



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

¹ННГУ им. Н.И. Лобачевского,

²ВГУВТ

Моделирование распространения КВ
радиоволн на трассе Кипр-Нижний Новгород
при регистрации z-образных ПИВ

Представлены результаты моделирования распространения КВ радиоволн на длинной трассе среднеширотной ионосферы во время регистрации перемещающегося ионосферного возмущения (ПИБ) Z-типа. В качестве исходных данных использовались дистанционно-частотные характеристики (ДЧХ) наклонного зондирования ионосферы, полученные во время специального эксперимента по работе ЛЧМ ионозонда 20 июля 2023 г. и профили электронной концентрации, полученные с помощью модели IRI. Моделирование проводилось для трассы ЛЧМ-сигналов Кипр - Нижний Новгород, которые излучались последовательно с интервалом 5 минут.

Моделирование распространения декаметровых волн проводилось в приближении геометрической оптики. Выполнялся расчет траекторий лучей волн, распространяющихся в плавно-неоднородной магнитоактивной ионосферной плазме в присутствии ПИВ. Для обыкновенной и необыкновенной волны решались характеристические лучевые уравнения в сферической системе координат, которая была связана с реальной сферической географической системой координат. В расчетах использовались постоянные вдоль трассы значения характеристик магнитного поля: наклонение геомагнитного поля 63.5° , склонение 7.3° , гирочастота 1.26 МГц, что соответствует значениям, взятым в средней точке трассы моделирования по модели IGRF.

Модель ПИВ в виде цуга волн.

Возмущение профиля электронной концентрации (неоднородность) при прохождении ПИВ моделировалось гармонической функцией (плоской волной с длиной волны L , масштаб которой ограничен по высоте экспонентой):

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

$$\text{при } -n \frac{L}{4} \leq x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta \leq m \frac{L}{4} \quad (1)$$

$$N(x, y, z) = N_0(z) \text{ при } x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta < -n \frac{L}{4}$$

$$\text{и } x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta > m \frac{L}{4} \quad (2)$$

где $\frac{2\pi}{L} (x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta) = \mathbf{k} \mathbf{r}$, где

\mathbf{k} – волновой вектор, \mathbf{r} – радиус-вектор в локальной декартовой системе координат с центром ($x = y = z = 0$), совпадающим с центром неоднородности (высота центра неоднородности над поверхностью Земли $H=250$ км); ось x направлена с востока на запад, ось y – с севера на юг; z – по вертикали; $N_0(z)$ – значение электронной концентрации в невозмущенной ионосфере (невозмущённый профиль).

Параметры неоднородности:

δ – относительная амплитуда неоднородности;

L – характерный масштаб (пространственный период) неоднородности;

α – угол, определяющий направление распространения волны в азимутальной плоскости и отсчитываемый от направления оси x к оси y ;

β – высотный угол наклона фронта волны (отсчитывается от плоскости горизонта);

p – четная степень экспоненциального ограничения возмущения профиля по z ;

d – масштаб экспоненциального ограничения возмущения профиля по z ;

n и m – натуральные числа, определяют в сумме пространственный размер ПИВ с общим числом четверть-периодов $q = m + n$.

Параметры моделирования

Профиль электронной концентрации в невозмущенной ионосфере (без ПИВ) был взят по данным IRI2016 для 04:00 UTC 20.07.2023.

Максимум F2-слоя невозмущенной ионосферы находится на высоте 295 км

Длина трассы Кипр-Нижний Новгород: 2492 км

Азимут (отсчитывается от направления на север по часовой стрелке) из пункта передачи в пункт приема: 15°

Координаты Кипра: 35.02 с.ш., 33.77 в.д.

Координаты средней точки: 45.67 с.ш., 38.895 в.д.

Координаты НН: 56.32 с.ш., 44.02 в.д.

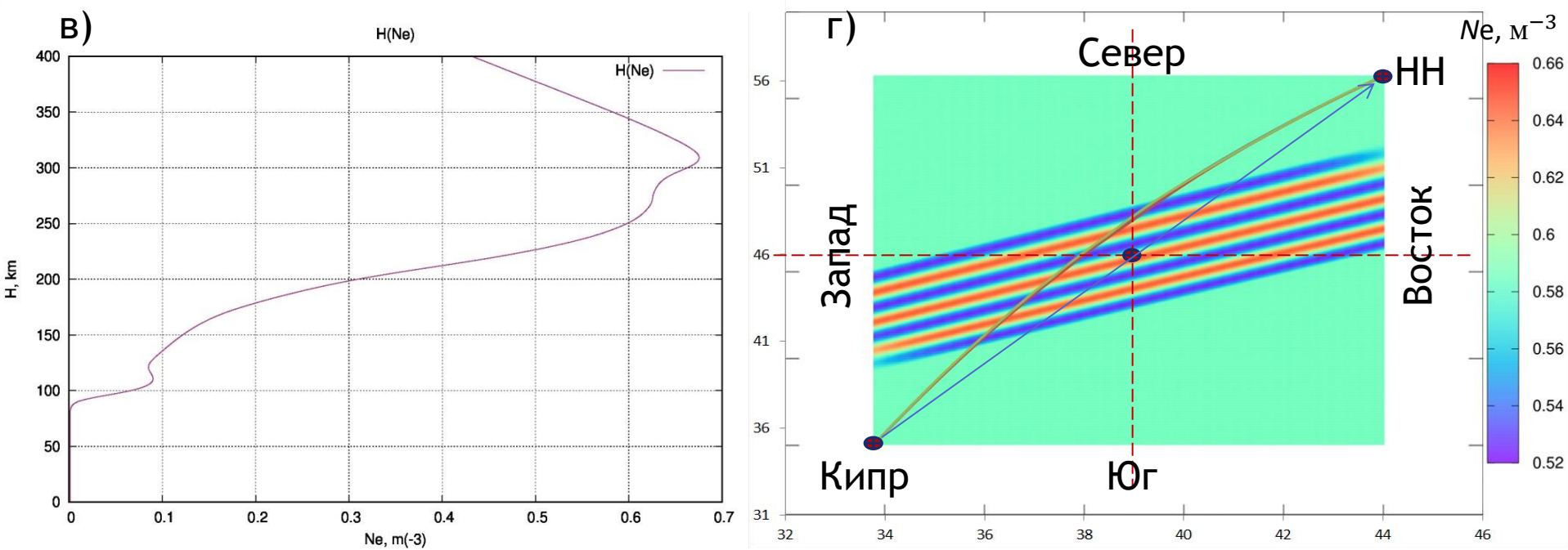
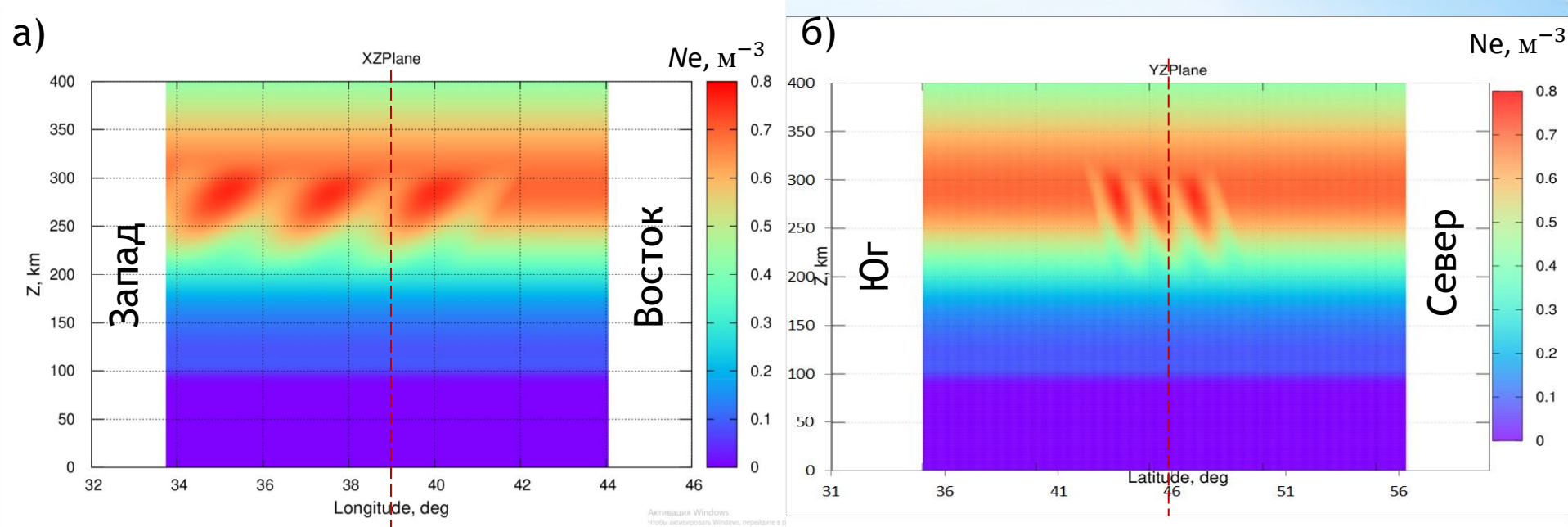
При моделировании перемещение фронта плоской волны задавалось сдвигом центра неоднородности (при $H=\text{const}$) вдоль линии широты средней точки трассы с запада на восток (вдоль оси x).

