

Оценки влияния ионосферы на амплитуду, фазовое запаздывание и поляризацию радиолокационного сигнала

Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Растягаев Д.В.

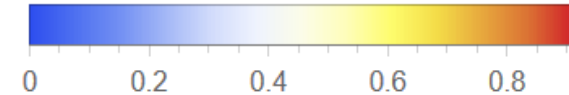
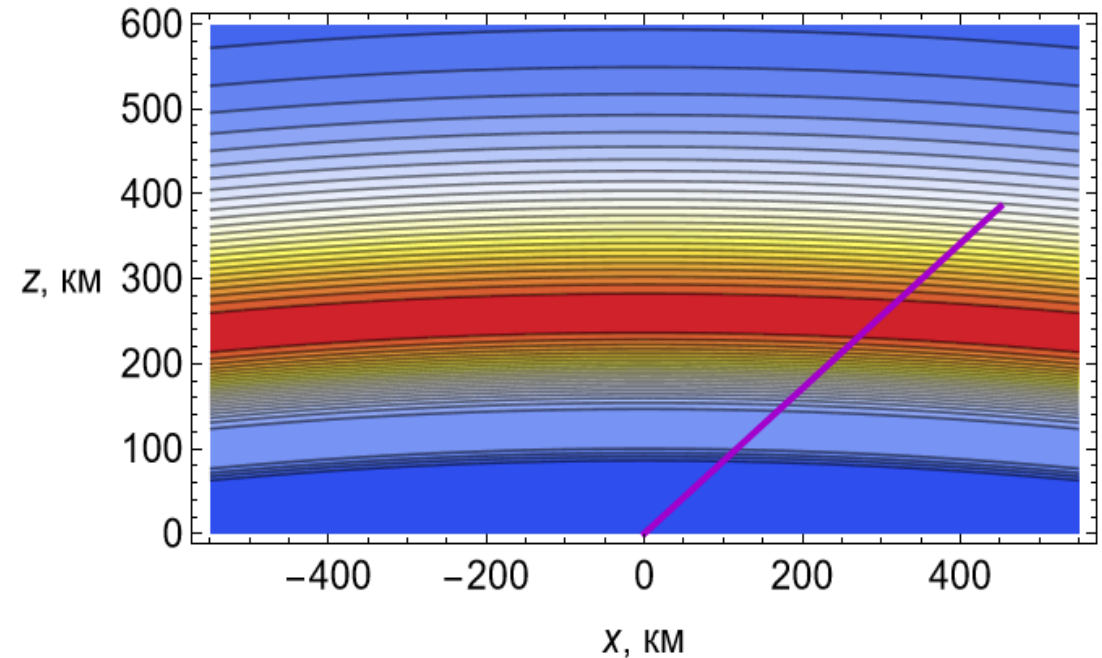
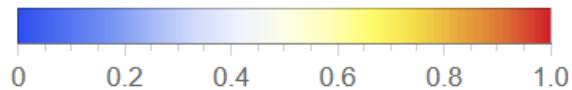
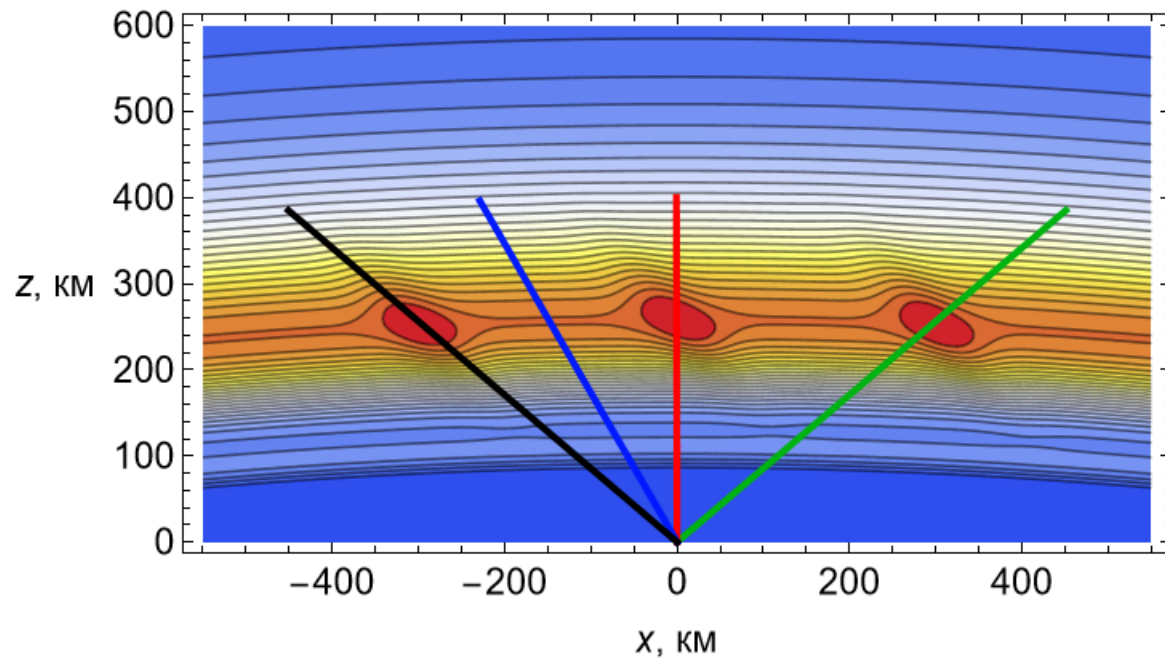
Работа выполнена в рамках Госзадания по теме «Космос-2»

XXII международная конференция "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ ИЗ КОСМОСА"

Тема исследования

- Исследовано влияние ионосферы и ионосферных неоднородностей на распространение радиосигнала дециметрового диапазона.
- Рассмотрено прохождение радиолокационного сигнала, излученного космическим аппаратом, через ионосферу Земли при наличии серии перемещающихся ионосферных возмущений.
- Для диапазона частот от 200 до 1500 МГц выполнен расчет отклонения луча от прямолинейного распространения, изменения времени задержки, фазового запаздывания, девиации фазы.
- Выполнен анализ влияния ионосферы на амплитуду радиосигнала и его поляризацию.
- Проведен расчет полной электронной концентрации и фарадеевского вращения при наличии ионосферных неоднородностей.

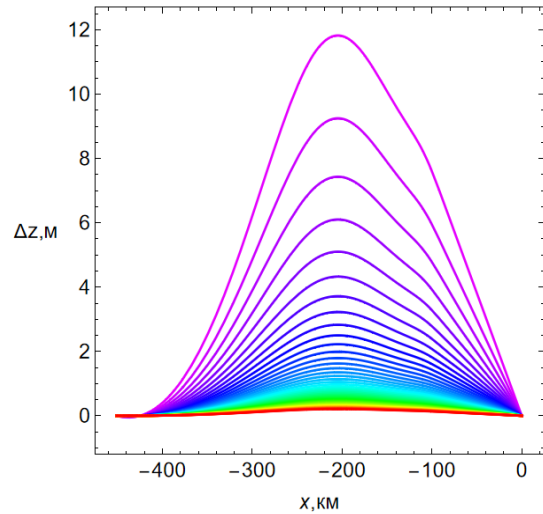
Постановка задачи. Модель ионосферы



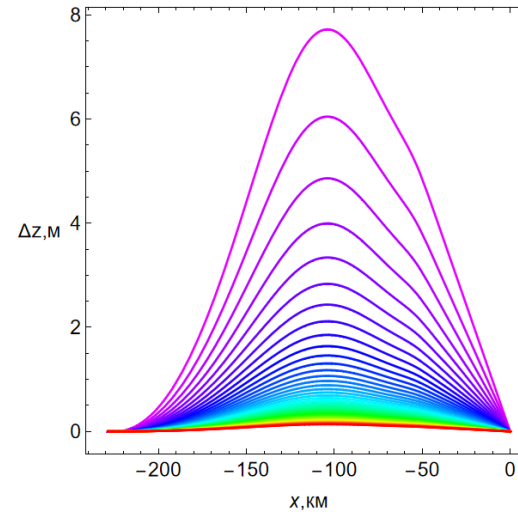
Выбраны следующие углы прихода лучей в приёмник, расположенный на поверхности Земли:
луч 1 – $\alpha=139.5^\circ$, луч 2 – $\alpha=120^\circ$, луч 3 – $\alpha=90.1^\circ$, луч 4 – $\alpha=40.5^\circ$.

При расчете предполагалось, что величина напряжённости магнитного поля Земли H_0 равна 0.465 Э, угол наклона равен 57° , угол склонения – 0° .

