

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН УКВ ДИАПАЗОНА

Д. В. Растягаев , Д. С. Лукин

Российский новый университет



- 
- Настоящая работа посвящена исследованию влияния ионосферы Земли на поляризационные характеристики радиоволн мегагерцового диапазона.
 - Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования методов расчета излучения, проходящего ионосферные плазменные слои, с целью решения современных задач радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также задач дистанционного зондирования Земли из космоса [Иванов, 2006; Вертоградов и др., 2018; Данилкин и др., 2014; Ипатов и др., 2014, Vova et al, 2021; Крюковский и др., 2022].

- 
- ▶ Сравниваются результаты моделирования распространения радиоволн для двух частот $f=20$ MHz, $f=460$ MHz.
 - ▶ Частота $f=20$ MHz, пограничная для применимости понятия «фарадеевское вращение», то есть частоты, для которых представление о распространении радиоволн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией по одной и той же траектории очень условно.
 - ▶ Проведен анализ влияния ионосферы Земли на параметры высокочастотных радиосигналов.
 - ▶ Исследованы:
 - ▶ групповая задержка и отклонение угла прицеливания, отклонение траектории радиосигнала от прямой,
 - ▶ поворот вектора поляризации (угол фарадеевского вращения),
 - ▶ фазовый сдвиг (отклонение фазы),
 - ▶ коэффициенты поляризации.

- 
- 
- Исследование процессов распространения волн в ионосфере Земли сопряжено с известными трудностями решения дифференциальных уравнений второго порядка с переменными коэффициентами. Точное решение может быть построено относительно небольшого задач. Полученные таким образом решения не охватывают всего многообразия реальных характеристик неоднородных сред, представляющих непосредственный интерес для практического исследования.
 - Лучевые методы, являются традиционным инструментом исследования процессов распространения коротких и ультракоротких волн в различных средах [Казанцев и др., 1967; Лукин, Спиридонов, 1969; Лукин, Палкин, 1982; Крюковский и др., 2009].
 - Для расчета вышеуказанных характеристик в работе использовалась бихарактеристическая система уравнений.

Бихарактеристическая система и пути лучей

Для расчета траекторий лучей в ионосферной плазме использовалась бихарактеристическая система уравнений [Казанцев и др., 1967; Лукин, Спиридонов, 1969]

$$\frac{d\vec{r}}{d\tau} = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{k}} / \frac{\partial \Gamma}{\partial \omega} \quad \frac{d\vec{k}}{d\tau} = \frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{r}} / \frac{\partial \Gamma}{\partial \omega} \quad (1)$$

Гамильтониан

$$\Gamma = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) \quad (2)$$

плазменная частота ω_p

$$\omega_p^2 = \frac{4\pi e^2 N(\vec{r})}{m_e} \quad (3)$$

$$u = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2} \quad (4)$$

Эффективная диэлектрическая проницаемость

При рабочей частоте источника излучения 460 МГц плазменная частота намного меньше рабочей частоты и эффективная диэлектрическая проницаемость имеет вид:

$$\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) = 1 - \nu \quad \nu = \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \quad (5)$$

На частоте 20 МГц справедлива формула Эпплтона-Хартри [Дэвис, 1973; Гинзбург, 1967] для эффективной диэлектрической проницаемости:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2\nu(1-\nu)}{2(1-\nu) - u \sin^2 \theta \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4u(1-\nu)^2 \cos^2 \theta}} \quad (6)$$

Угол θ - это угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля Земли.

Вектор напряженности магнитного поля Земли

$$\vec{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z}) \quad (7)$$

$$H_{0x} = H_0 \cos \gamma \cos \varphi \quad H_{0y} = H_0 \cos \gamma \sin \varphi \quad H_{0z} = H_0 \sin \gamma$$

Угол φ противоположен углу магнитного склонения, а угол γ противоположен углу магнитного наклонения.

В расчетах, представленных в работе, предполагалось, что $\varphi = 0$, а $\gamma = -57^\circ$.

Знак «+» в формуле (5) соответствует обыкновенной волне, а знак «-» — необыкновенной.

Модельная задача

- В процессе численного моделирования предполагалось, что источник излучения находится на движущемся космическом аппарате на расстоянии нескольких сотен километров от поверхности Земли, угол наклона лучей меняется относительно положительного направления горизонтальной оси, а приемник находится на поверхности Земли.
- В качестве источника радиоволн рассматривается космический аппарат (КА), высота круговой орбиты которого равна 420 км.
- Приемник излучения расположен на Земле в начале координат.
- Для моделирования процессов распространения выбраны две рабочие частоты: 20 МГц и 460 МГц.

Распределение концентрации электронов в ионосфере и траектории лучей

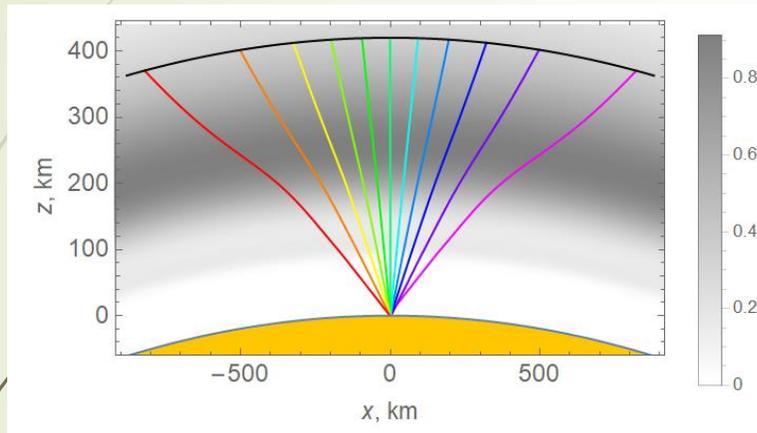


Рис. 1 а. $f=20$ MHz

Исследуется распространение радиоволн, излучаемых космическим аппаратом (КА), высота орбиты которого составляет 420 км. Приемник излучения находится на Земле в начале координат. Рассматриваются две рабочие частоты: 20 МГц и 460 МГц. Модель двухслойная – содержит слои F (верхний) и E (нижний).

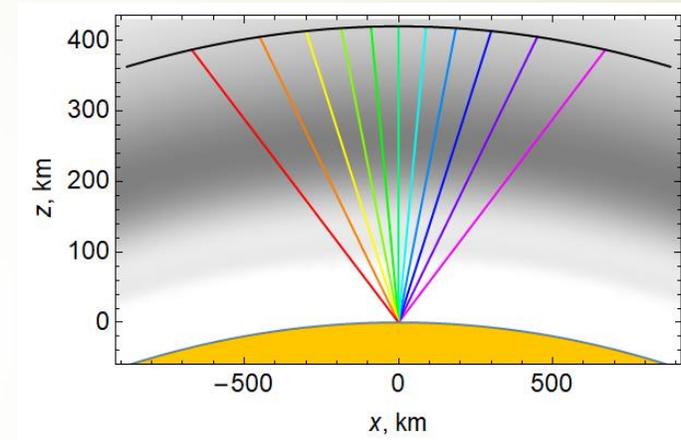
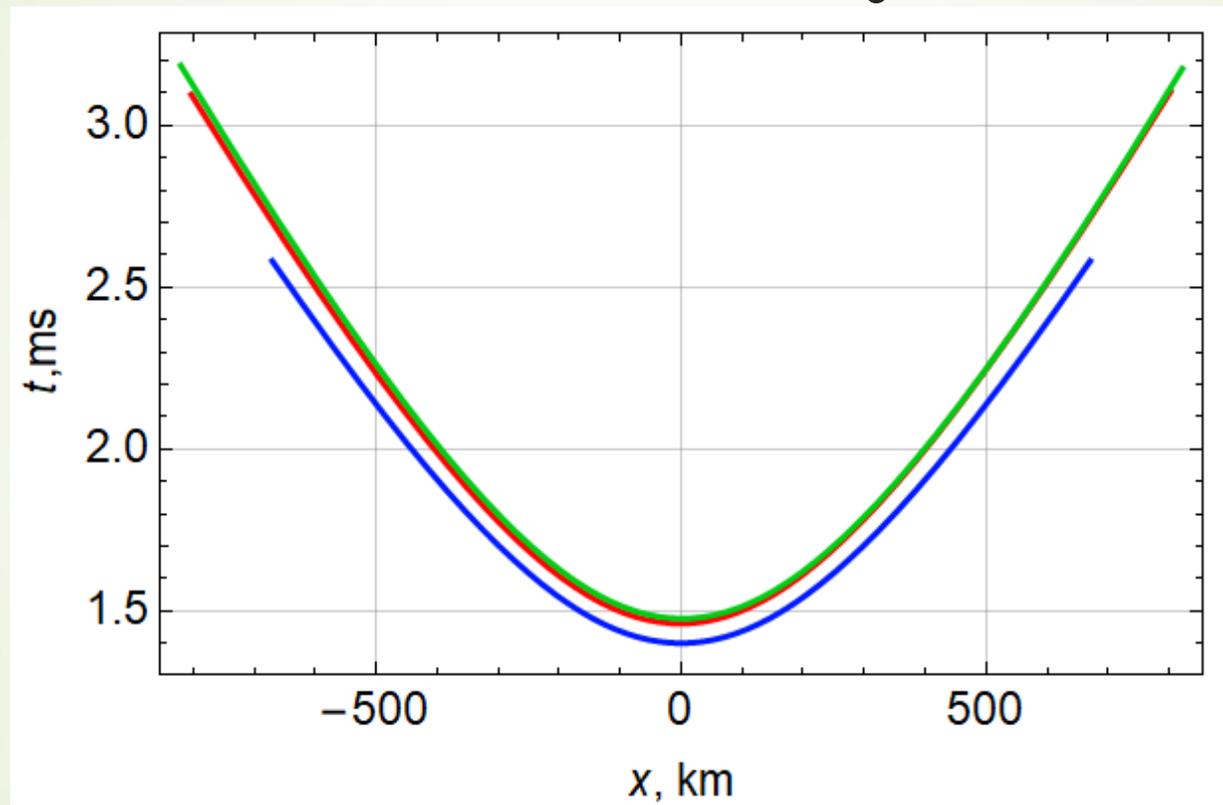


