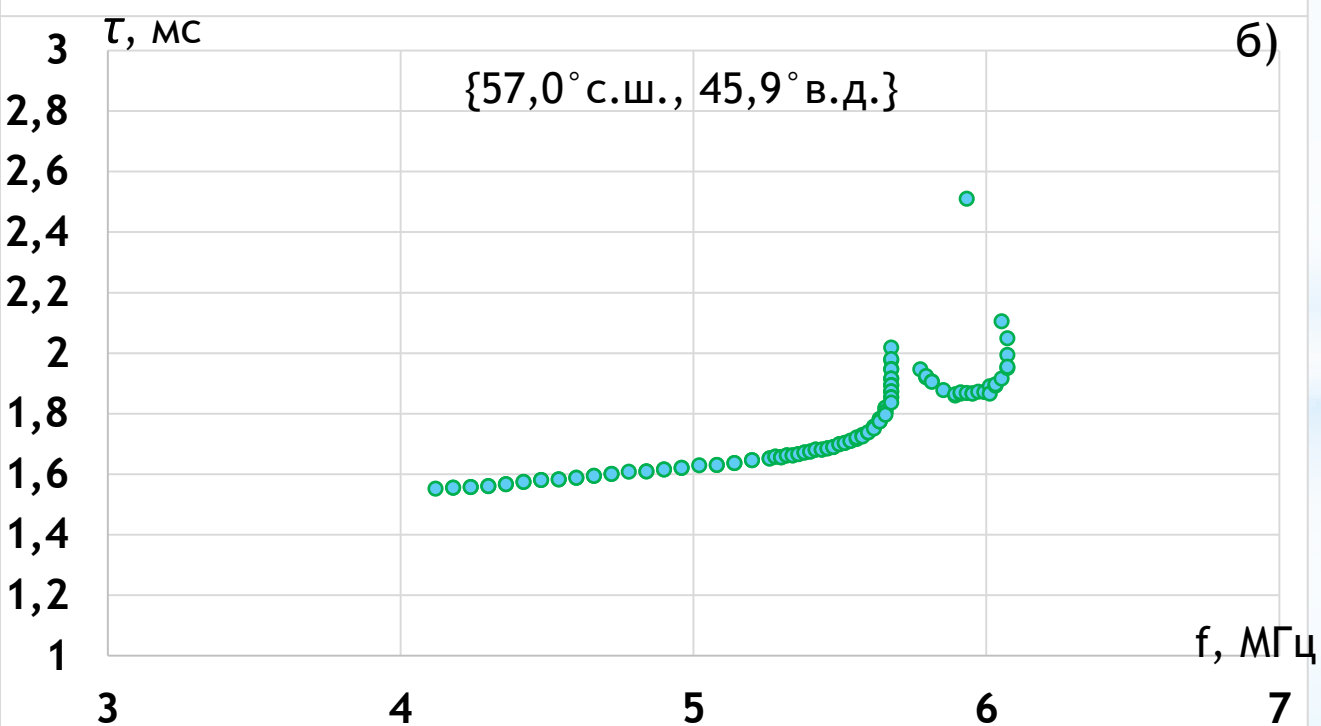
б) Результат моделирования для О-компоненты при положении центра неоднородности $\{56,6^\circ \text{ с.ш.}, 46,1^\circ \text{ в.д.}\}$, что соответствует движению ПИВ в направлении запад-восток.