Отклонение луча от прямолинейного распространения из-за рефракции



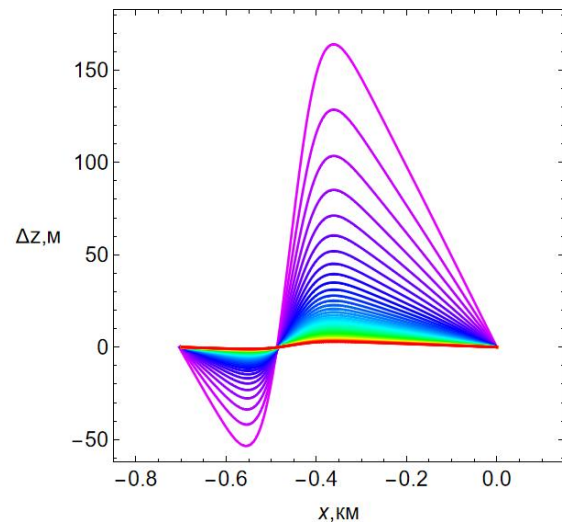
черный луч



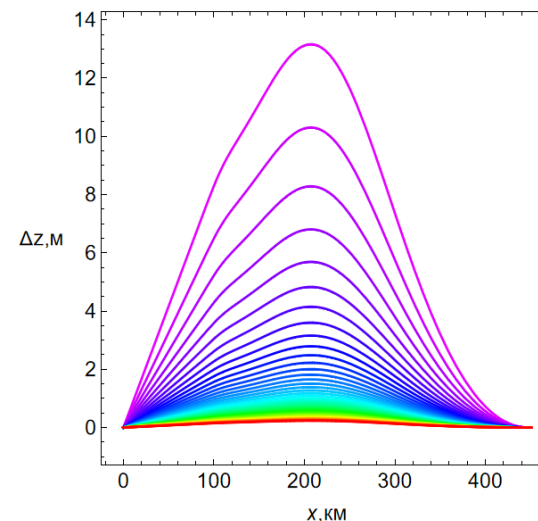
синий луч

нижняя красная линия соответствует частоте 1500 МГц,

верхняя сиреневая линия – частоте 200 МГц.

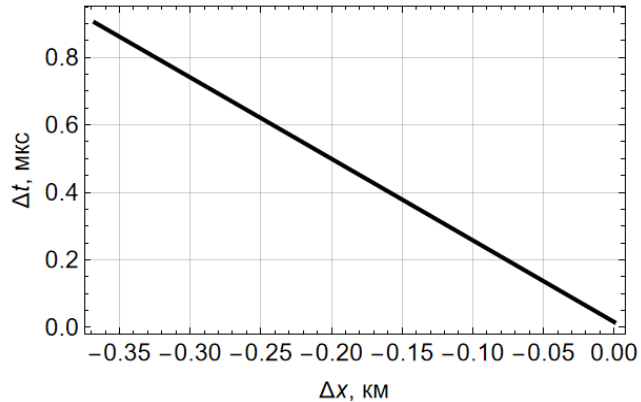


красный луч

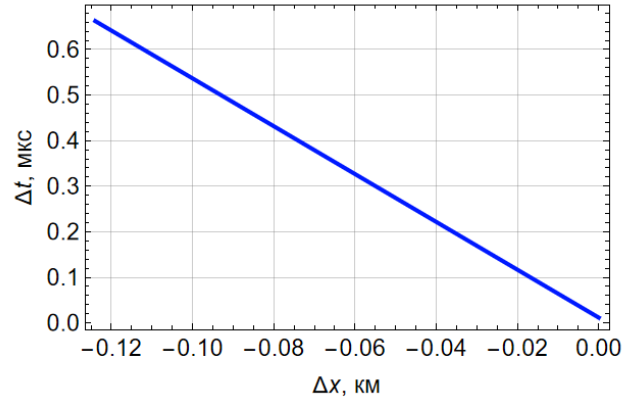


зелёный луч

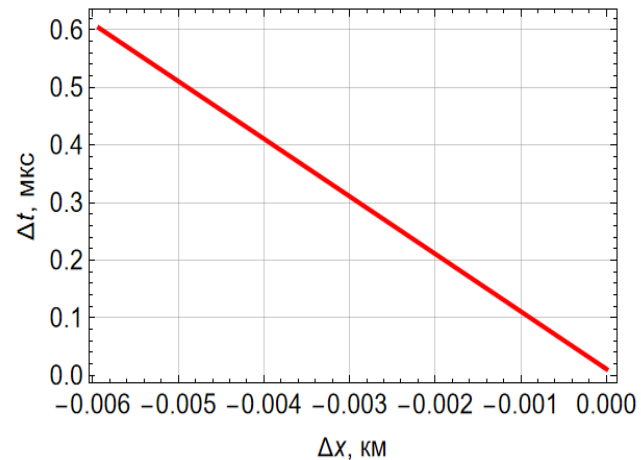
Зависимость изменения времени задержки Δt от изменения расстояния Δx



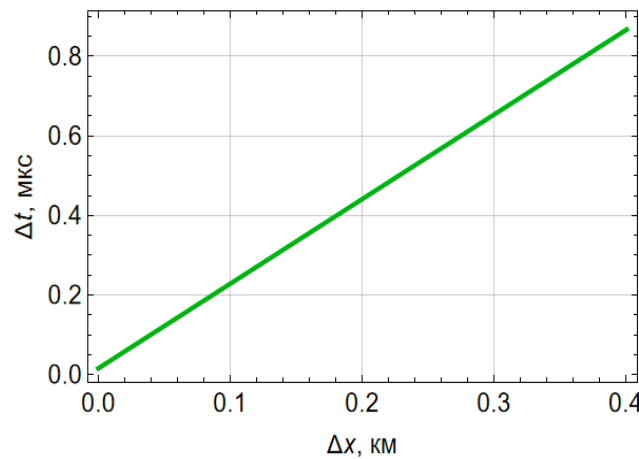
— 1



— 2



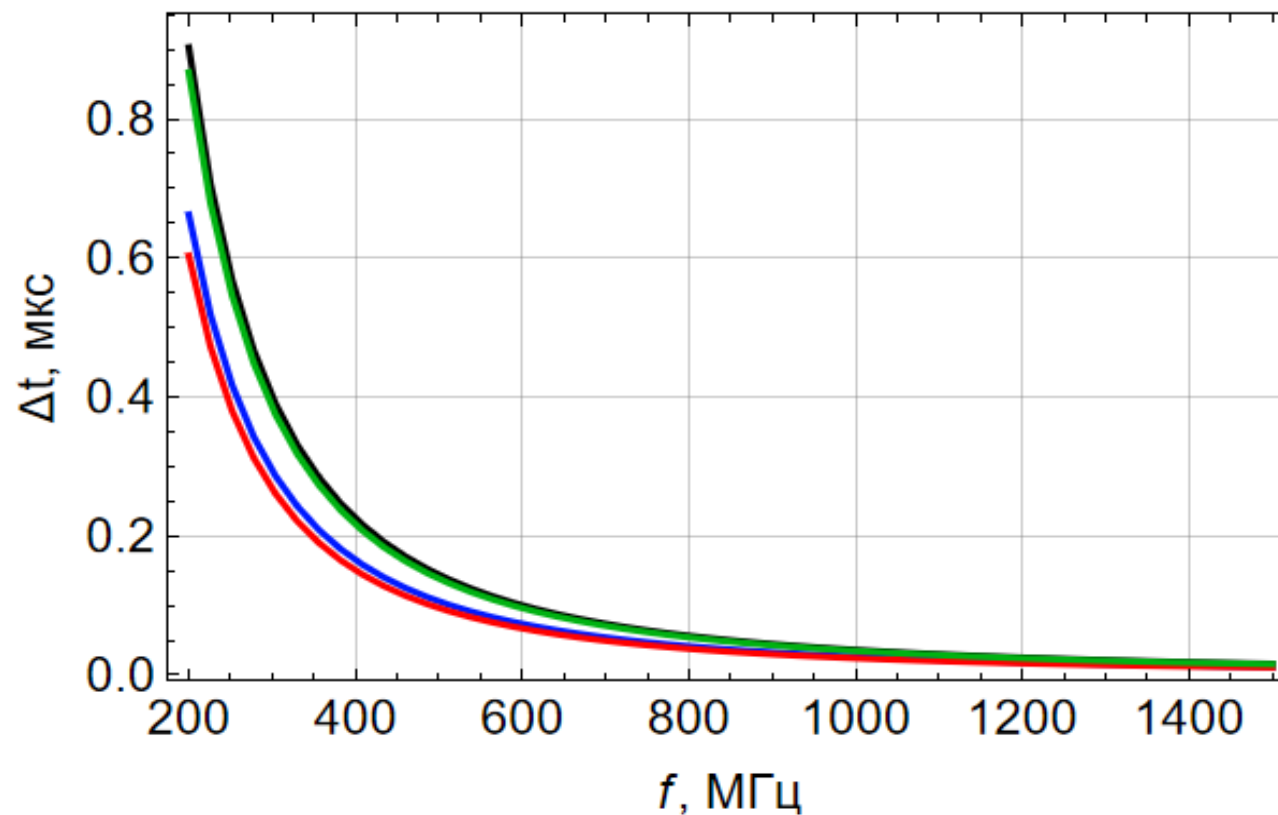
— 3



— 4

Каждая точка соответствует определённой частоте. Здесь $\Delta x = x_f - x_k$, x_f — горизонтальная координата передатчика на частоте f , необходимая для того, чтобы луч пришел в приёмник под выбранным углом, а $\Delta t = t_f - r/c$. t_f — это время распространения сигнала на частоте f , r — расстояние от передатчика до приёмника по прямой, c — скорость света.