Рис. 1 б. $f=460$ MHz

Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча



Зависимость группового времени t от координаты x выхода луча
синяя линия – 460 МГц
Красная – 20 МГц, обыкновенная
Зеленая – 20 МГц, необыкновенная

Увеличение групповой задержки из-за влияния ионосферы

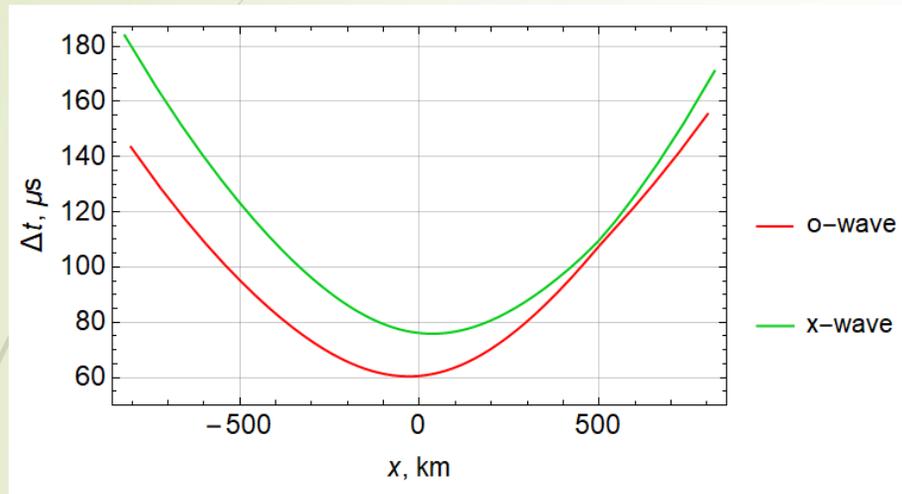


Рис. 3 а. $f=20$ MHz

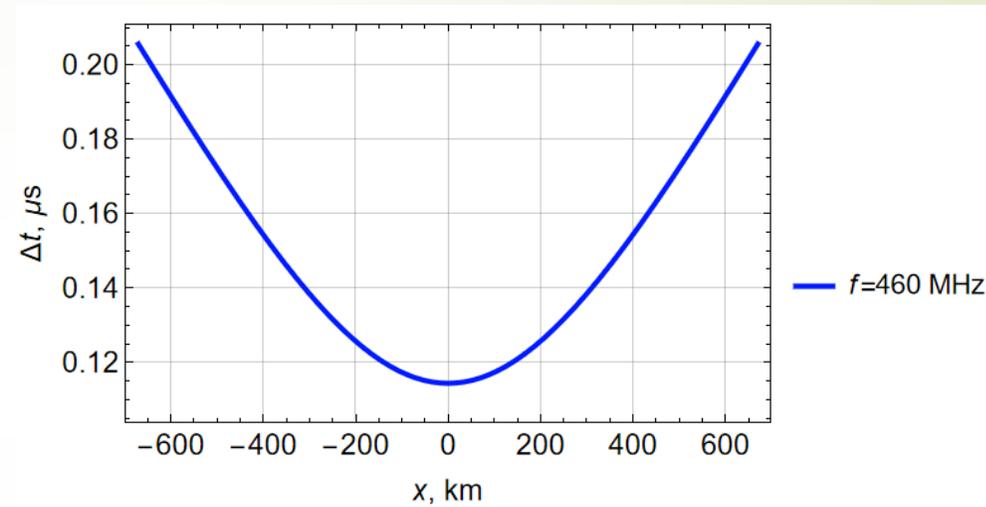


Рис. 3 б. $f=460$ MHz

Для частоты 20 МГц это значение задержки колеблется от 60 до 180 мкс,
для частоты 460 МГц это доли микросекунды

Вертикальное отклонение Δz реальных лучей от прямых, соединяющих источник и приемник