Неоднородность имеет большую протяженность в направлении, перпендикулярном волновому вектору k , т.е. углы α и β , задающие направление вектора k , определяют положение плоскости распространения волны в пространстве. Моделирование перемещения неоднородности посредством движения ее центра в горизонтальном направлении (при $H=\text{const}$) означает, что данная плоскость перемещается как единое целое, что 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.

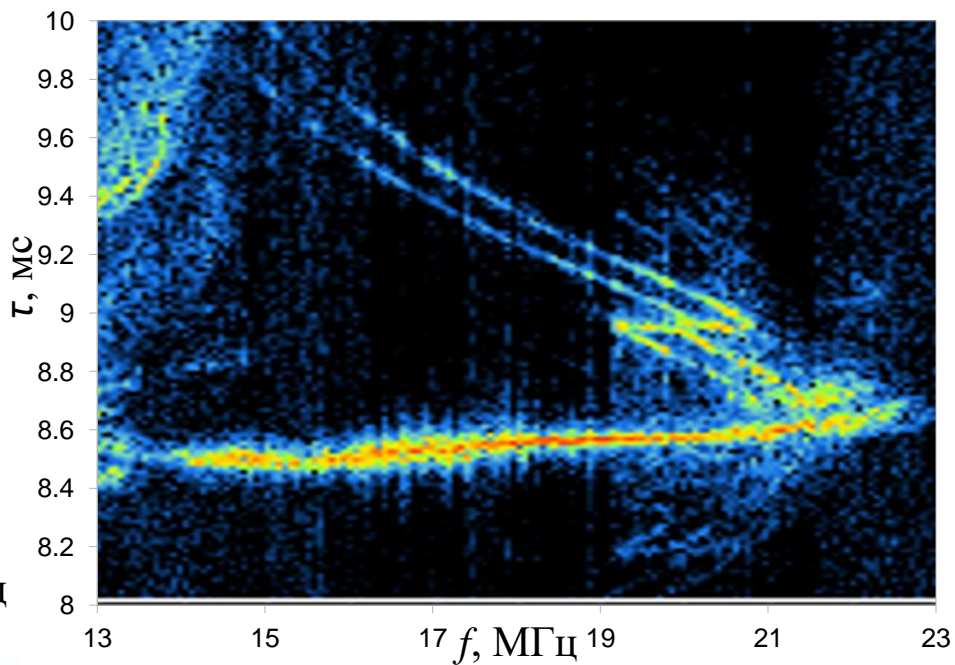
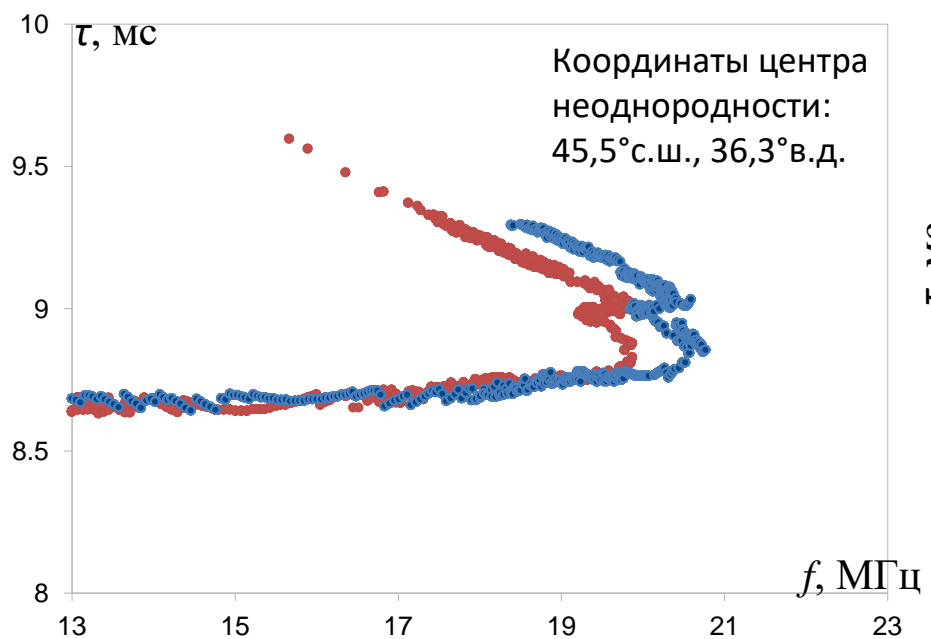
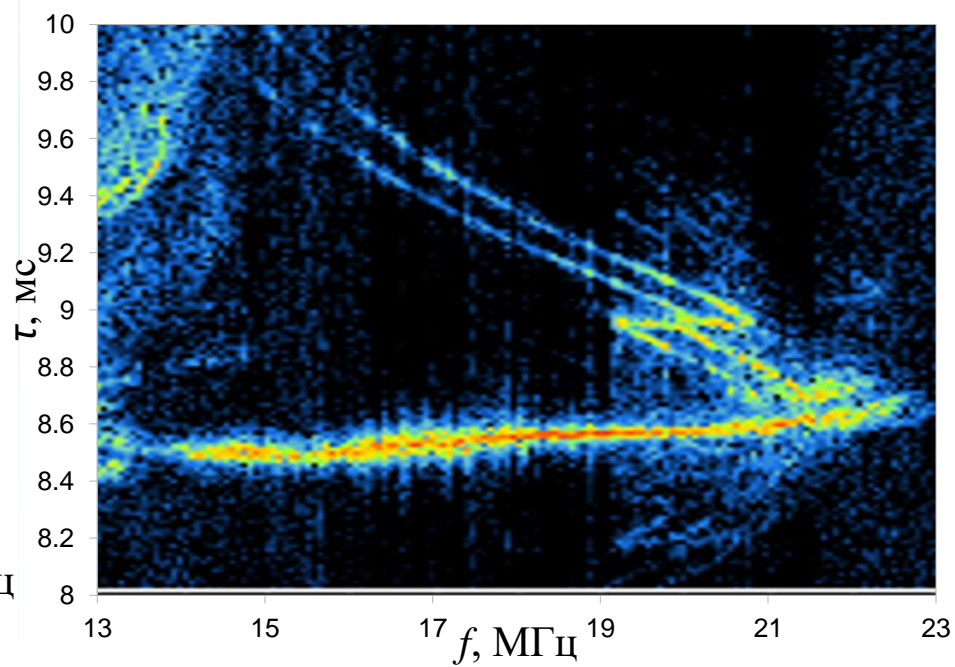
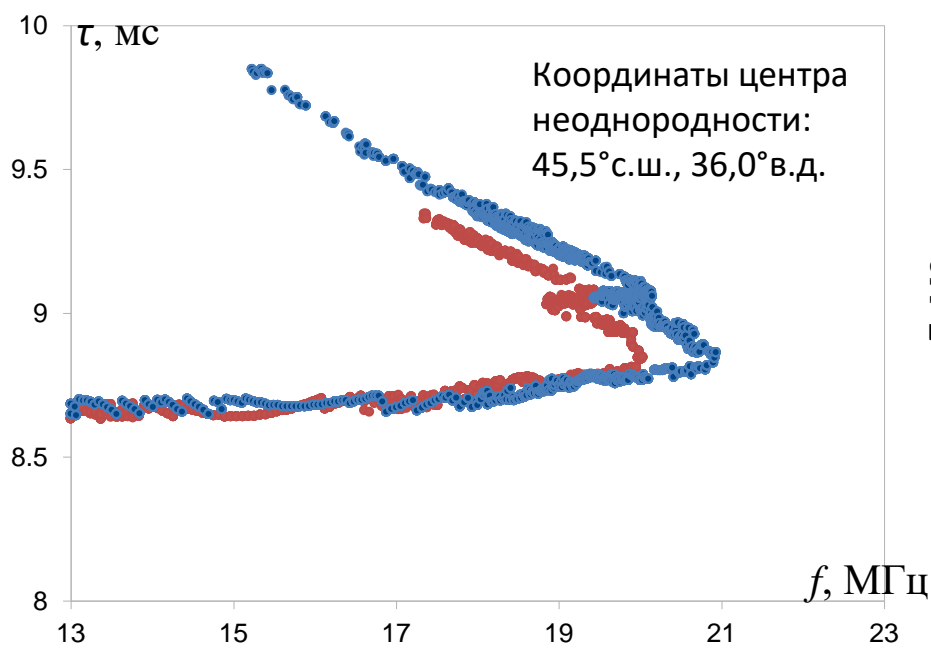
Таким образом, рассматривается качественно динамика перемещения ПИВ в направлении с запада на восток в соответствии с динамикой снижения значений экспериментальных временных задержек Z-образного участка следа ДЧХ при следующих значениях параметров ПИВ:

$$\delta = 0.1, \alpha = -45^\circ (\gamma = 60), \beta = 45^\circ, H = 250 \text{ км}, L = 100 \text{ км}, d = 50 \text{ км}, p = 6, n = 7, m = 7 (q = 14)$$

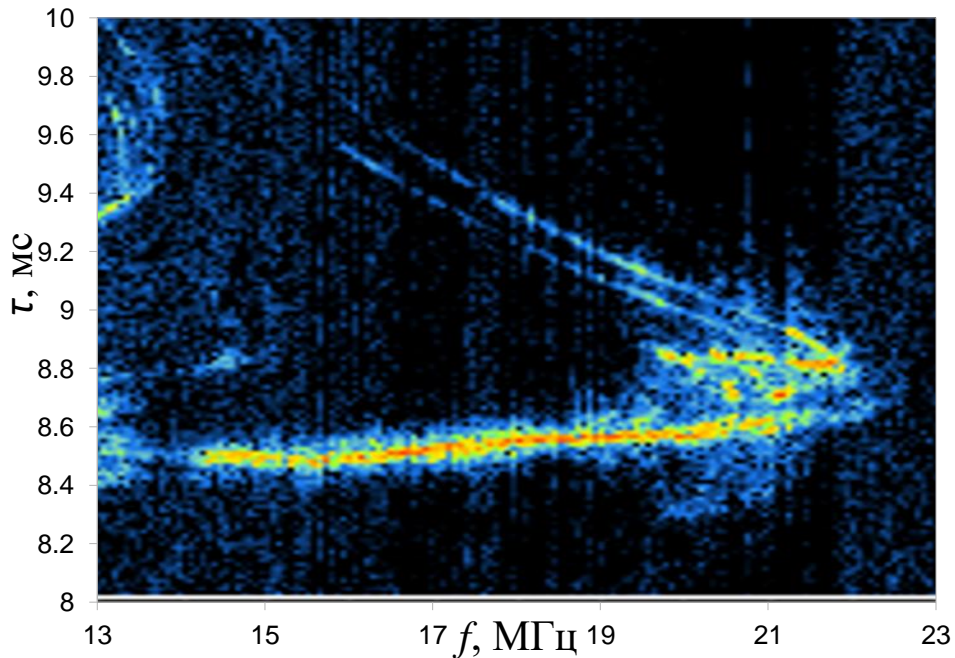
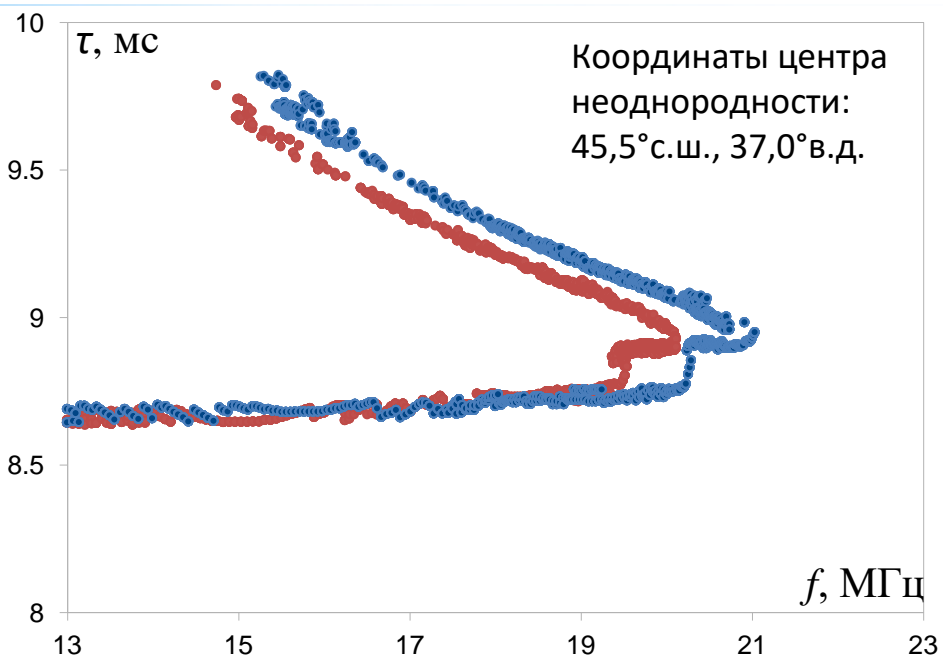
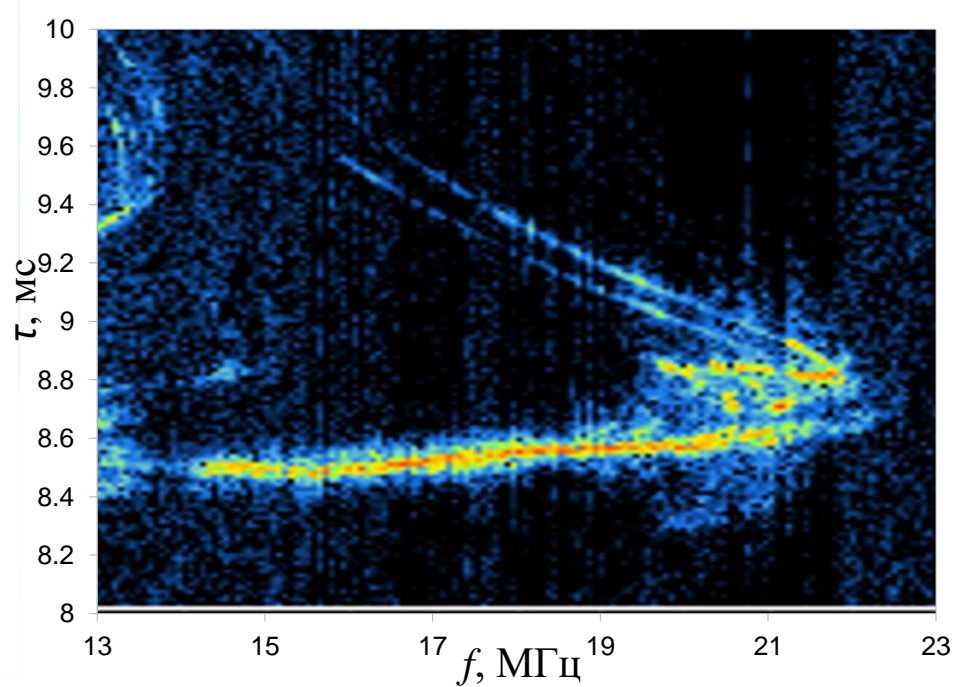
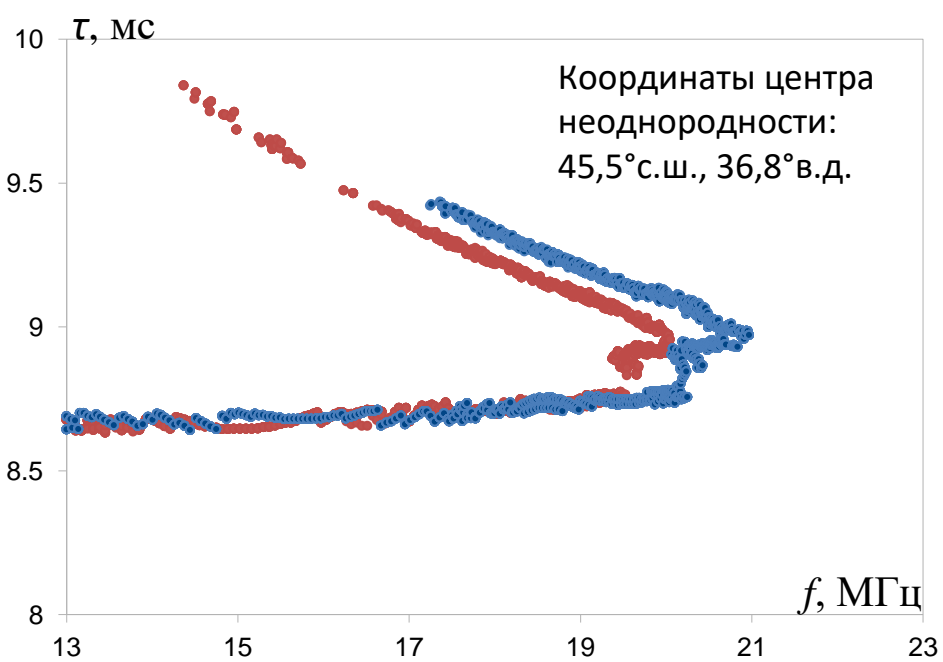
γ – относительный азимут, т. е. угол между трассой и направлением распространения ПИВ в горизонтальной плоскости.