Зависимость изменения времени задержки Δt от частоты f



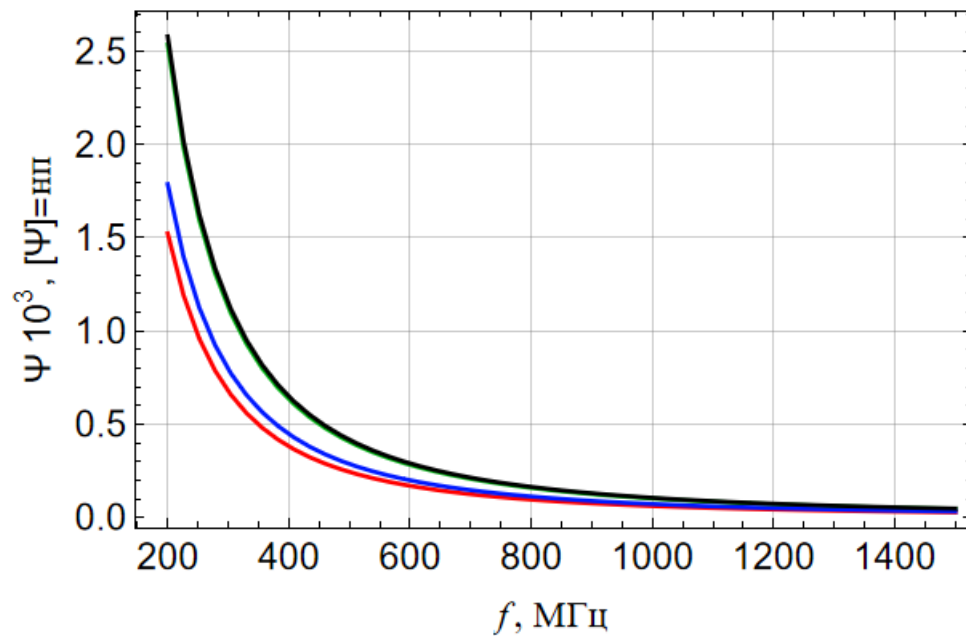
Влияние ионосферы на амплитуду радиосигнала

$$A = E_0 D e^{-\Psi}$$

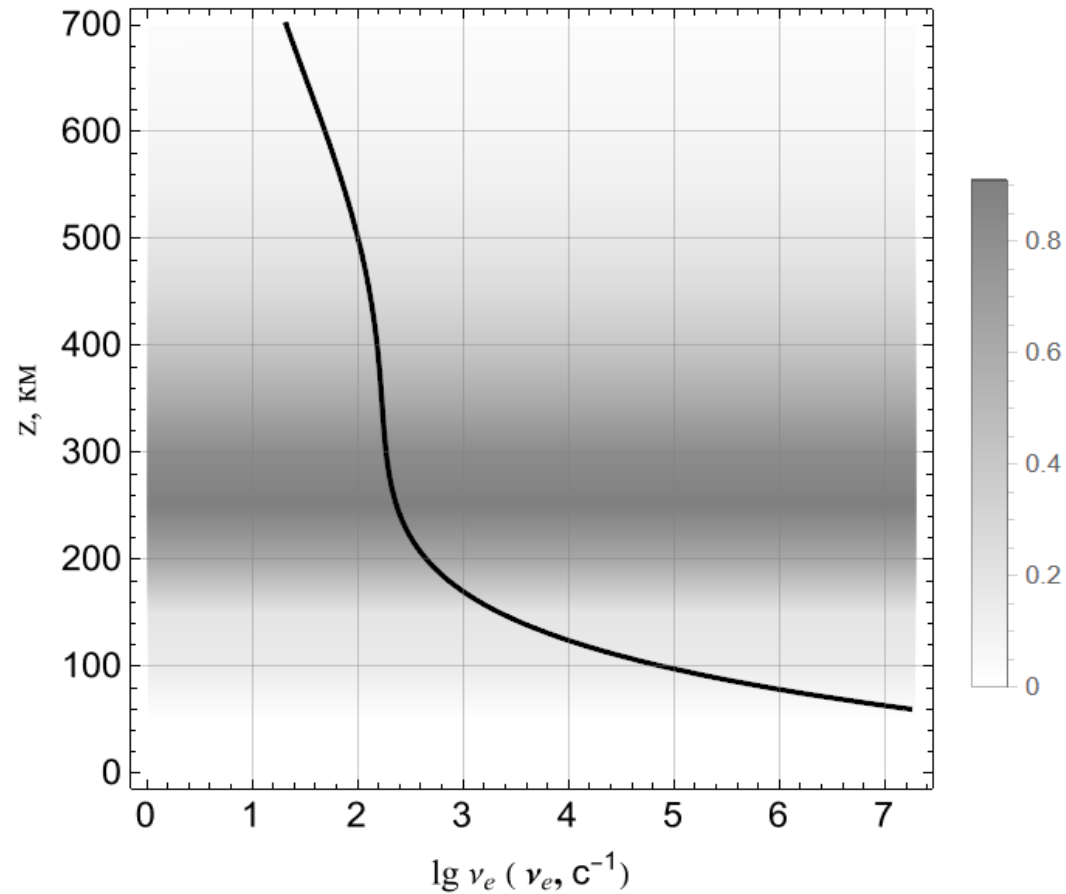
- E_0 – это амплитуда поля на некотором расстоянии r_0 от источника излучения вне ионосферы,
- D – расходимость лучей, ψ – поглощение.
- В первом приближении можно считать, что лучевые траектории — это прямые линии.
- Без учета поглощения амплитуда сигнала убывает как $1/r$, где r – это расстояние от источника излучения до приёмника.

$$A = \frac{\sqrt{30W}}{r} e^{-\Psi}$$

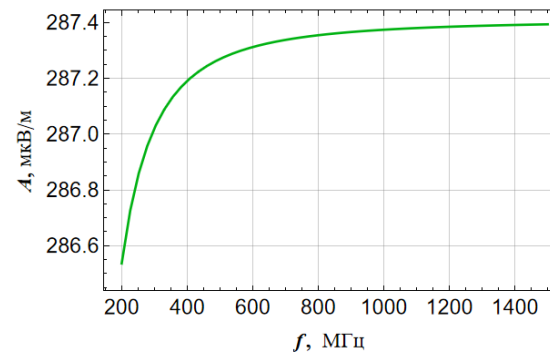
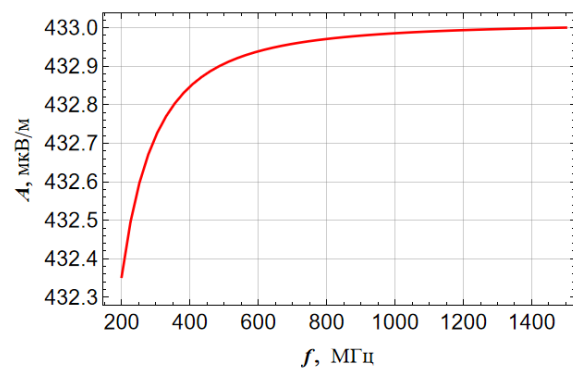
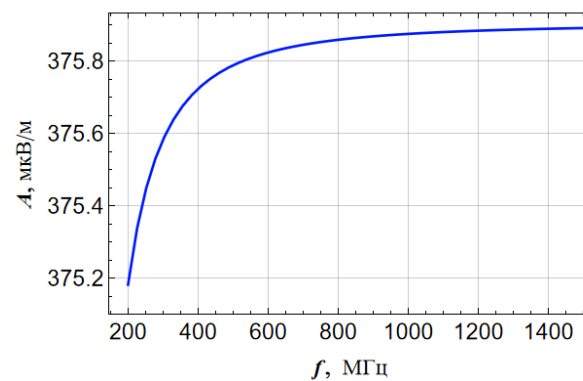
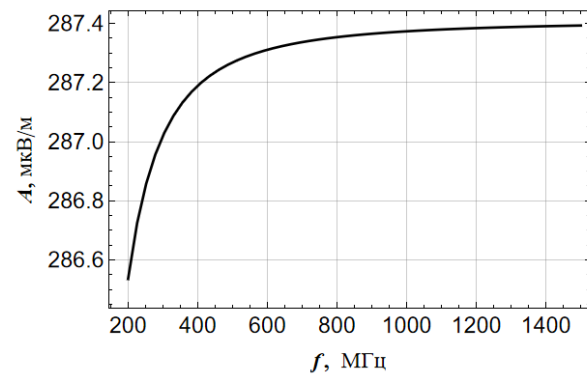
Зависимость поглощения от частоты для разных лучевых траекторий



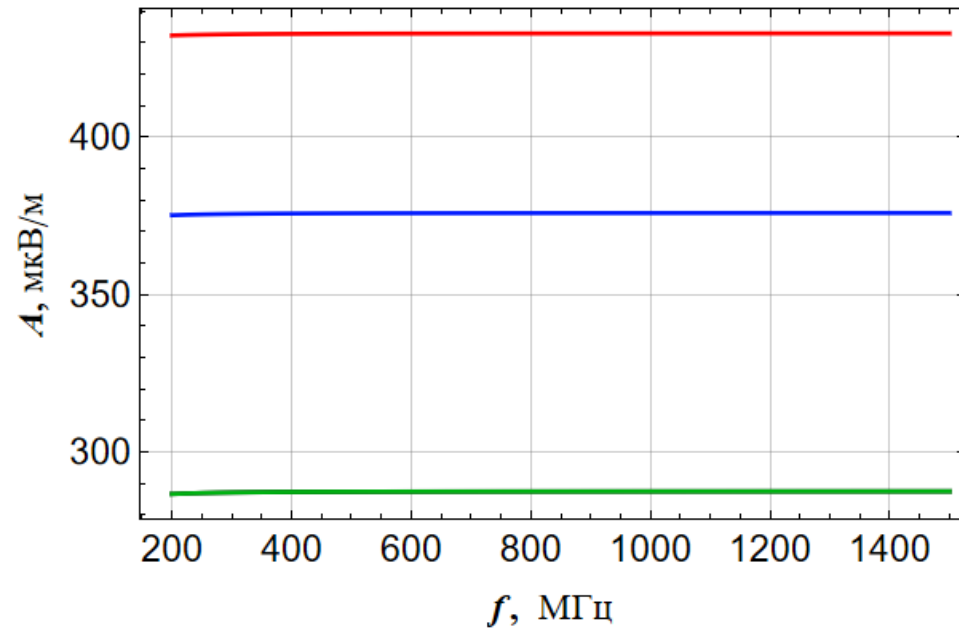
Зависимость эффективной частоты соударений электронов от высоты