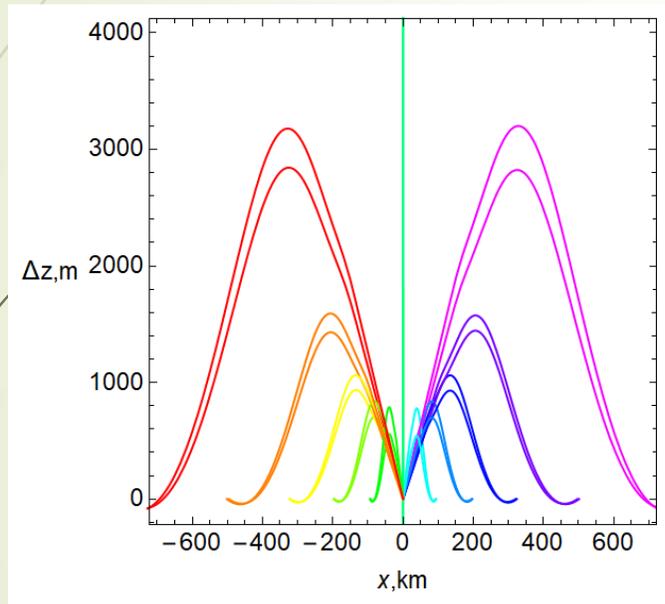


Рис. 4 а. $f=20$ MHz

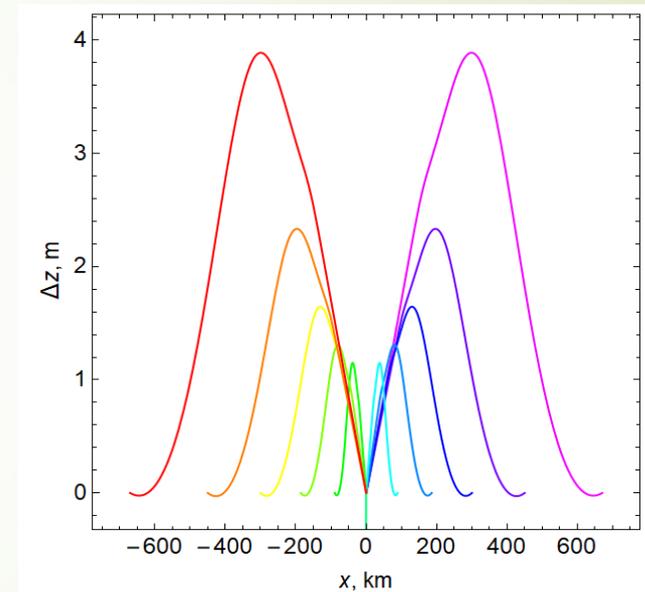
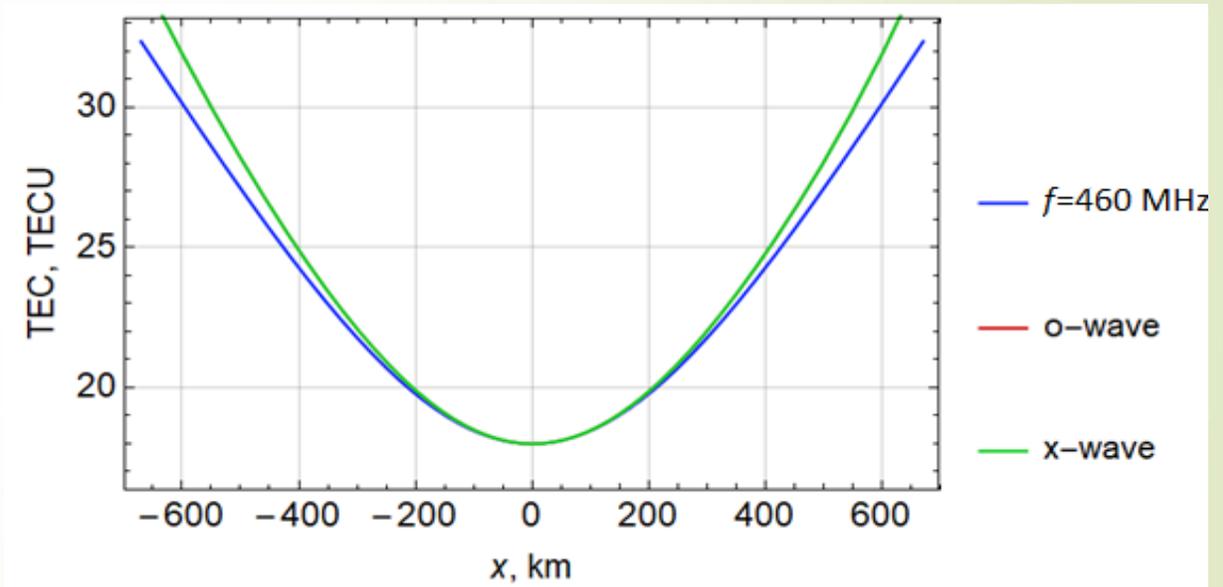
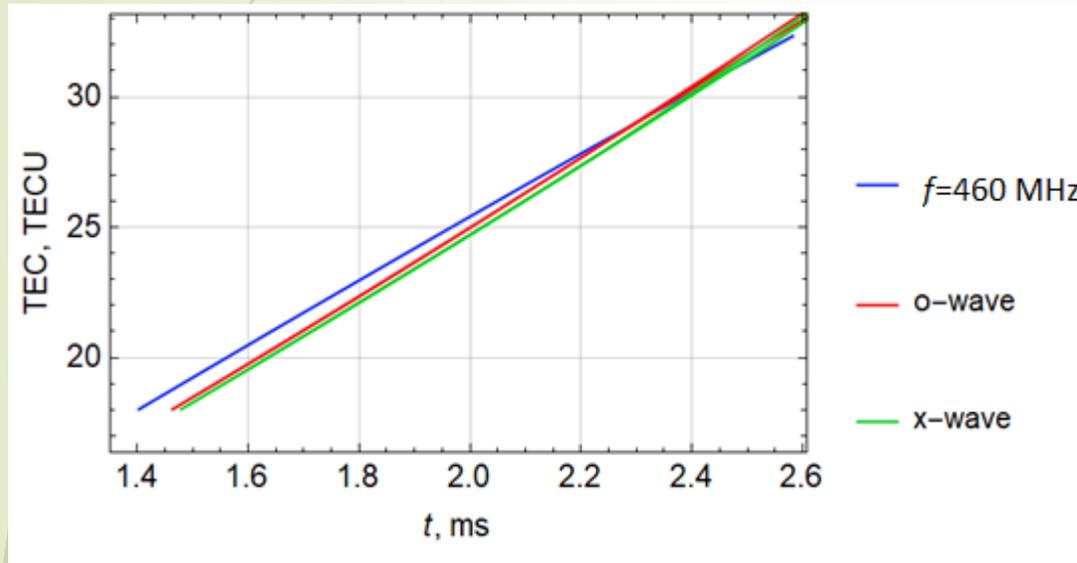


Рис. 4 б. $f=460$ MHz

Для частоты 460 МГц отклонение не превышает 4 м (рис. 4 б), для частоты 20 МГц значение Δz может быть более 3 км.

Полное электронное содержание вдоль лучей (TEC)



Фазовое отклонение

Скорость изменения фазы (производная фазы по групповому времени) на высоте определяется по формуле

$$\Phi'_o(t) = \vec{k} \frac{d \vec{r}}{d t} - \omega = k_x(t) \frac{d x}{d t} + k_y(t) \frac{d y}{d t} + k_z(t) \frac{d z}{d t} - \omega = \Phi'(t) - \omega \quad (8)$$

Интегрируя производную (8)