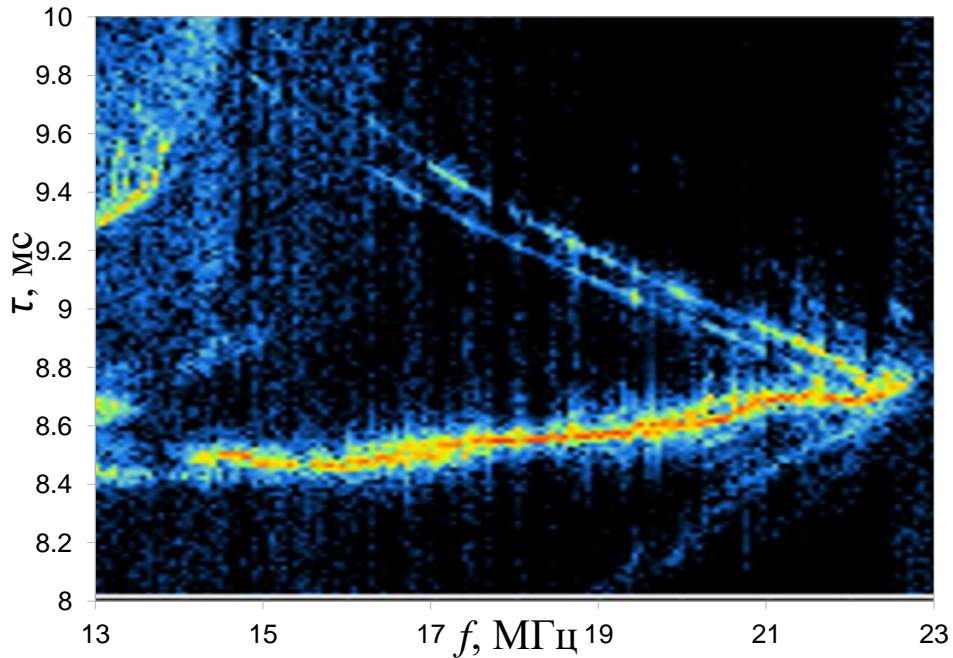
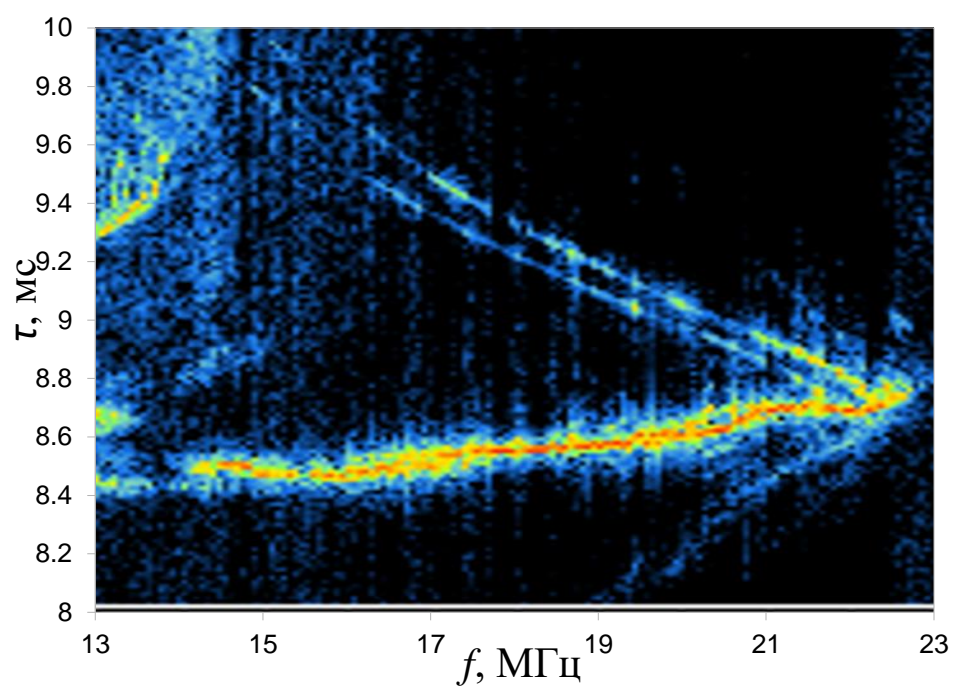
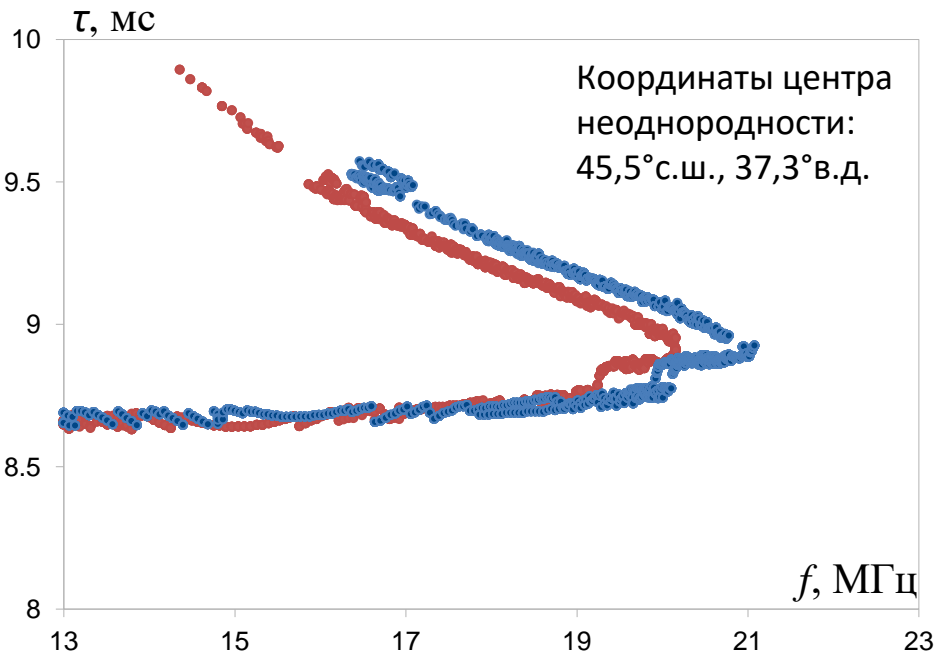
Распределение электронной плотности: а) в широтной плоскости; б) в плоскости меридиана; в) профиль электронной концентрации $Ne(z)$ в средней точке трассы; г) в горизонтальной плоскости на