Оценка скорости движения ПИВ составляет $V_x \approx 249 \text{ м/с}$

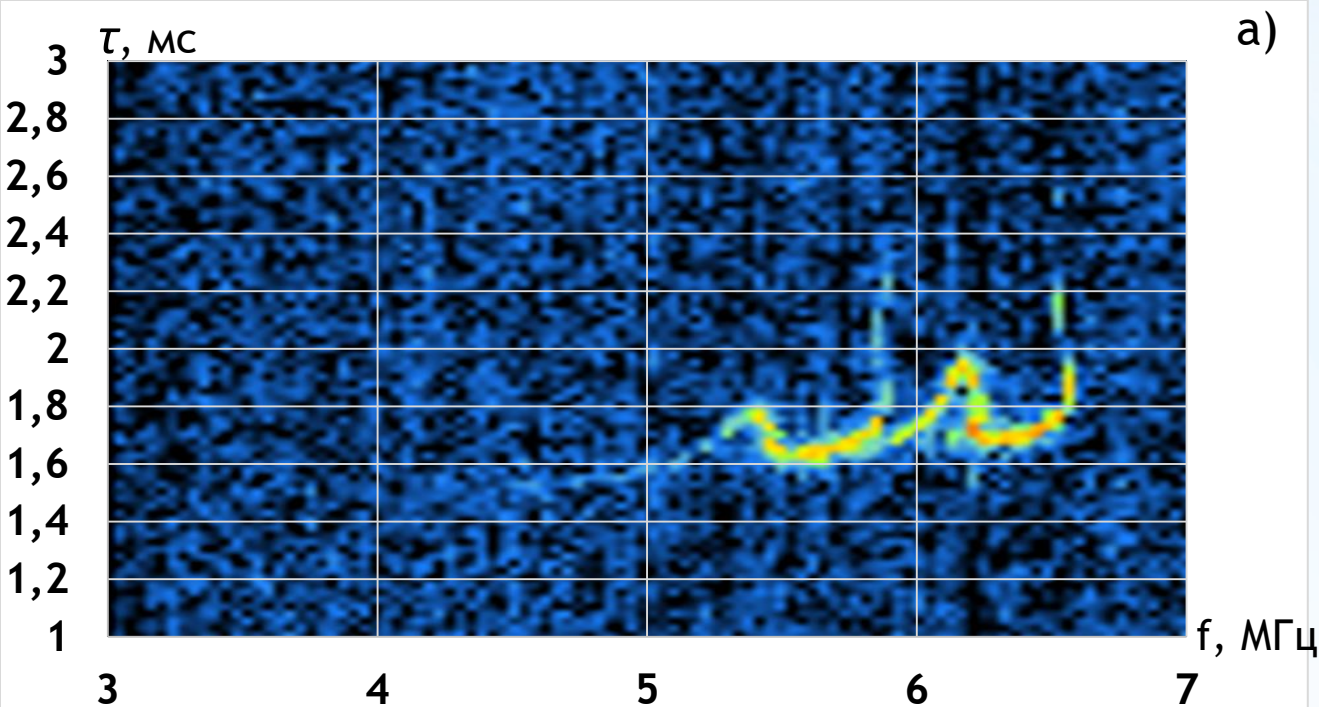


а) Графики временных задержек $\tau(f)$ (в мс) в зависимости от частоты волны (в МГц) для трассы 2.

а) Экспериментальный след задержек для О- и Х-компонент, зарегистрированный в 8:39 UTC.