Изменение амплитуды A сигнала с частотой f



Зависимость амплитуды от частоты



Фазовое запаздывание

$$\Phi = \int_0^t k_x dx + k_y dy + k_z dz$$

t – время,

$\vec{r} = (x, y, z)$ – координаты

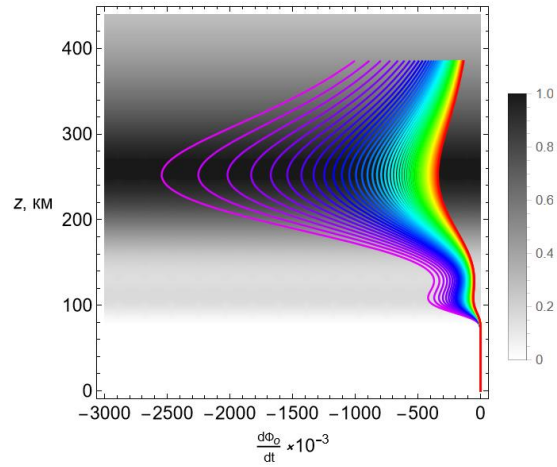
$\vec{k} = (k_x, k_y, k_z)$ – волновой вектор

$$\Phi_0 = \omega \frac{r}{c} \quad \text{– набег фазы } \Phi_0 \text{ в свободном пространстве}$$

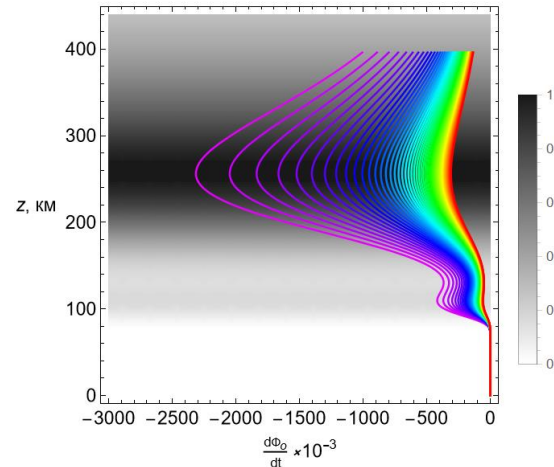
$$\Delta\Phi = \Phi - \Phi_0 \quad \text{– изменение фазы за счёт влияния ионосферы}$$

$$\frac{d\Phi_o(t)}{dt} = \frac{dx}{dt} k_x(t) + \frac{dy}{dt} k_y(t) + \frac{dz}{dt} k_z(t) - \omega \quad \text{– скорость изменения фазы вдоль траектории}$$

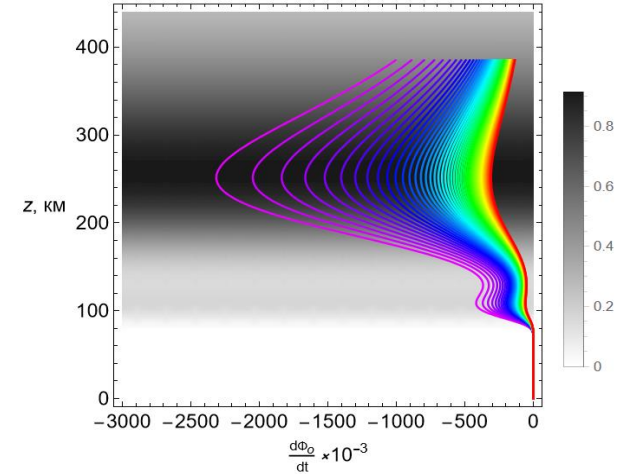
Скорость изменения фазы вдоль лучей на разных частотах



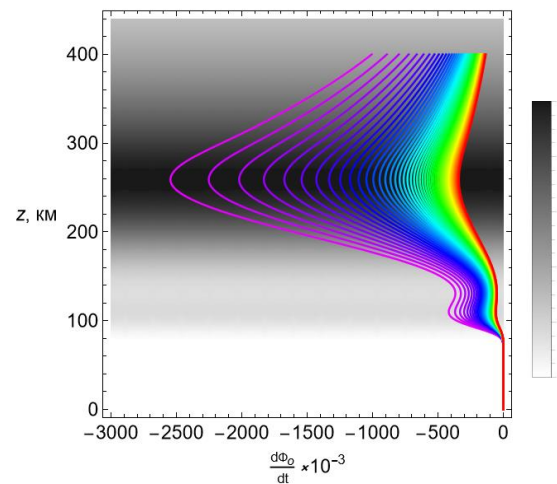
— черный луч



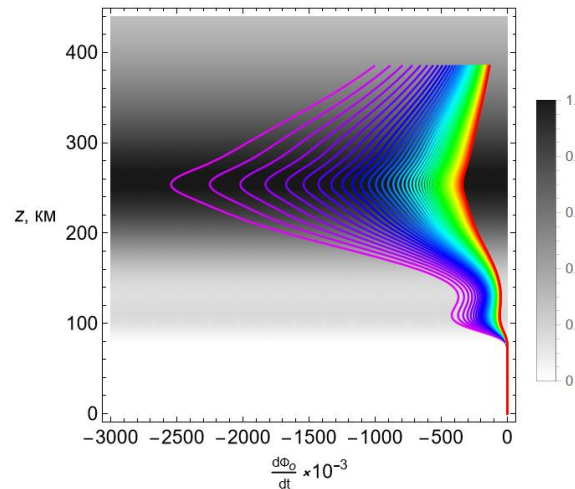
— синий луч



— фиолетовый луч

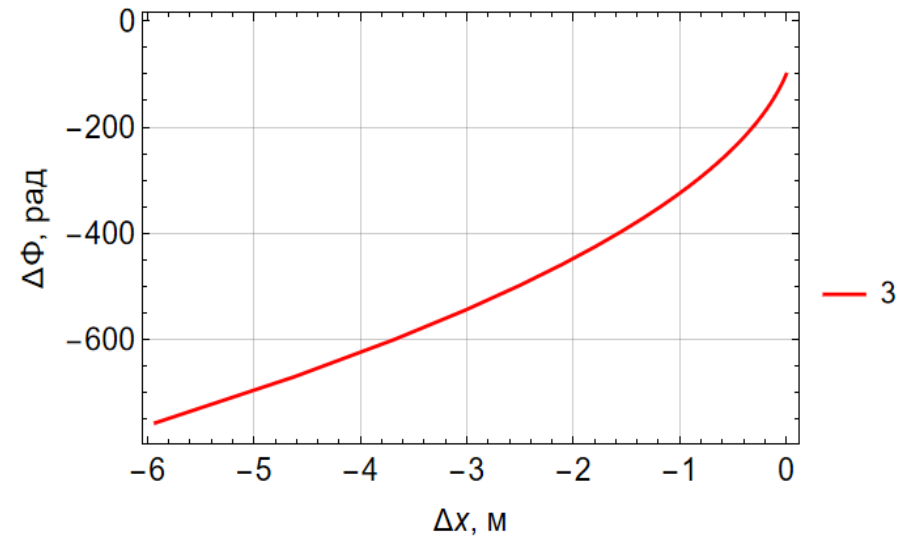
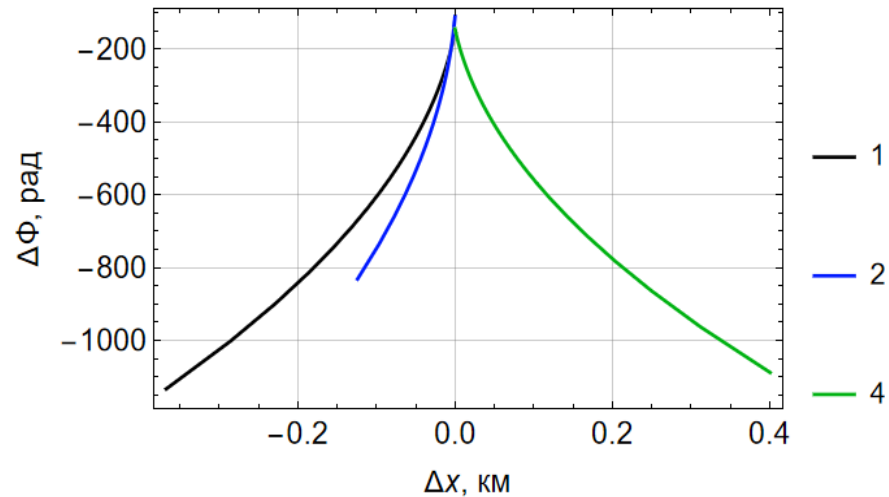