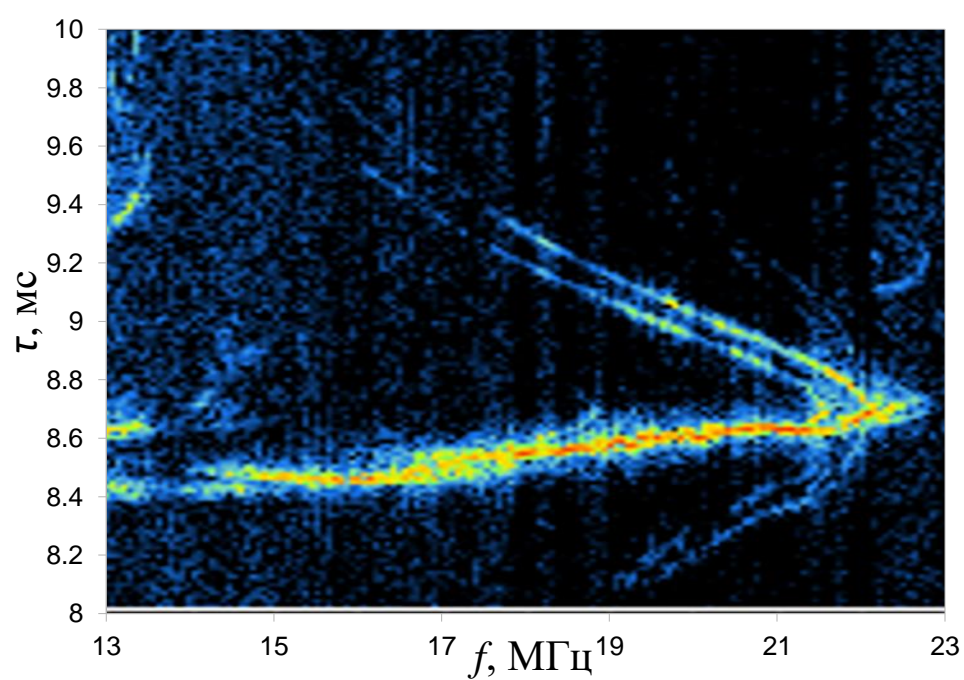
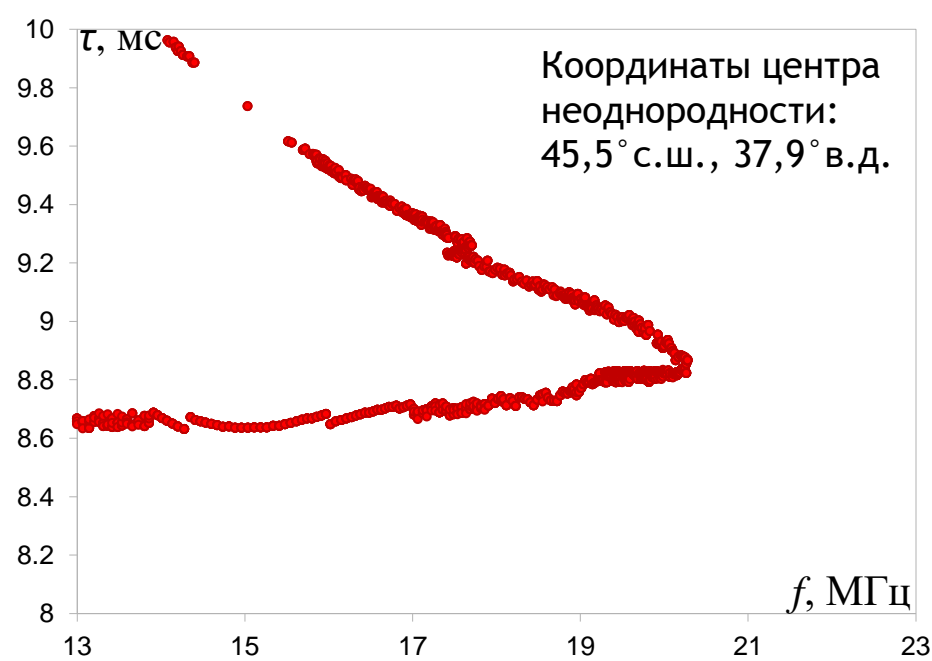
Графики временных задержек $\tau(f)$ в зависимости от частоты волны f для O- и X- мод: слева - расчеты моделирования; справа - экспериментальный след задержек (ДЧХ), зарегистрированный в 4:05 UTC.



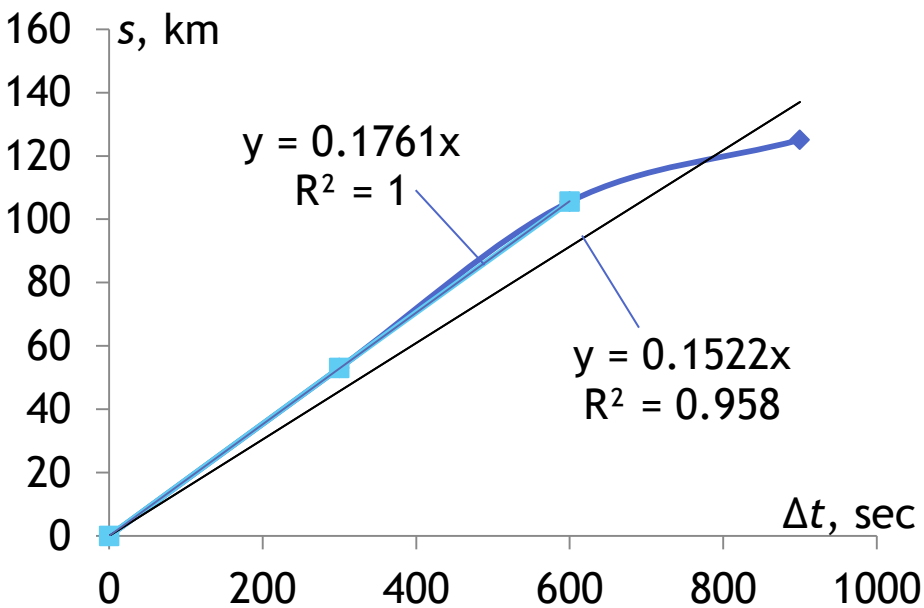
Графики временных задержек $\tau(f)$ в зависимости от частоты волны f для O- и X- мод: слева - расчеты моделирования; справа - ДЧХ, зарегистрированная в 4:10 UTC.



Графики временных задержек $\tau(f)$ в зависимости от частоты волны f для O- и X- мод: слева - расчеты моделирования; справа - ДЧХ, зарегистрированная в 4:15 UTC.