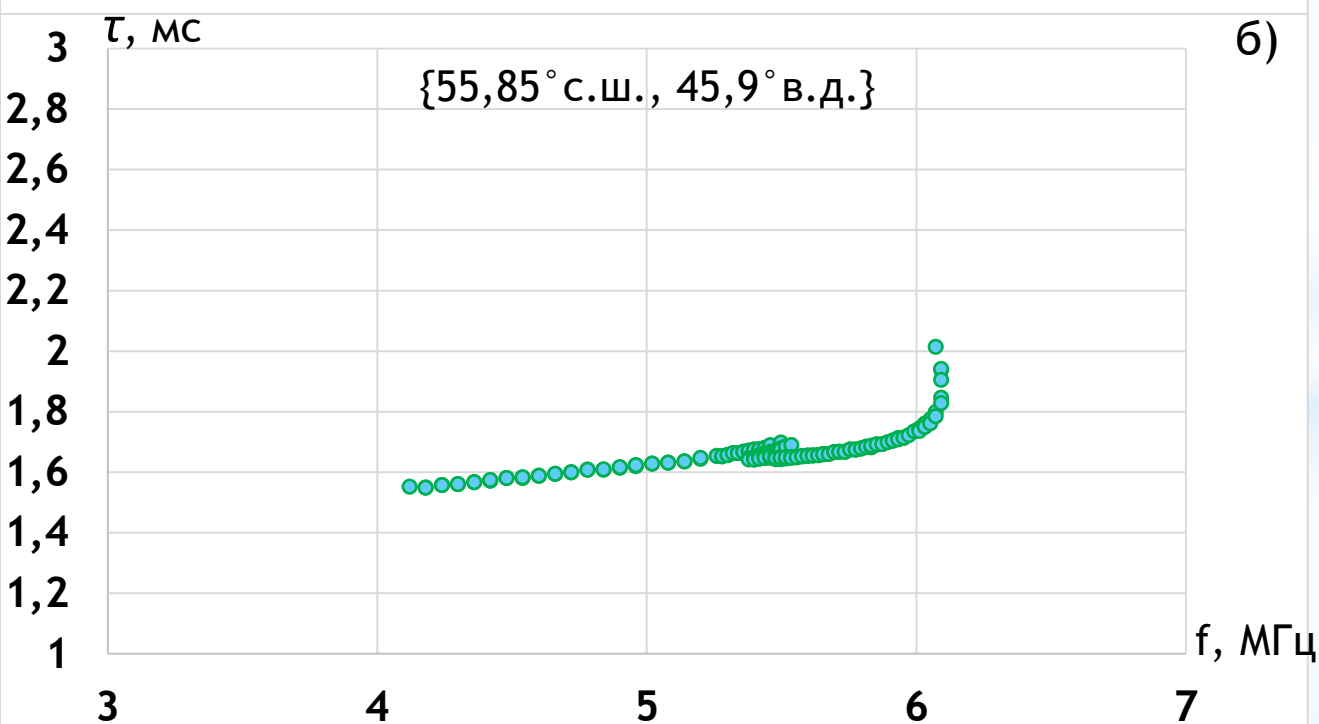


б) Результат моделирования для О-компоненты при положении центра неоднородности {57,0° с.ш., 45,9° в.д.}.



а) Графики временных задержек $\tau(f)$ (в мс) в зависимости от частоты волны (в МГц) для трассы 2.

а) Экспериментальный след задержек для O- и X-компонент, зарегистрированный в 8:42 UTC.



б) Результат моделирования для O-компоненты при положении центра неоднородности $\{55,85^\circ \text{с.ш.}, 45,9^\circ \text{в.д.}\}$, что соответствует движению ПИВ в направлении север-юг.