— красный луч

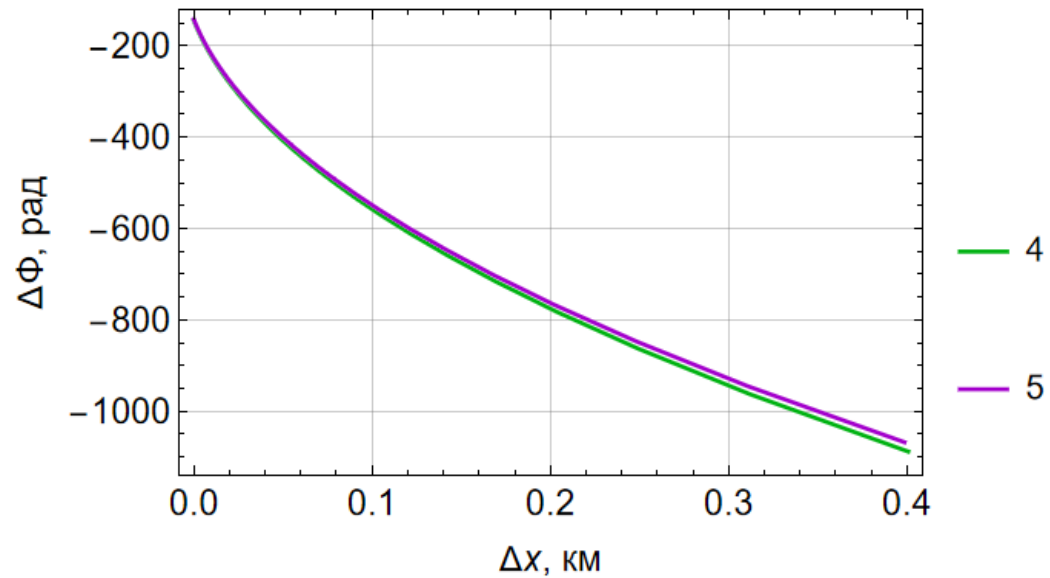


— зелёный луч

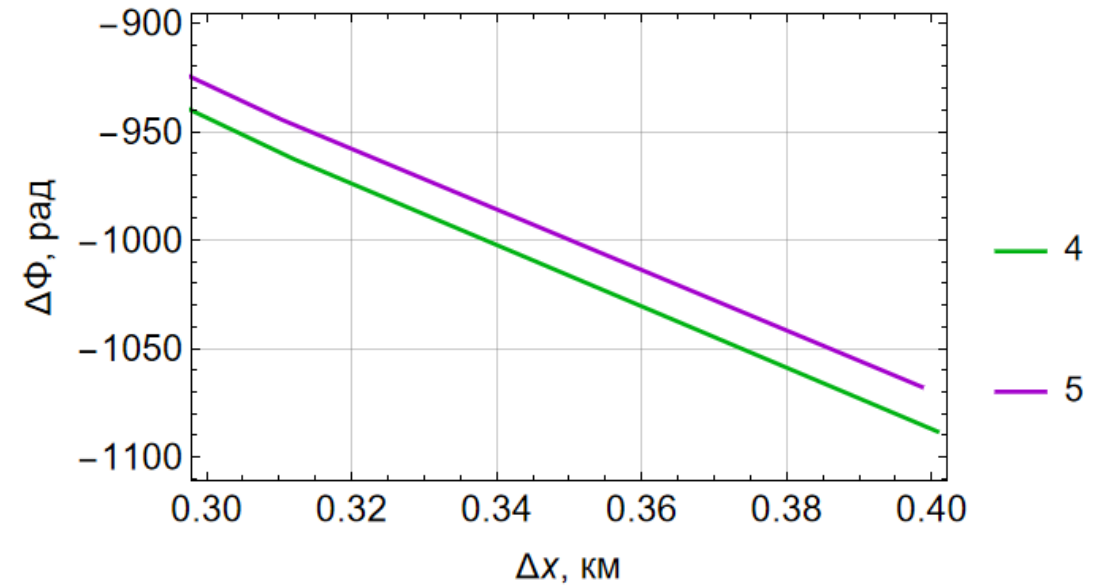
Зависимость девиации фазы $\Delta\Phi$ от приращения Δx в модели с ПИВами



Сравнение зависимости девиации фазы $\Delta\Phi$ от приращения Δx

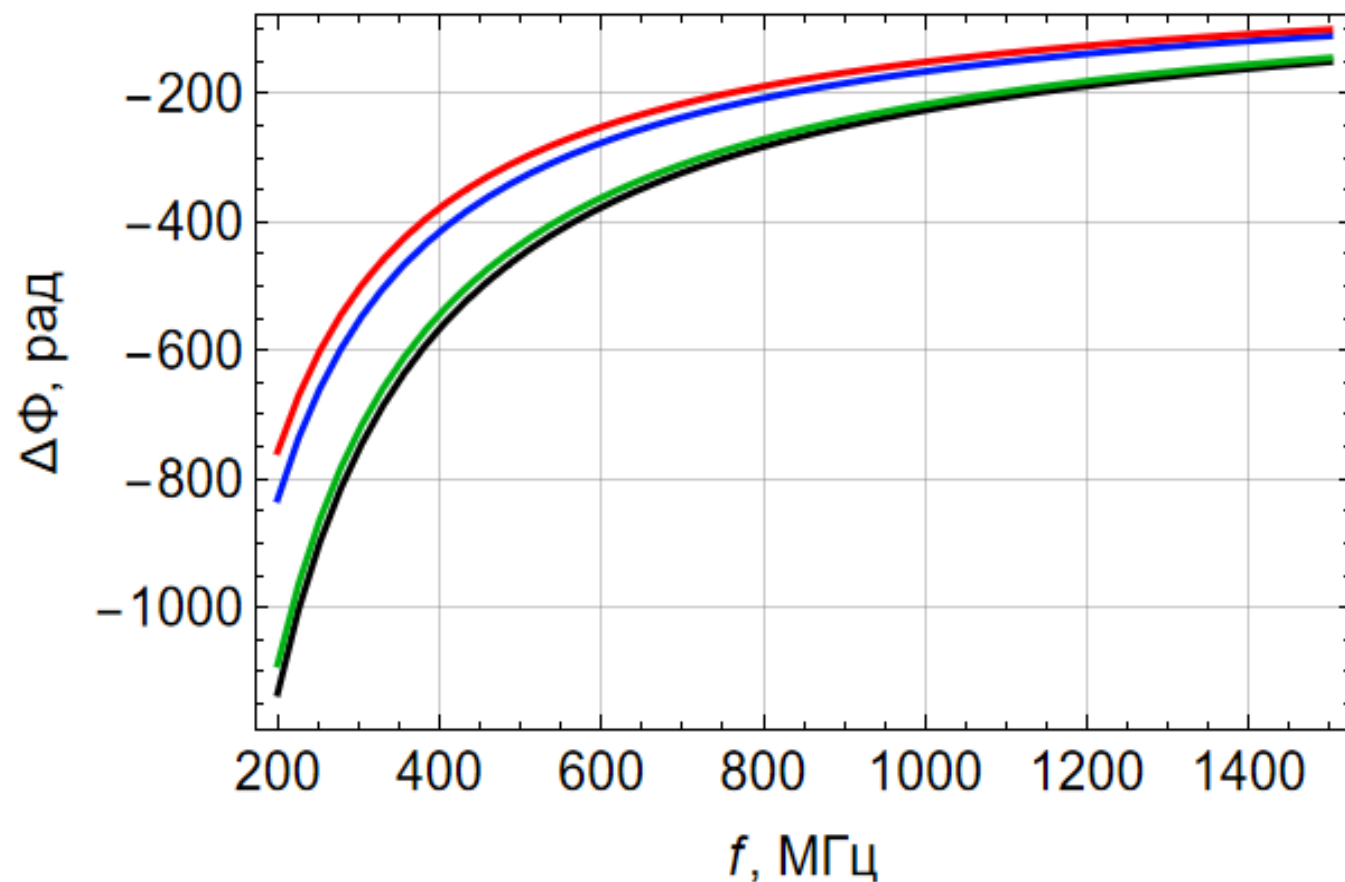


— в моделях с ПИВами (зеленая кривая 4)
и без ПИВов (фиолетовая кривая

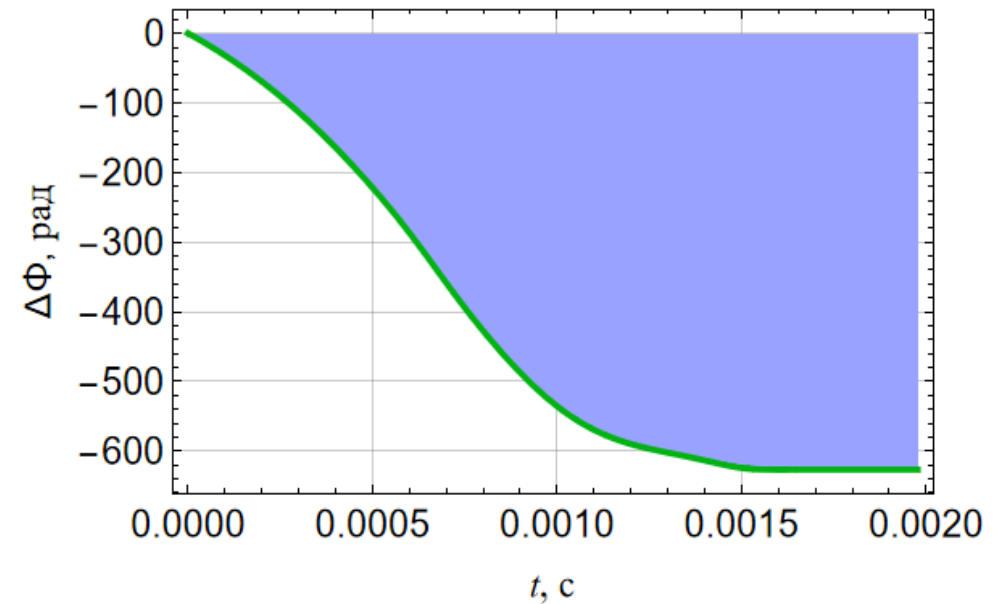
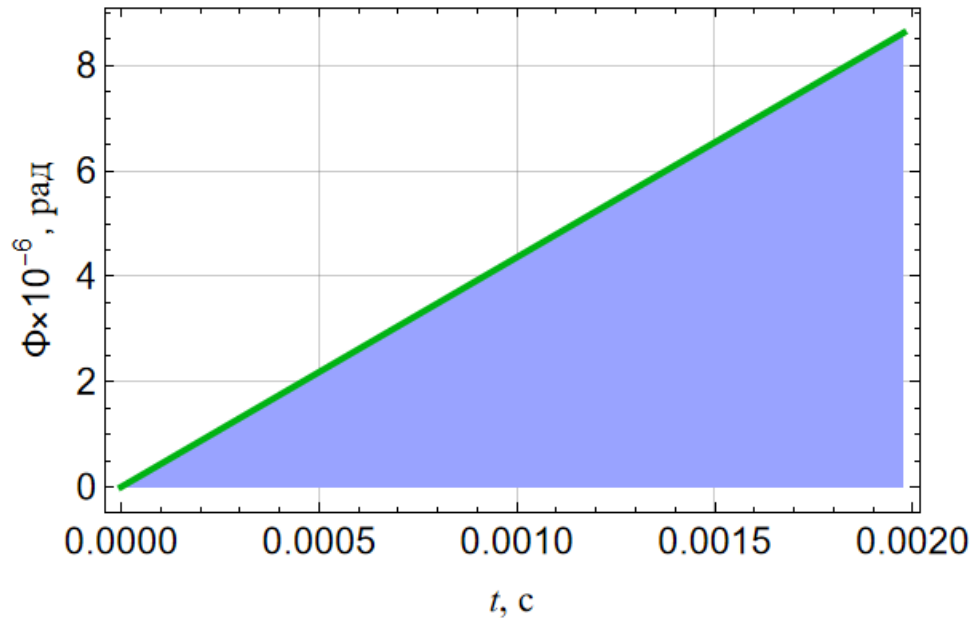