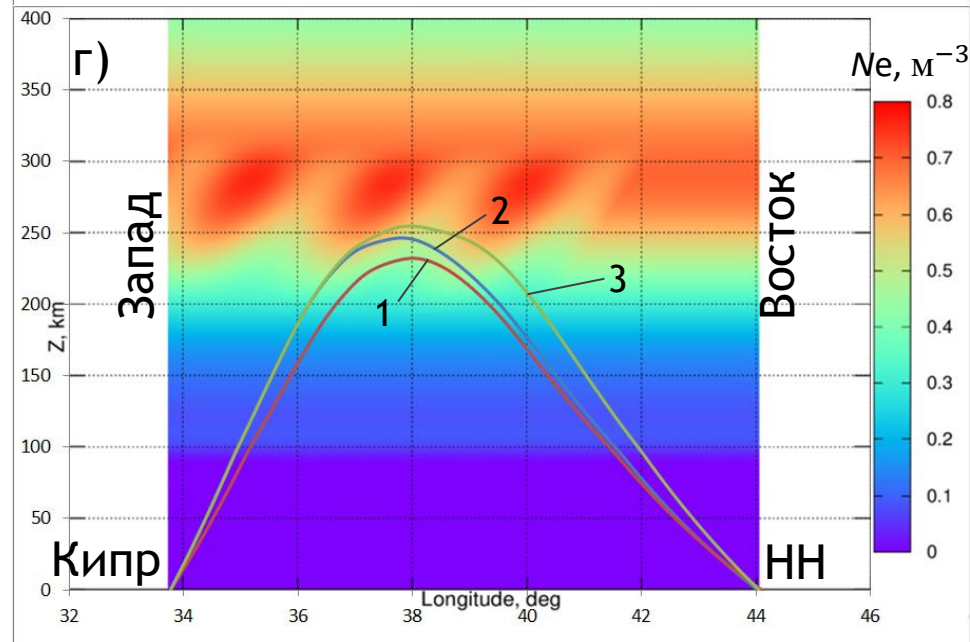
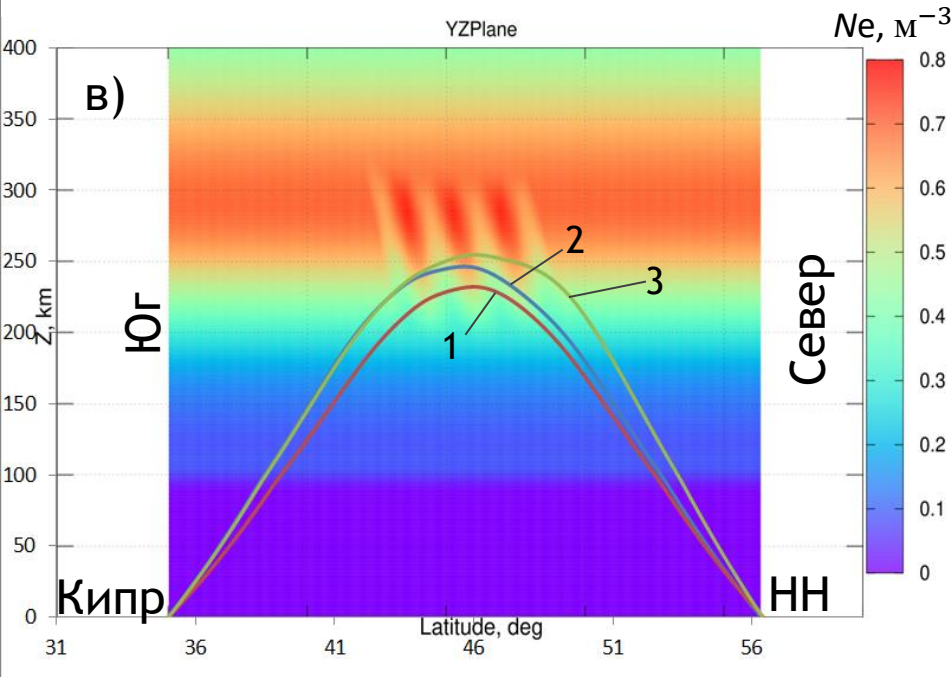
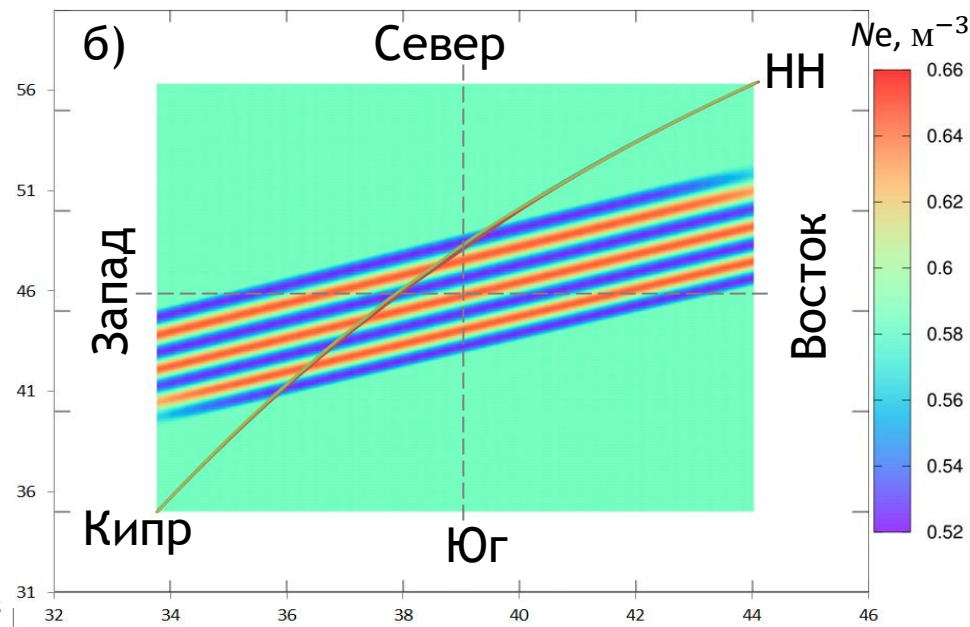
Графики временных задержек $\tau(f)$ в зависимости от частоты волны f для О-моды: слева - расчеты моделирования; справа - ДЧХ, зарегистрированная в 4:20 UTC.



φ , deg	s , km	Δt , min	Δt , sec
36	0	0	0
36.8	53.04979	5	300
37.6	105.549	10	600
37.9	125.0921	15	900

Оценочное значение компоненты скорости перемещения ПИВ в направлении оси X (с запада на восток):

$$V_x = 176,1 \text{ м/с}$$

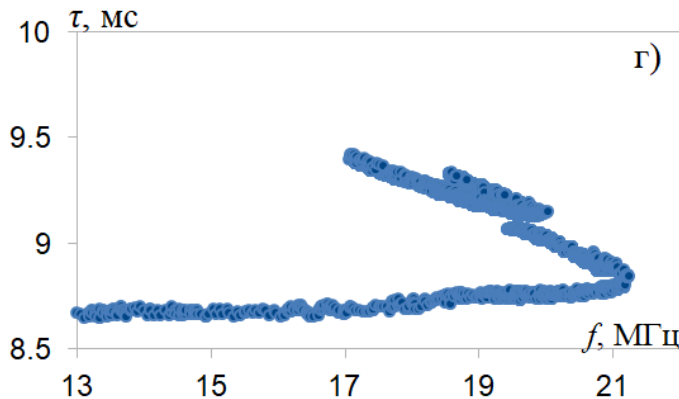
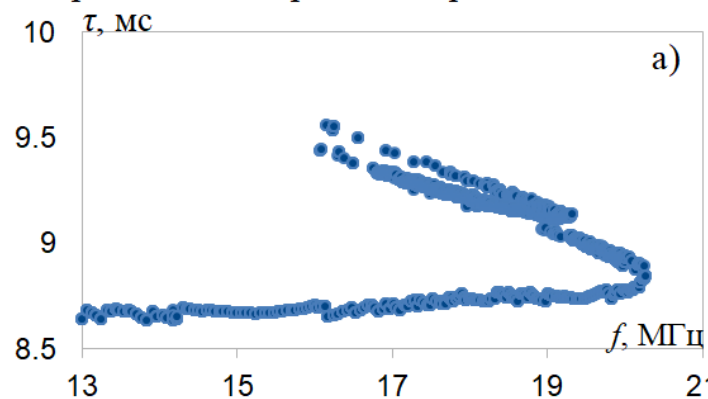


а) Расчет моделирования временных задержек $\tau(f)$ (в мс) для О-моды; Проекции лучей в трех плоскостях: б) горизонтальной, при $z = 250 \text{ км}$; в) меридианальной; г) широтной; (серым пунктиром показаны соответствующие сечения указанными выше плоскостями).