Оценка скорости движения ПИВ составляет $V_y \approx 398 \text{ м/с}$

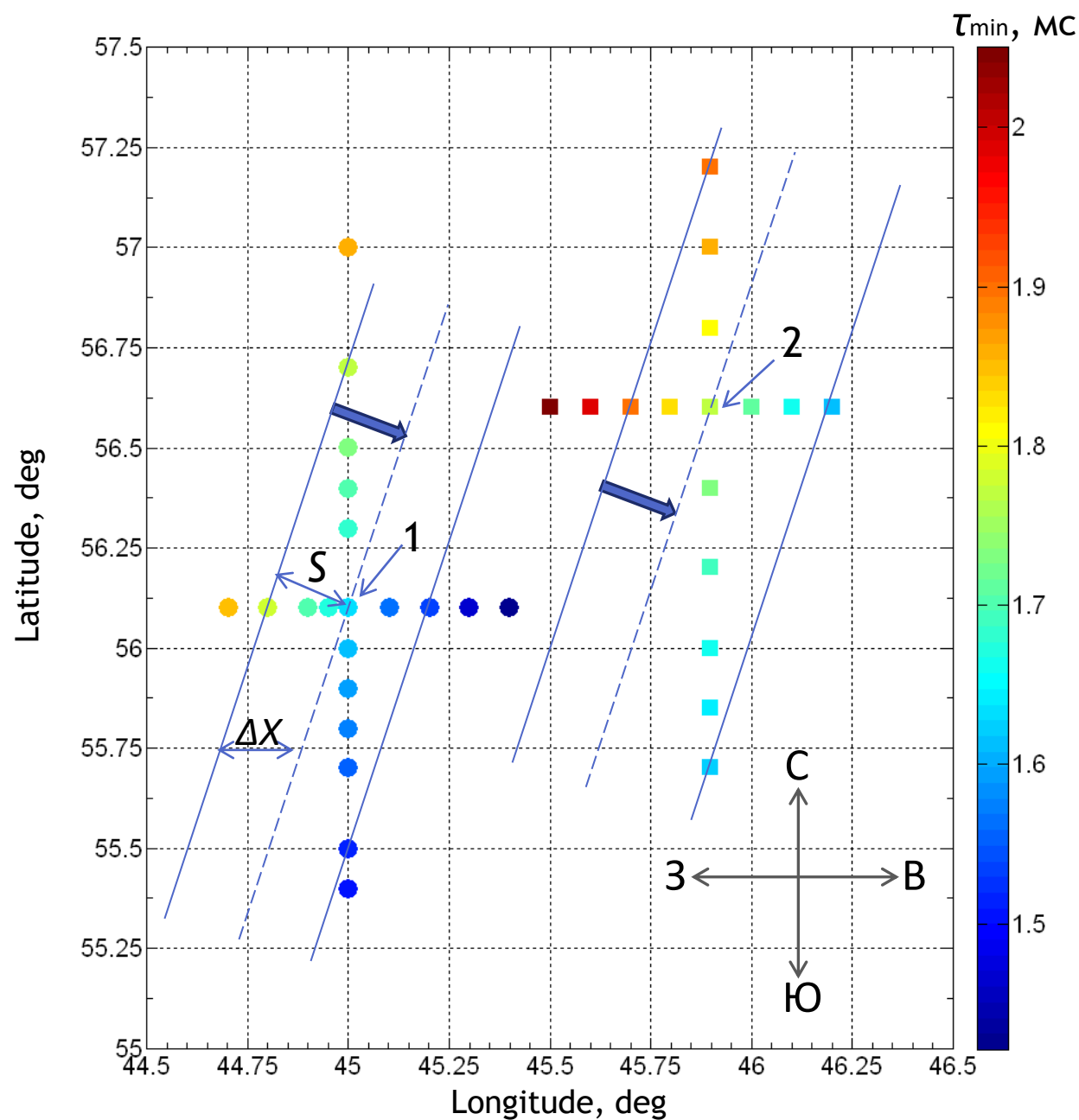
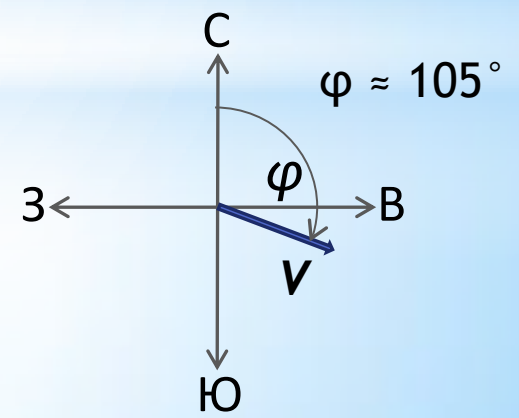


Схема расположения проекций областей минимумов временных задержек τ_{\min} характерной петли ПИВ в зависимости от географических координат для двух трасс.

1- средняя точка трассы 1
 2- средняя точка трассы 2
 красный цвет - появление ПИВ;
 синий цвет - исчезновение ПИВ

Угол, определяющий направление перемещения ПИВ:



$$S = \Delta X * \cos(\varphi - 90^\circ) = \Delta Y * \sin(\varphi - 90^\circ), \quad |V| = S / \Delta t, \quad \Delta t = 3 \text{ мин}$$

$$|V_1| = 64 \text{ м/с} \quad |V_2| = 103 \text{ м/с}$$

Выводы:

1. Траекторные расчеты КВ радиоволн на слабонаклонных трассах при наличии ПИВ позволяют добиться подобия результатов моделирования измеренным ДЧХ и сделать выводы о форме, направлении перемещения и скорости движения неоднородности (ПИВ).
2. Динамика поведения ПИВ показывает, что регистрируемое снижение минимума временной задержки (эквивалентно действующей высоте) ПИВ со временем соответствует смещению области неоднородности в направлении с запада на восток и с севера на юг, соответственно. Установлено, что 19.12.2019 в полуденные часы ПИВ движется с северо-запада на юго-восток.
3. Определен средний по двум трассам модуль скорости ПИВ:
 $|V| \approx 85 \text{ м/с}$
4. Полученные результаты достаточно хорошо согласуются с результатами аналогичных работ по моделированию и определению направления движения ПИВ. При этом качественное отличие заключается в том, что в данной работе использовались экспериментальные данные не по одной, а сразу по двум синхронным трассам, что позволило выявить общие особенности поведения ПИВ в зависимости от направления движения неоднородности на двух трассах одновременно.

Спасибо за внимание!