— фрагмент

Девияция фазы $\Delta\Phi$ в точке приёма в зависимости от частоты f



Изменение фазы (а) и девиации фазы (б) вдоль луча



Выбрана траектория 4 и частота 694 МГц.

Зависимость фазы от времени выглядит как линейная (а).

Если убрать линию тренда и оставить только девиацию фазы (б), то картина меняется: девиация сначала быстро нарастает (по модулю), а когда луч покидает ионосферу, остаётся постоянной.

Полная электронная концентрация (ТЕС)

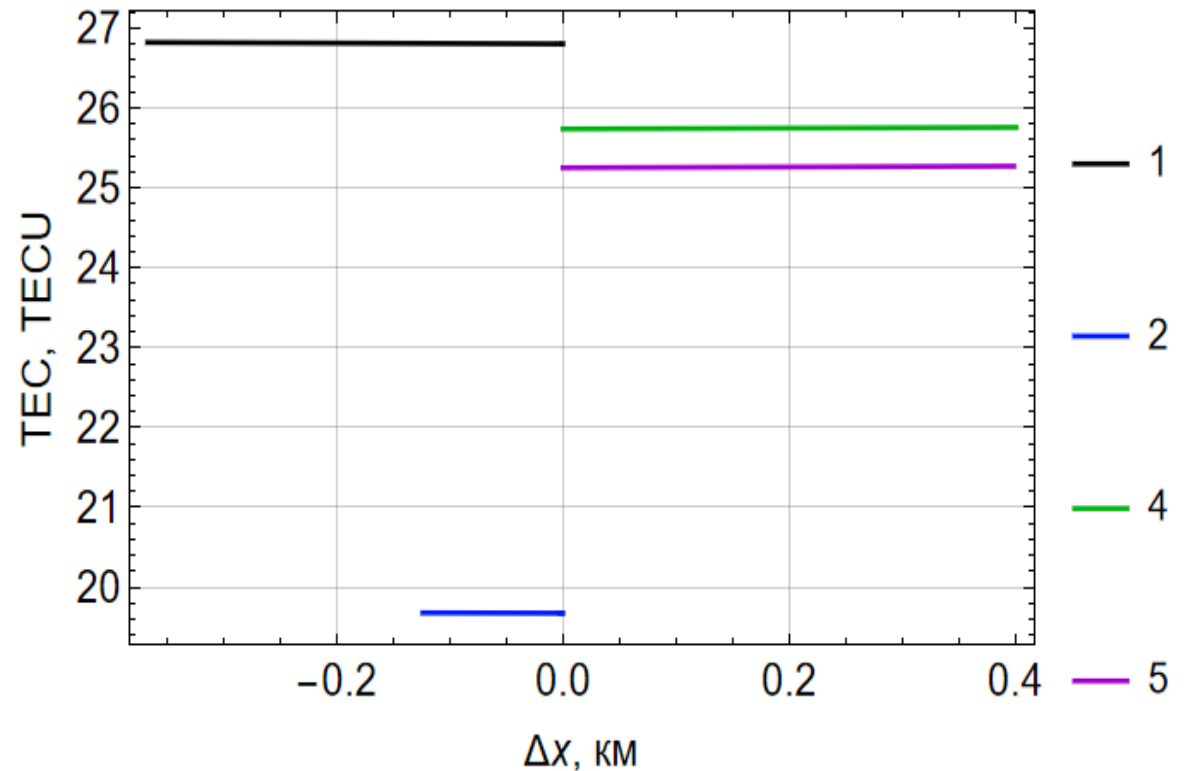
- Формула для расчета полной электронной концентрации (ТЕС)

$$TEC = 10^{-12} \int_0^t N(\mathbf{r}) \sqrt{(x'_\eta)^2 + (y'_\eta)^2 + (z'_\eta)^2} d\eta$$

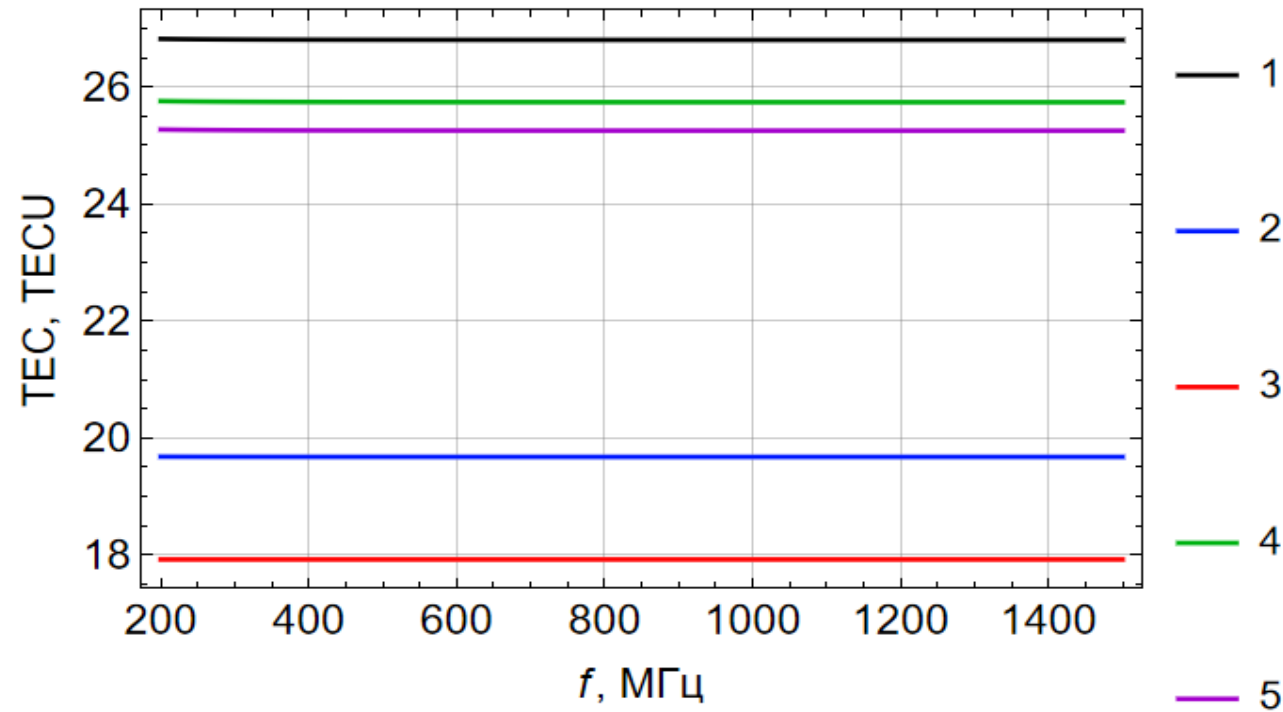
- η – время вдоль траектории, N – электронная концентрация

Зависимость полной электронной концентрации (TEC) от приращения Δx

- Показана зависимость полной электронной концентрации от приращения Δx .
- Значения TEC мало меняются с частотой.
- Для первой траектории $TEC \approx 26.8$ TECU,
- для второй траектории $TEC \approx 19.7$ TECU,
- для третьей траектории (на рис. не показана) $TEC \approx 17.9$ TECU,
- для четвёртой траектории $TEC \approx 25.75$ TECU,
- для пятой траектории (без ПИВ) $TEC \approx 25.3$ TECU.