$$\Phi(t) = \int_0^t \Phi'(\eta) d\eta \quad (9)$$

зависимость отклонения (девиации) фазы $\Delta\Phi$

$$\Delta\Phi = \Phi - \omega R/c \quad (10)$$

Зависимость скорости изменения фазы от высоты

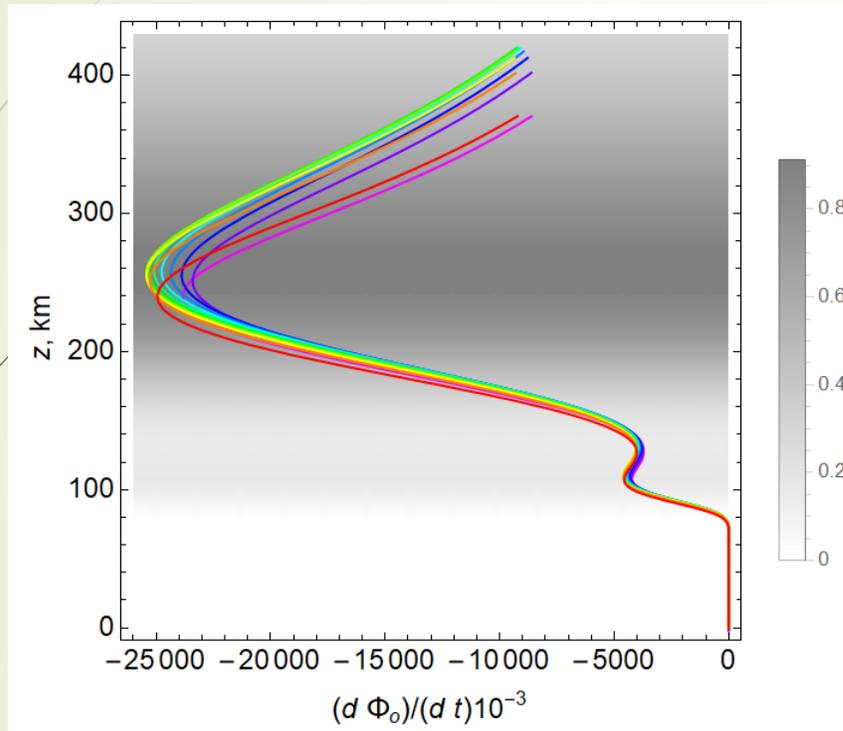


Рис. 5 а. $f=20$ MHz

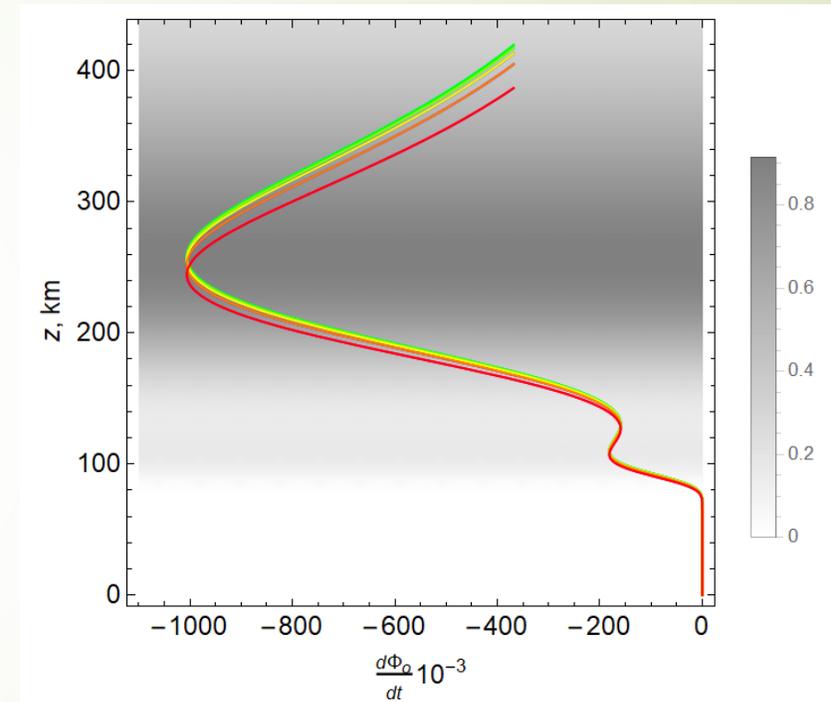


Рис. 5 б. $f=460$ MHz

Минимумы кривых соответствуют положениям максимумов слоев ионосферы, а локальные максимумы – межслоевым долинам

Зависимость отклонения фазы $\Delta\Phi$ от группового времени t

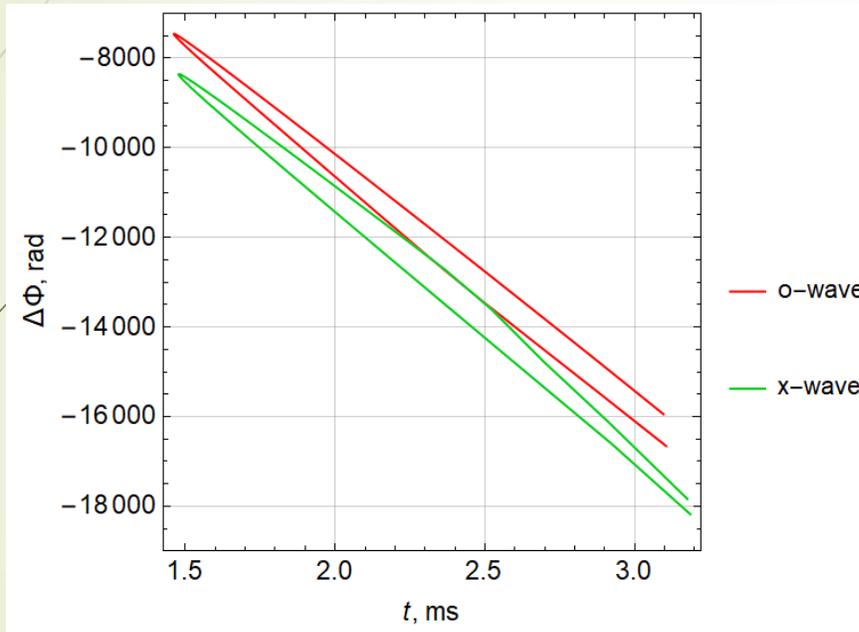


Рис. 6 а. $f=20$ MHz

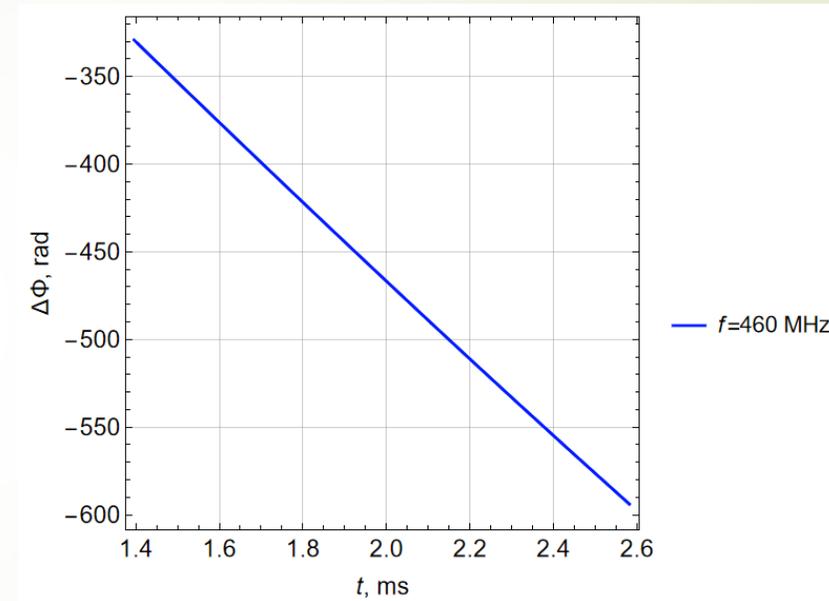


Рис. 6 б. $f=460$ MHz

Каждая кривая на рис. 6а имеет две ветви. Крайнее левое значение отклонения фазы соответствует вертикальному лучу.

Сравнивая рис. 6 а и рис. 6 б, видим, что на частоте 460 МГц кривая не расщепляется, а абсолютное значение фазового отклонения значительно меньше.

Зависимость отклонения фазы $\Delta\Phi$ от горизонтальной координаты x

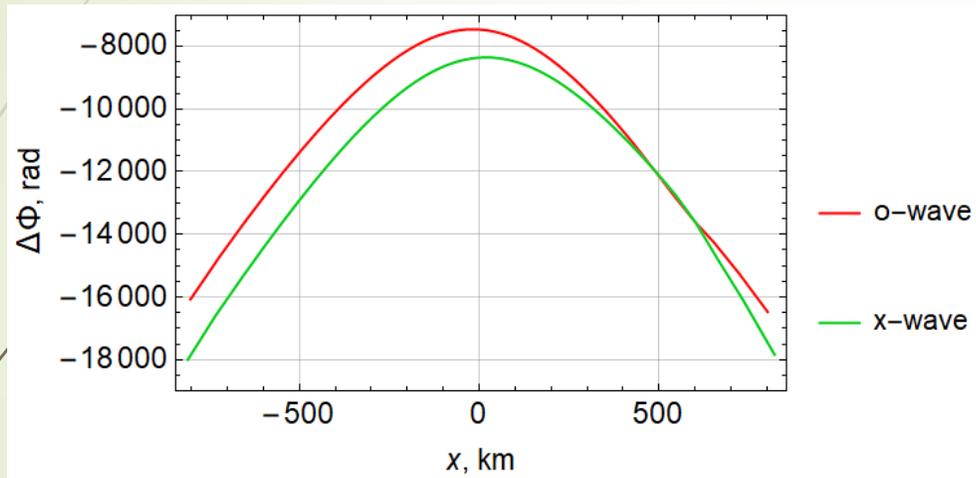


Рис. 7 а. $f=20$ MHz

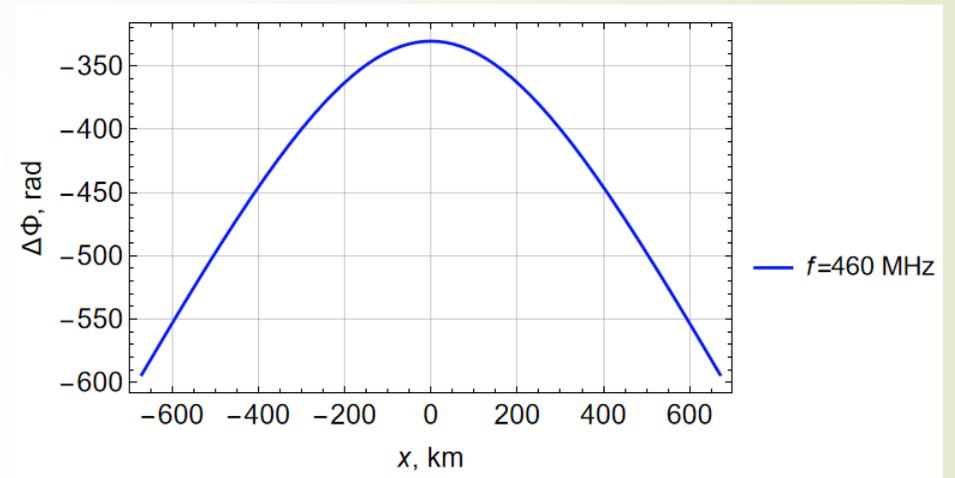


Рис. 7 б. $f=460$ MHz

Вращение плоскости поляризации

Угол фарадеевского вращения Ω находится путем интегрирования вдоль луча разности $\Delta\mu$ [Дэвис, 1973]:

$$\Omega(t) = \frac{1}{2} \frac{\omega}{c} \int_0^t \Delta\mu \left((dx/dt)^2 + (dy/dt)^2 + (dz/dt)^2 \right)^{1/2} dt \quad (11)$$

$$\Delta\mu \cong \frac{1}{2} \frac{v \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4(1-v)^2 u \cos^2 \theta}}{(1-v)(1-u \cos^2 \theta) - u \sin^2 \theta}$$

$$u = \frac{\omega_H^2}{\omega^2} = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2}$$

$$\cos \theta = \frac{(\vec{H}_0, \vec{k})}{|\vec{H}_0| |\vec{k}|}$$

разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волн,

отношение квадрата гирочастоты к квадрату рабочей частоты

θ - угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля Земли.

Зависимости $\Delta\mu$ от высоты z

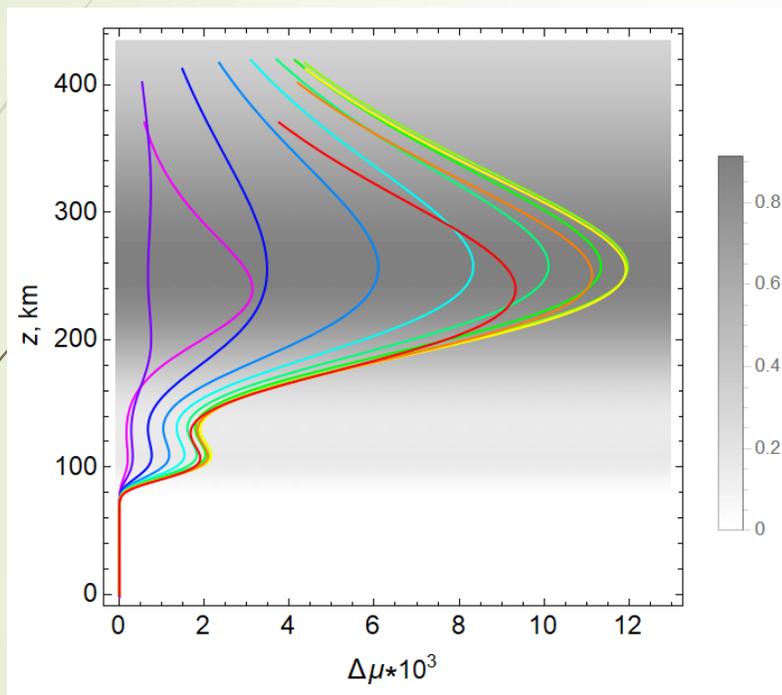


Рис. 8 а. $f=20$ MHz

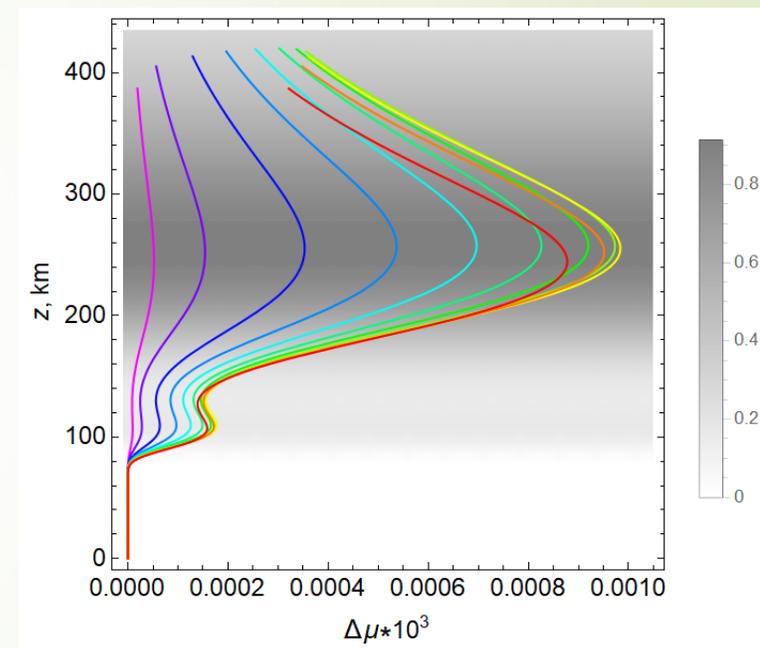


Рис. 8 б. $f=460$ MHz

Сравнивая рис. 8 а и рис. 8 б, видим, что абсолютные значения $\Delta\mu$ в случае рабочей частоты 460 МГц на 4 порядка меньше, чем в случае частоты 20 МГц.

Зависимость квадрата косинуса угла θ ОТ ВЫСОТЫ

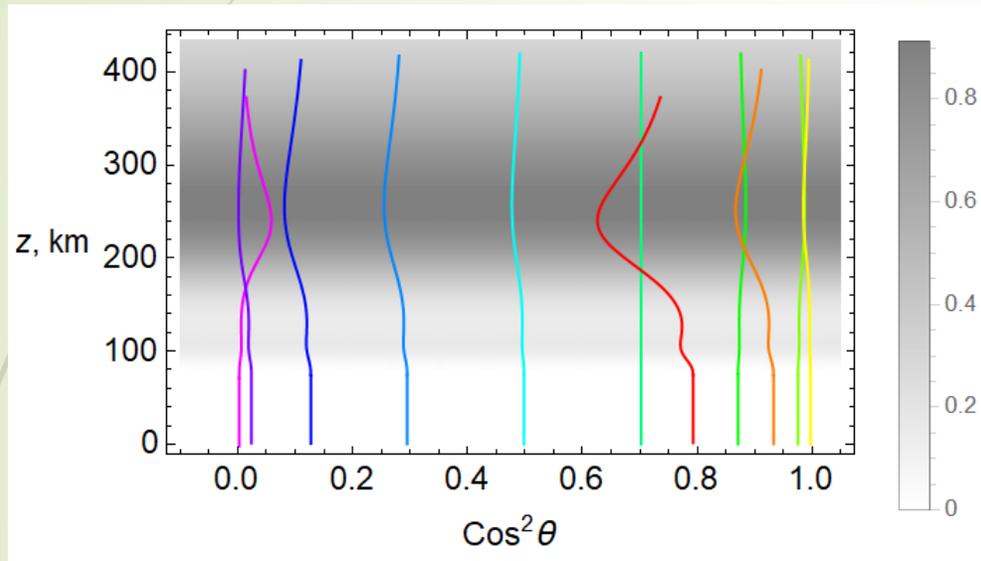


Рис. 9 а. $f=20$ MHz

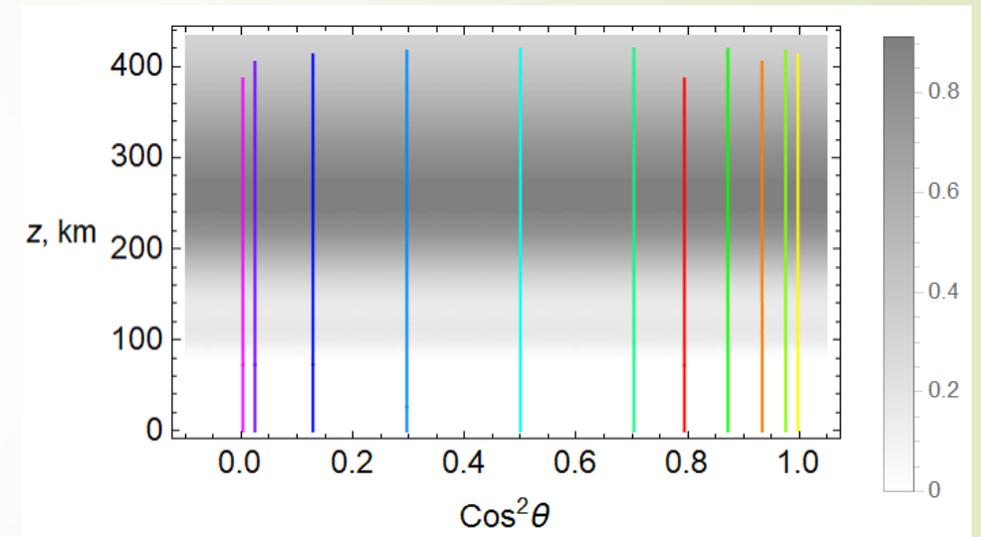


Рис. 9 б. $f=460$ MHz

Для крайнего правого луча (сиреневый цвет) $\cos^2 \theta$ близок к нулю, поэтому угол равен 93°
Для желтой линии $\cos^2 \theta$ близок к единице, поэтому угол близок к нулю.