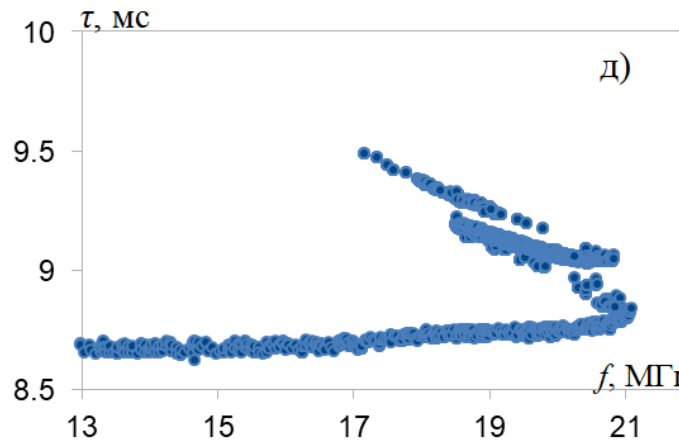
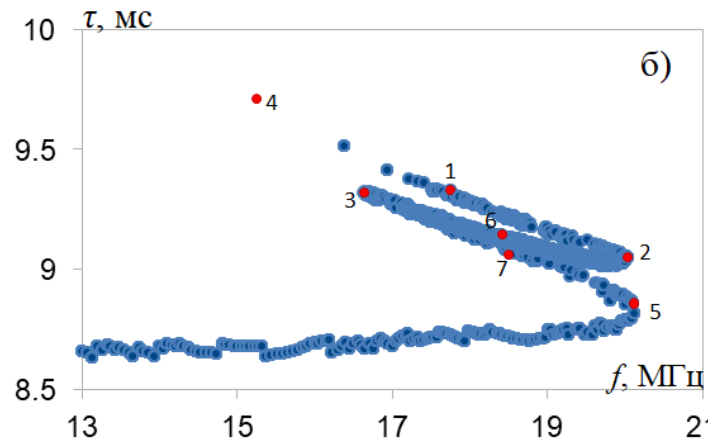
Расчетная ДЧХ для волны О-моды (а-в) и Х-моды (г-е) при перемещении центра ПИВ с запада на восток.

$L=100$ км, $d=50$ км,
 $\alpha=-45^\circ$ ($\gamma=30^\circ$),
 $\beta=60^\circ$, $n=7$, $m=7$
($q=14$). Красные точки на графиках б) и е) соответствуют частотам лучей, траектории которых показаны на след. слайде

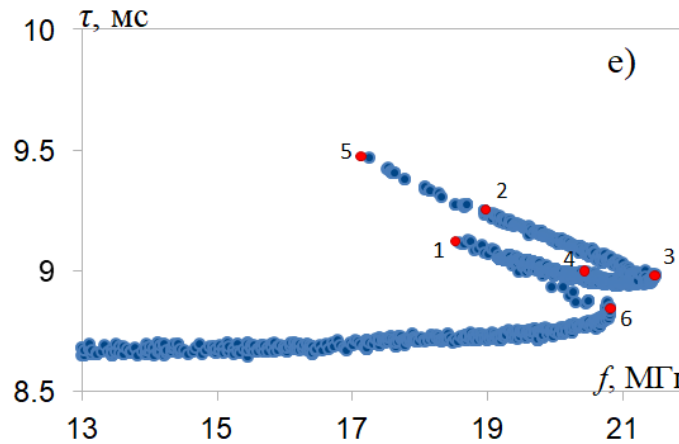
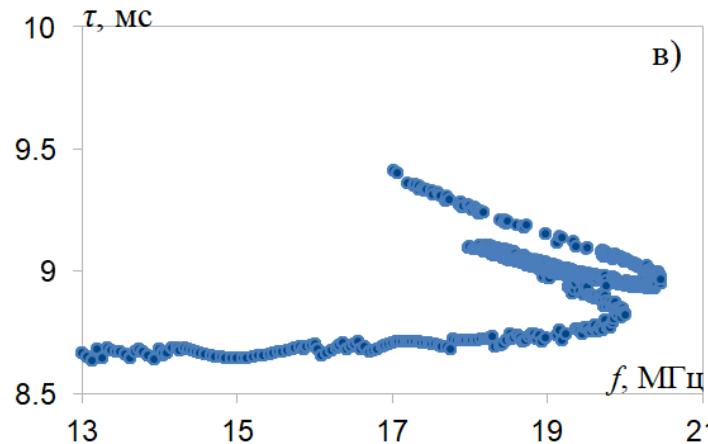
Координаты центра неоднородности: $45,5^\circ$ с.ш., $36,5^\circ$ в.д.

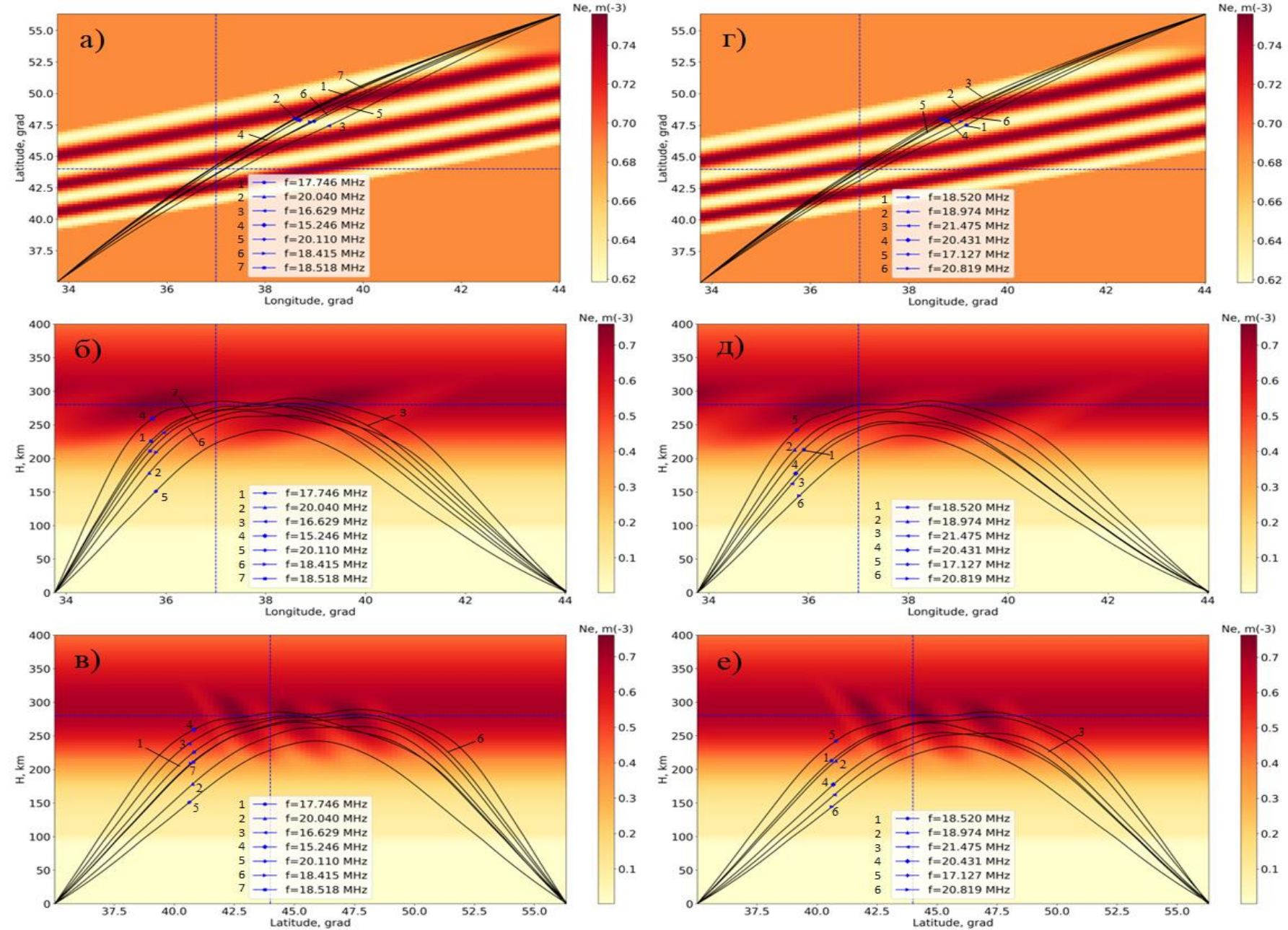


Координаты центра неоднородности: $45,5^\circ$ с.ш., $37,0^\circ$ в.д.