Зависимость полной электронной концентрации (ТЭС) от частоты f



Поляризация и фарадеевское вращение

- Угол вращения плоскости поляризации Ω рассчитывается по формуле

$$\Omega(t) = \frac{\omega}{2c} \int_0^t \Delta\mu \sqrt{(x'_\eta)^2 + (y'_\eta)^2 + (z'_\eta)^2} d\eta$$

- $\Delta\mu$ – это разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны

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

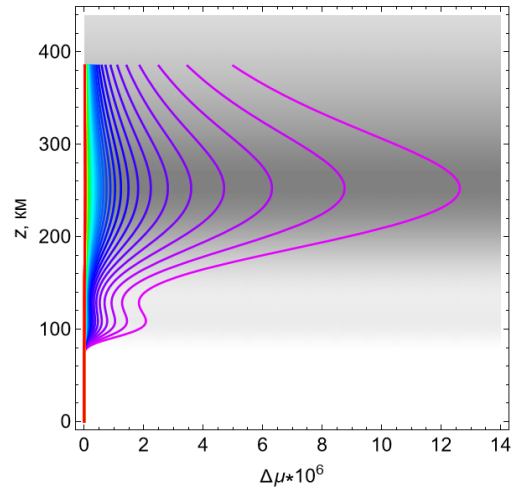
$$Y = \frac{\omega_H}{\omega} = \frac{e H_0}{m_e c \omega}$$

$$X = \left(\frac{\omega_p}{\omega} \right)^2$$

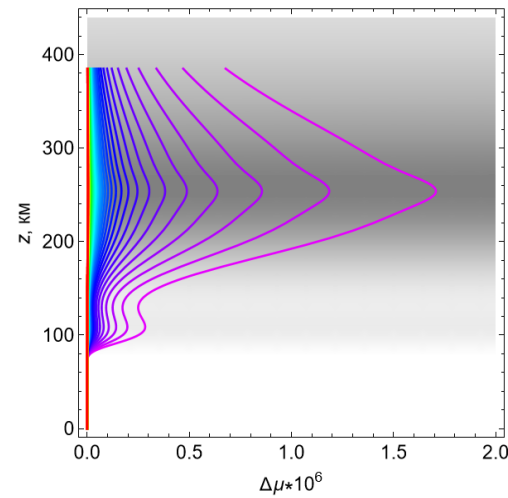
$$\omega_p = \sqrt{\frac{4\pi e^2 N}{m_e}}$$

θ – угол между вектором напряженности магнитного поля Земли и волновым вектором

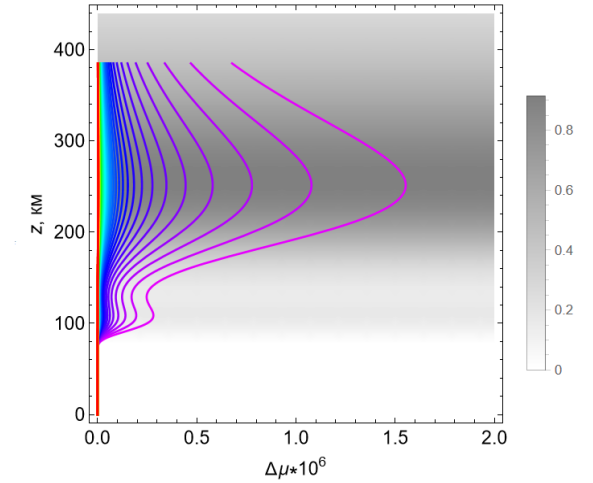
Разность показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны как функция высоты для разных частот



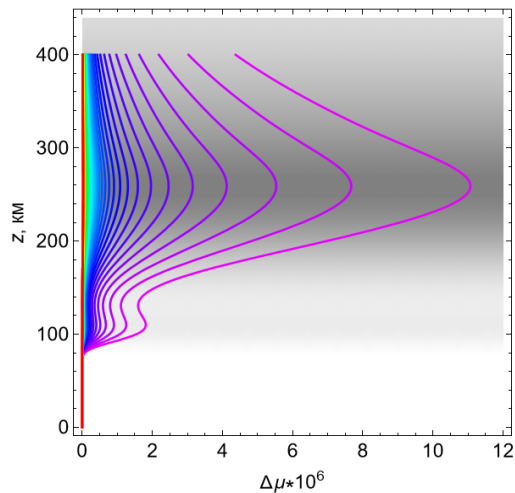
— черный луч



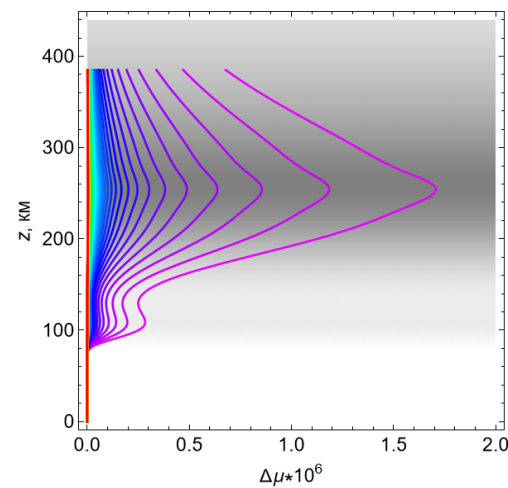
— синий луч



— фиолетовый луч

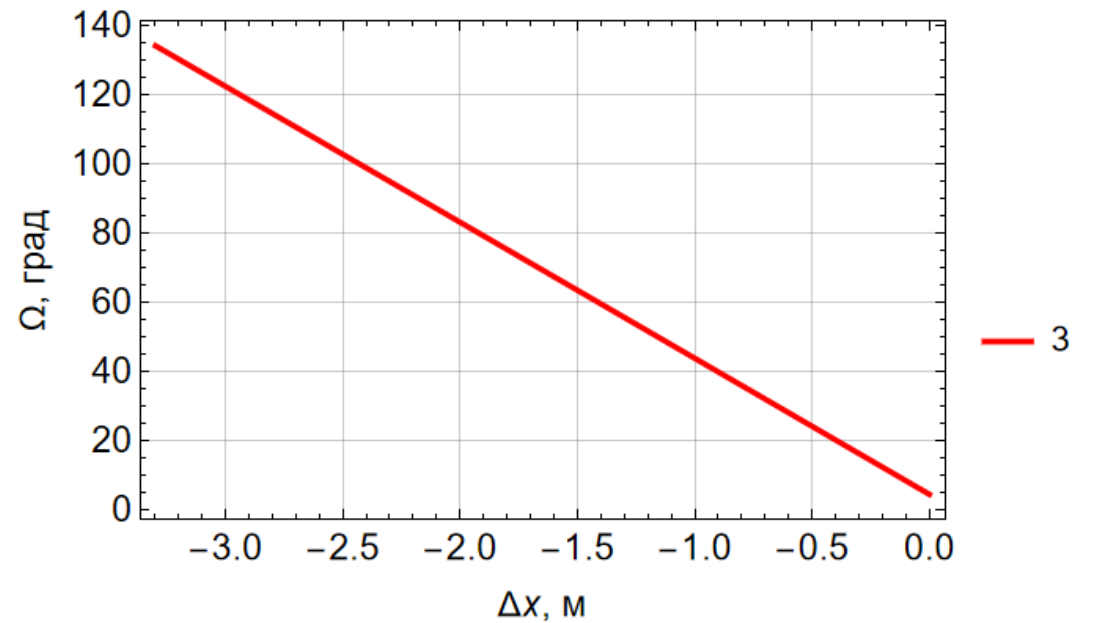
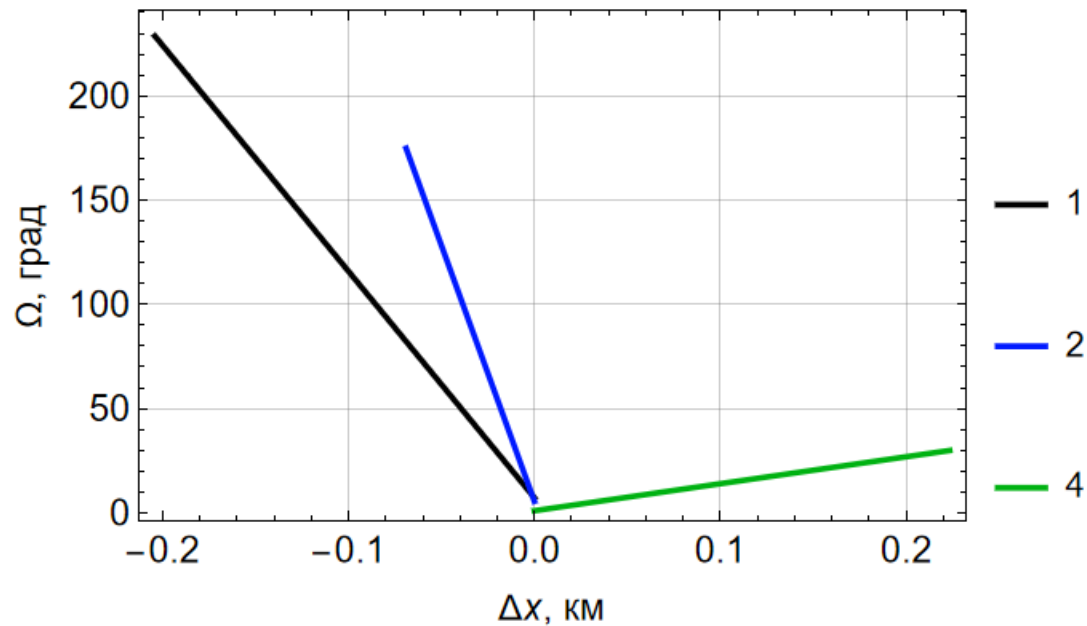