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от группового времени t

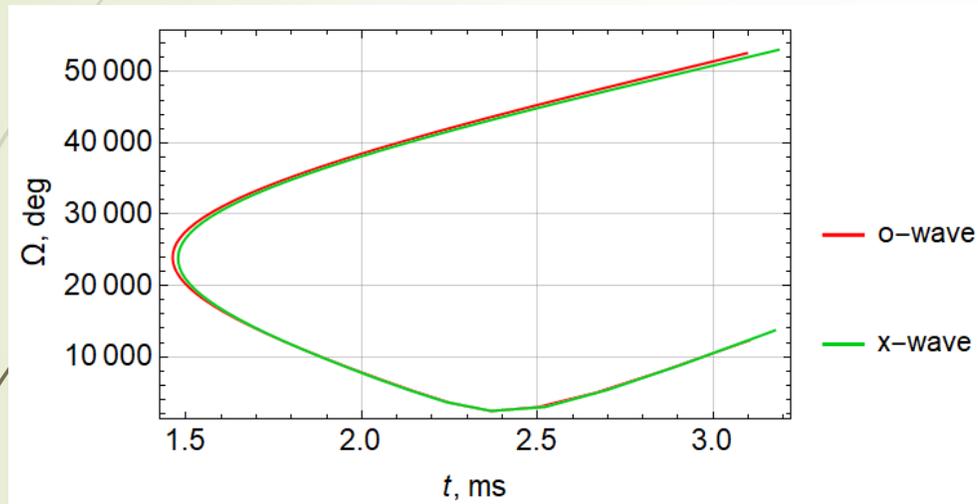


Рис. 10 а. $f=20$ MHz

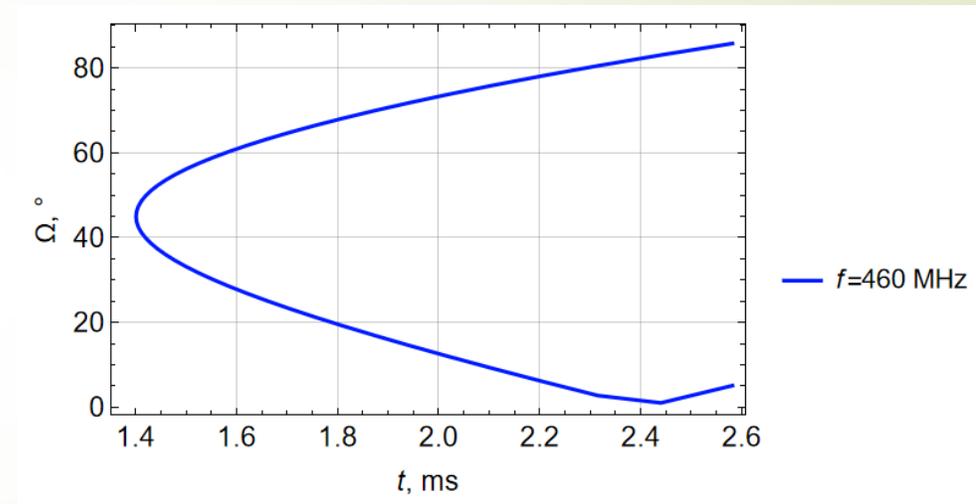


Рис. 10 б. $f=460$ MHz

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от координаты x

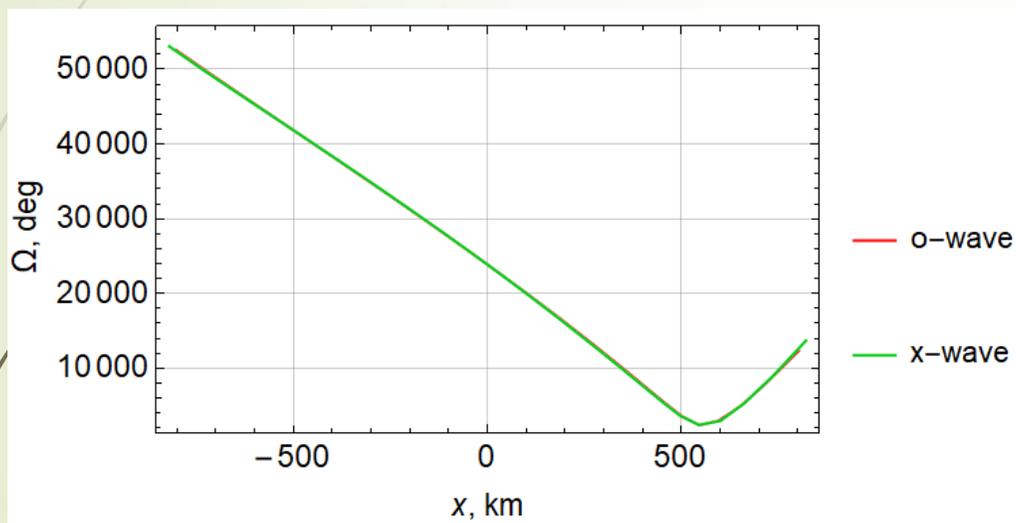


Рис. 11 а. $f=20$ MHz

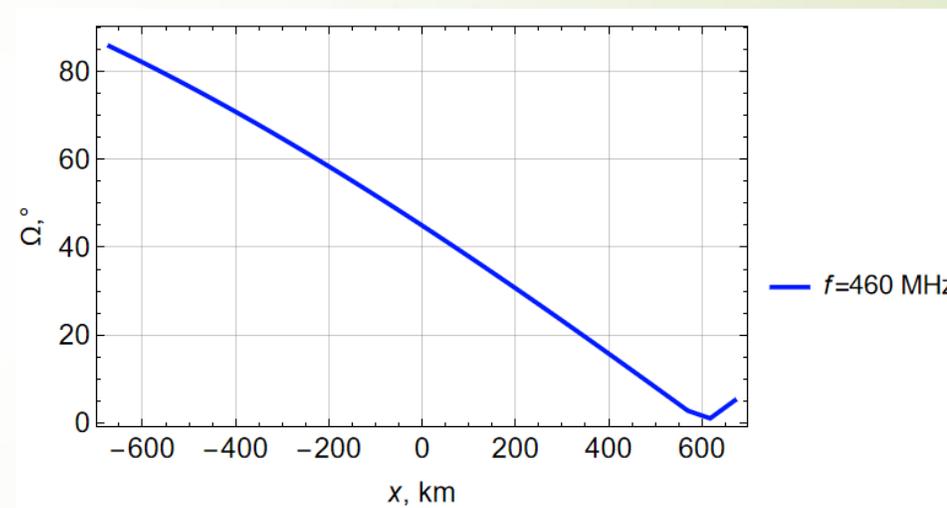
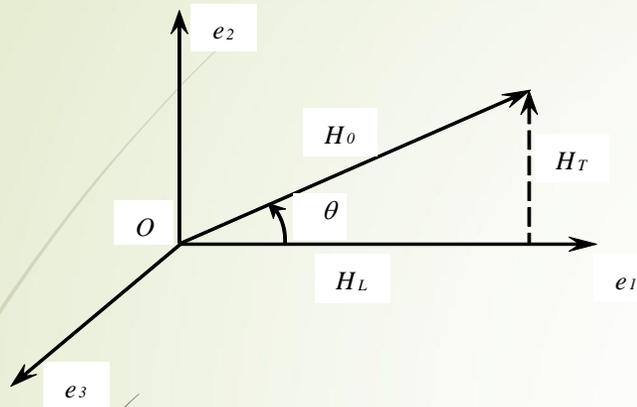