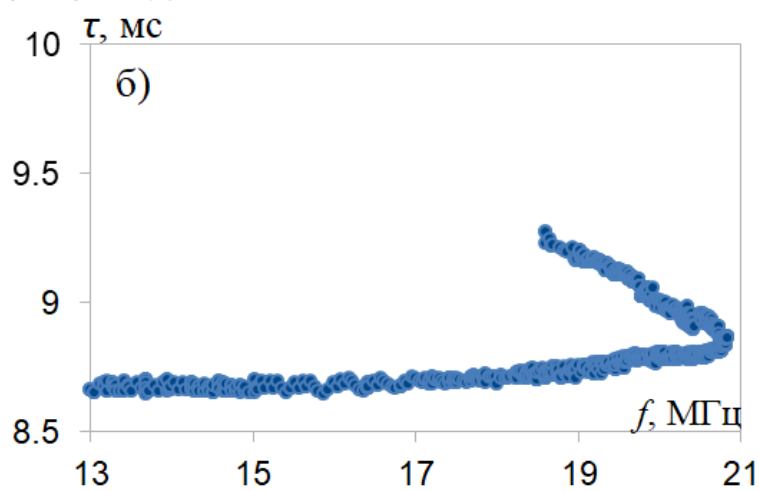
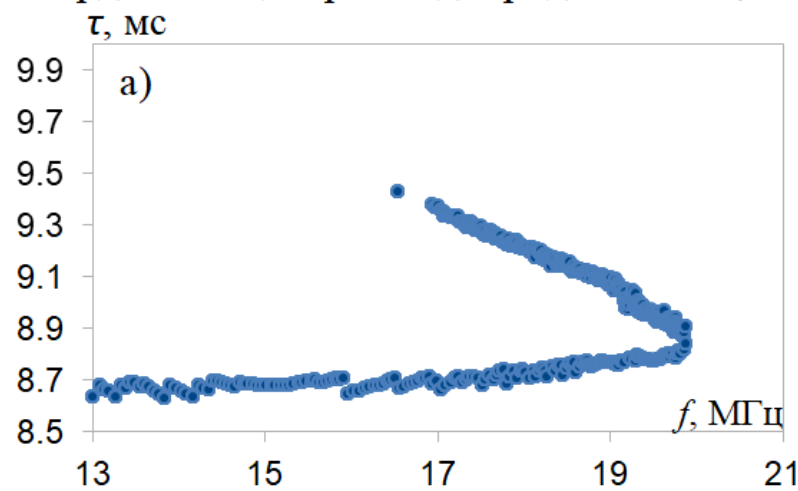
Координаты центра неоднородности: $45,5^\circ$ с.ш., $37,6^\circ$ в.д.





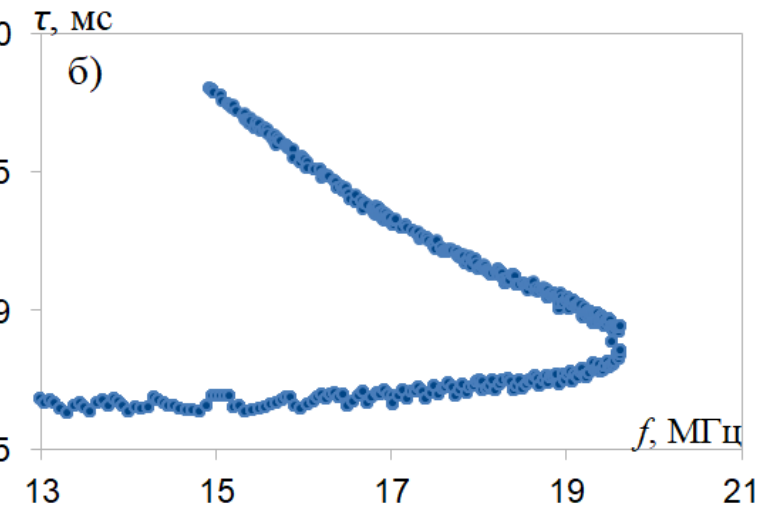
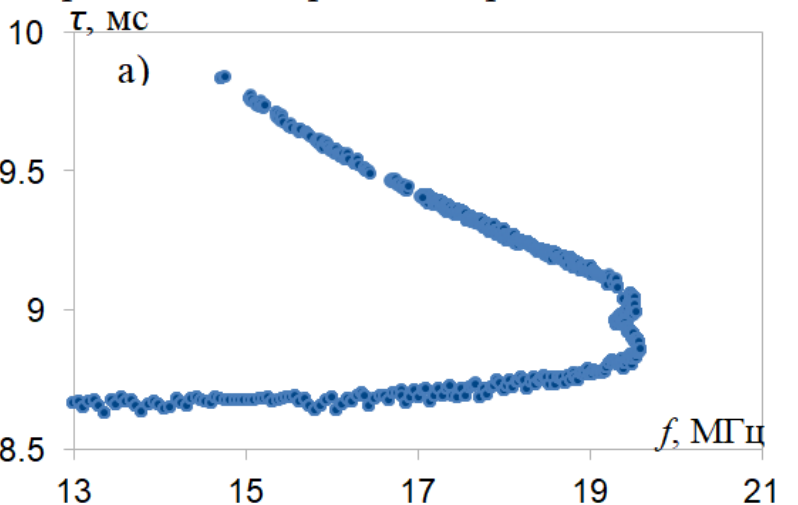
Траектории лучей O-моды (а-в) и X-моды (г-е) на фоне распределения электронной плотности: а, г) в горизонтальной плоскости на высоте $z=h=280$ км; б, д) в широтной плоскости; в, е) в плоскости меридиана. Синим пунктиром показаны соответствующие сечения указанными выше плоскостями.

Координаты центра неоднородности: 45,5°с.ш., 37,6°в.д.



Расчетная ДЧХ для волны О-моды (слева) и Х-моды (справа). $L=100$ км, $d=50$ км, $\alpha=-55^\circ$ ($\gamma=50^\circ$), $\beta=45^\circ$, $n=7$, $m=7$ ($q=14$).

Координаты центра неоднородности: 45,5°с.ш., 37,9°в.д.



Расчётные ДЧХ для волны О-моды:

а) $L=200$ км, $d=100$ км, $\alpha=-45^\circ$ ($\gamma=60^\circ$), $\beta=45^\circ$, $n=7$, $m=7$ ($q=14$);

б) $L=300$ км, $d=150$ км, $\alpha=-45^\circ$ ($\gamma=60^\circ$), $\beta=45^\circ$, $n=7$, $m=7$ ($q=14$).

Выводы:

1. В работе предложена модель перемещающихся ионосферных возмущений в виде ограниченного по высоте цуга волн конечной длины (заданного количества полупериодов) с заданным периодом и ориентированного в трехмерном пространстве (в сферической системе Земли) под произвольным углом относительно трассы (азимутальным и высотным углом наклона фронтальной плоскости) распространения КВ радиоволны.
2. Траекторные расчеты КВ радиоволн на длинной трассе Кипр-Нижний Новгород при наличии данной модели ПИВ показали качественное соответствие результатов моделирования экспериментальным ДЧХ и позволили сделать выводы о форме, структуре, направлении перемещения и широтной компоненте скорости движения неоднородности (ПИВ).
3. Динамика поведения ПИВ показывает, что регистрируемое снижение со временем верхней кромки Z-образного ПИВ на графиках ДЧХ соответствует смещению области неоднородности в направлении с запада на восток, т.е. установлено, что 20.07.2023 в утренние часы ПИВ имел компоненту скорости в направлении с запада на восток (вдоль линии широты).
4. Оценено значение широтной компоненты скорости ПИВ: $V_x \approx 176$ м/с
5. Проведено исследование влияния параметров L , α , β и на форму z-следа, определяющих градиент, наклон фронта неоднородности и взаимную ориентацию трассы и ПИВ.

Спасибо за внимание!