Рис. 11 б. $f=460$ MHz

Коэффициенты поляризации

[ДЭВИС, 1973]



$$\frac{E_3}{E_2} = R_{\mp} \quad R_- = iR_o \quad R_+ = iR_x$$

$$R_{\mp} = \frac{i}{2Y_L} \left(\frac{Y_T^2}{1-\nu} \mp \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1-\nu)^2} + 4Y_L^2} \right)$$

$$R_- R_+ = 1$$

$$Y_L = \sqrt{u} \cos \theta$$

$$Y_T = \sqrt{u} \sin \theta$$

$$\frac{E_1}{E_2} = \operatorname{tg} \psi_{o,x} = -\frac{R_{o,x} Y_T}{1-\nu} (1 - \varepsilon_{\pm})$$

Коэффициент поляризации R_o

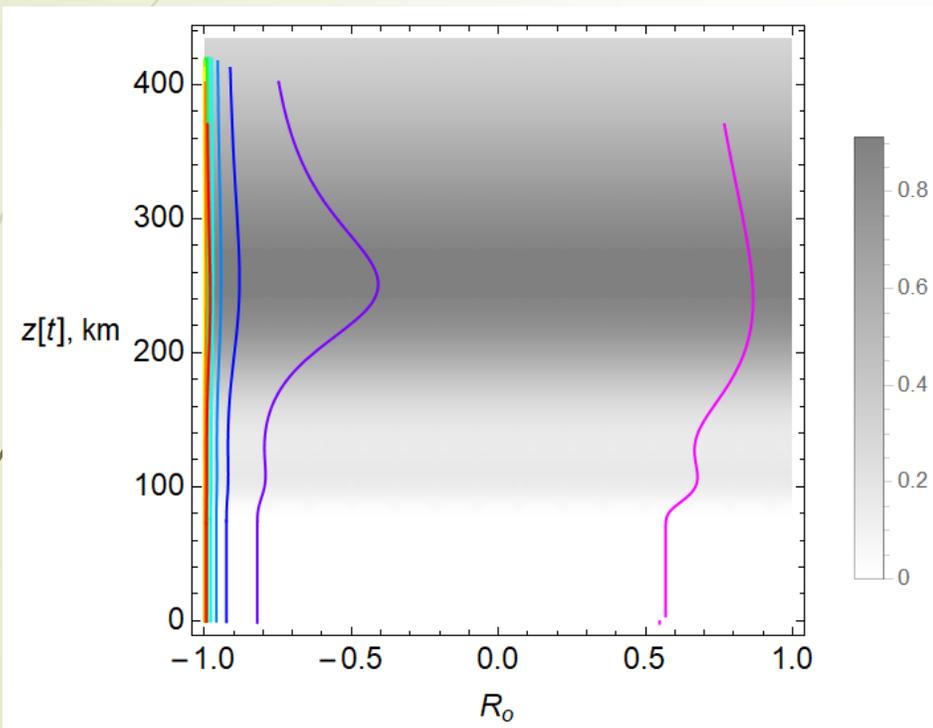


Рис. 12 а. $f=20$ MHz

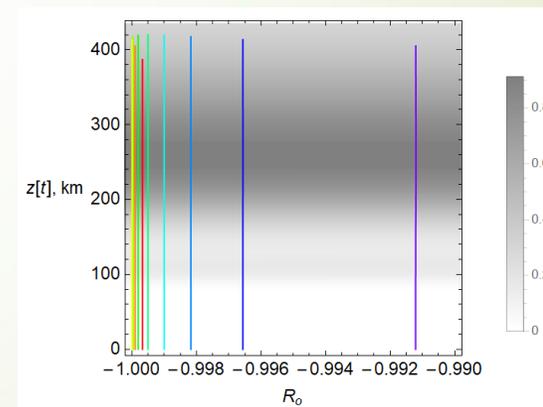
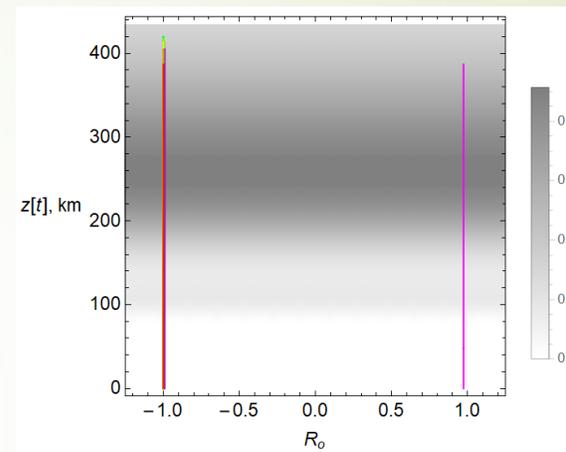


Рис. 12 б. $f=460$ MHz

Коэффициент поляризации R_x

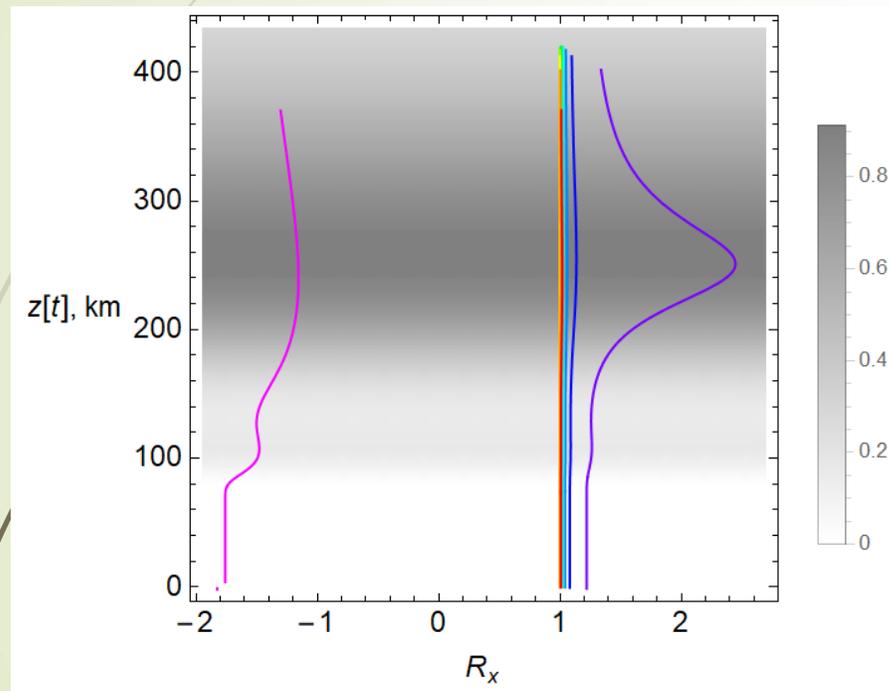


Рис. 13 а. $f=20$ MHz

БШФФ Иркутск, 5-10 сентября 2022 г.

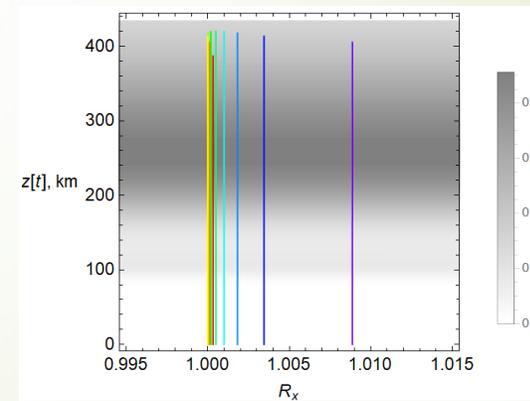
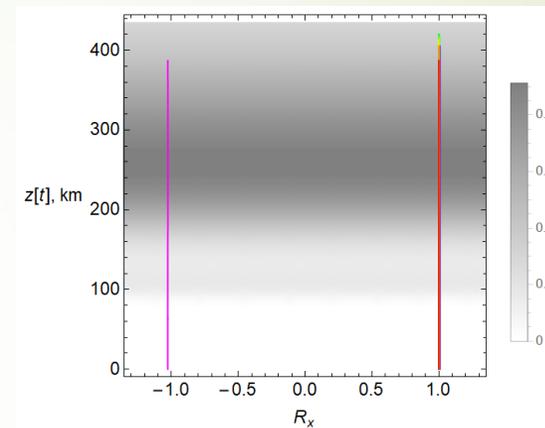


Рис. 13 б. $f=460$ MHz

Отношение продольной электрической составляющей волнового поля к поперечной (о-волна)

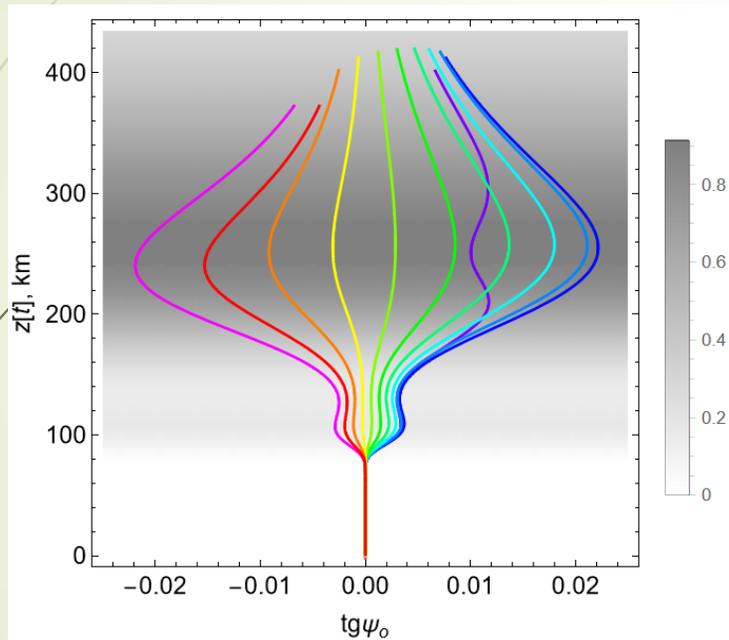


Рис. 14 а. $f=20$ MHz

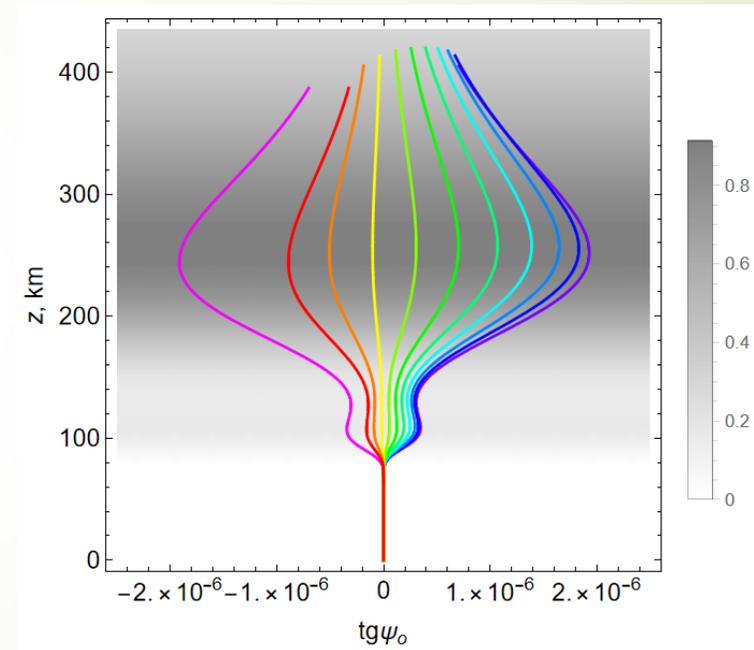


Рис. 14 б. $f=460$ MHz

$$\frac{E_1}{E_2} = \text{tg}\psi_{o,x} = -\frac{R_{o,x}Y_T}{1-\nu}(1-\varepsilon_{\pm})$$

Отношение продольной электрической составляющей волнового поля к поперечной (x-волна)

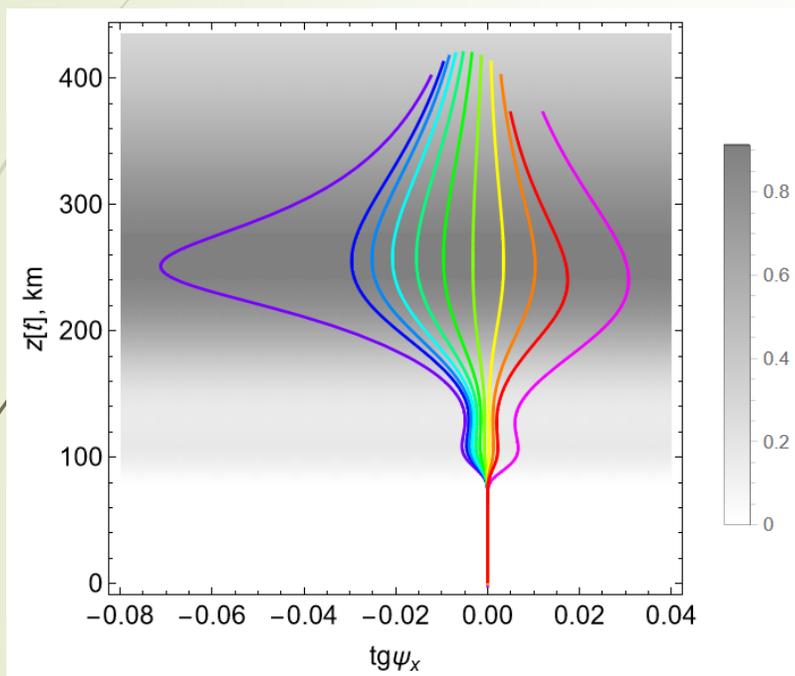


Рис. 15 а. $f = 20 \text{ MHz}$

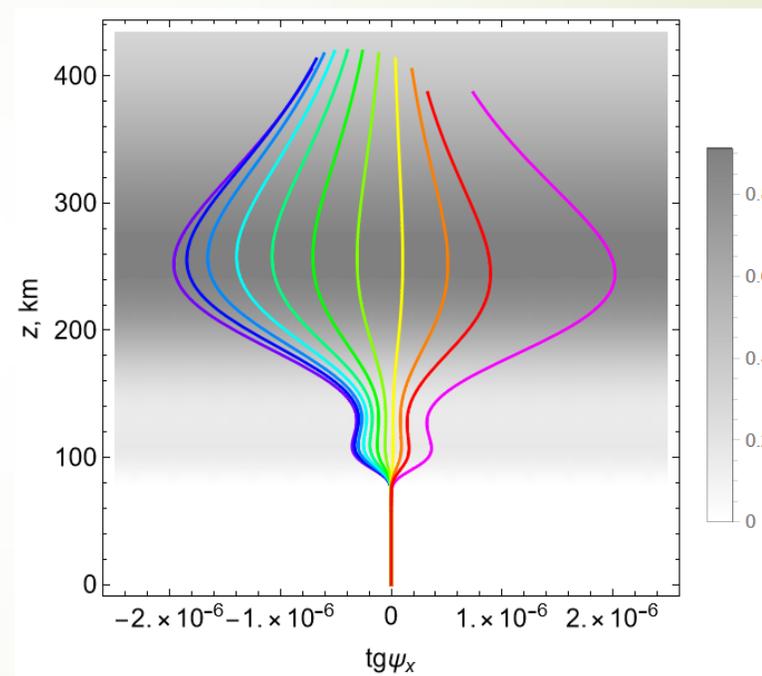


Рис. 15 б. $f = 460 \text{ MHz}$

$$\frac{E_1}{E_2} = \text{tg}\psi_x$$

Заключение

- Методом бихарактеристик выполнено сравнение параметров поляризации радиоволн дециметрового (460 МГц) и декаметрового (20 МГц) диапазонов.
- Рассмотрены эффекты рефракции, фарадеевского вращения и фазовой девиации при пролете космического аппарата в меридиональном направлении, а также исследованы коэффициенты поляризации.
- Представлены результаты математического моделирования.
- Результаты работы актуальны для решения современных задач радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также задач дистанционного зондирования Земли из космоса.
- Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 20-12-00299).



Спасибо за внимание!

БШФФ Иркутск, 5-10 сентября 2022 г.