— красный луч

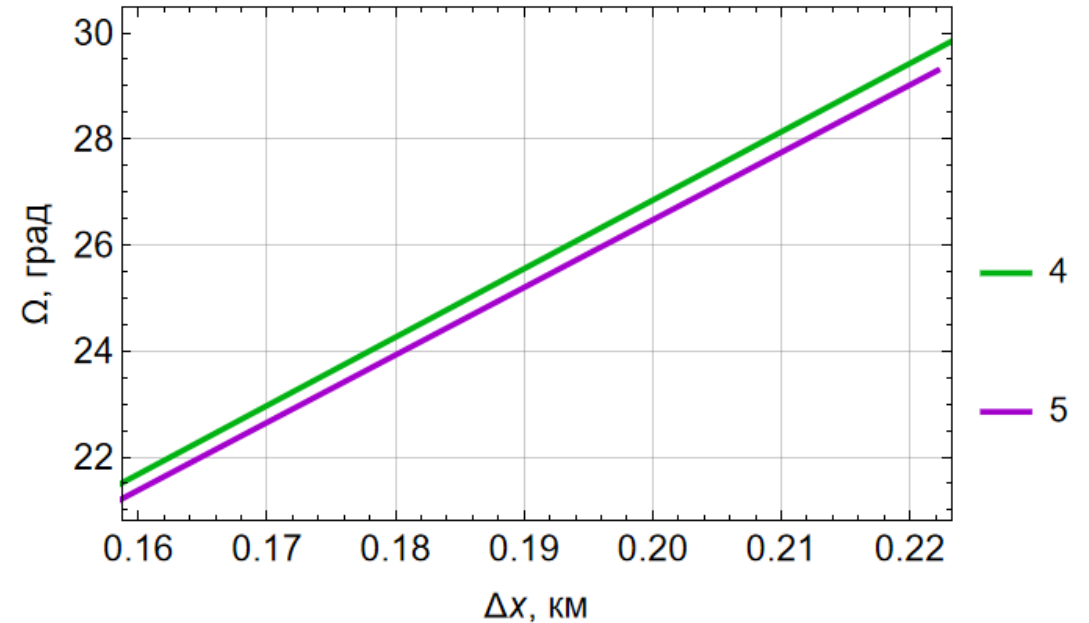
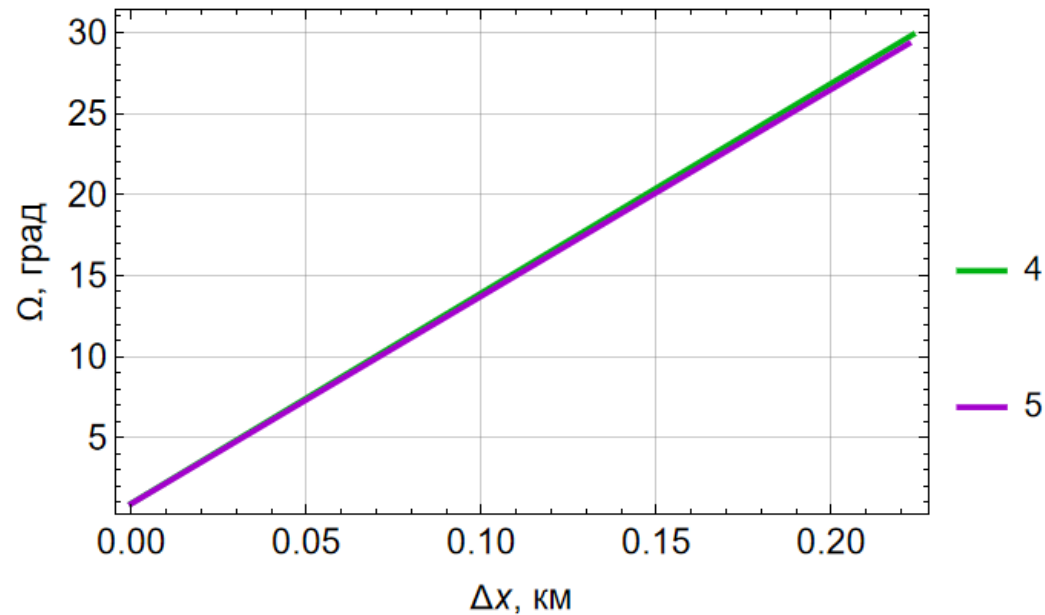


— зелёный луч

Зависимость угла фарадеевского вращения Ω от приращения Δx в модели с ПИВами



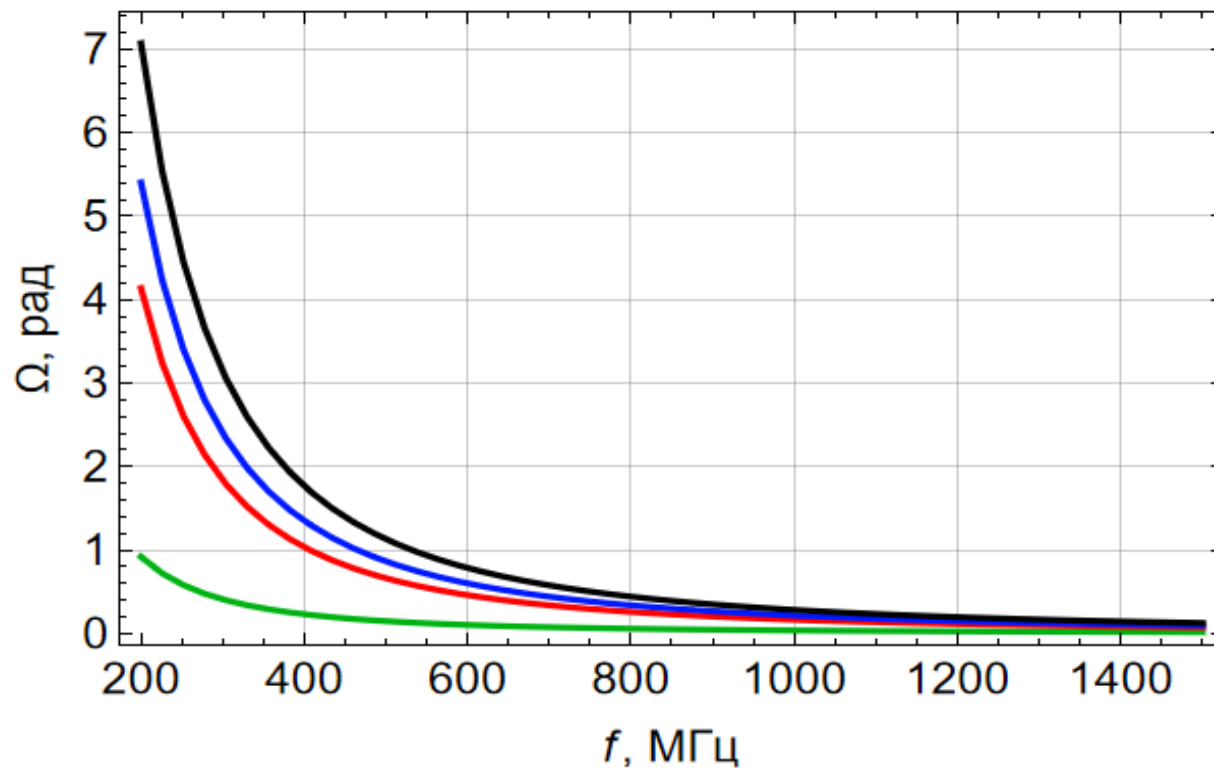
Сравнение зависимостей угла фарадеевского вращения Ω от приращения Δx



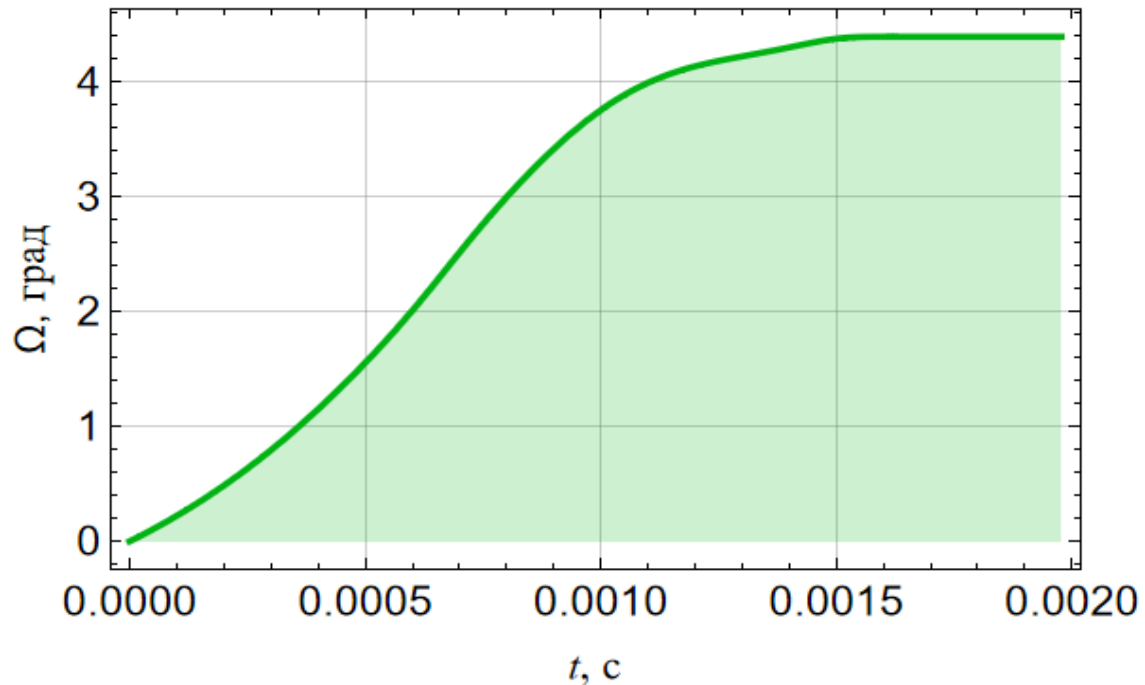
фрагмент

Линии очень близки, однако на 200 МГц отличие может составлять 0.5 градуса даже в случае четвёртого луча, для которого фарадеевское вращение минимально

Зависимости угла фарадеевского вращения Ω от частоты f



Изменение угла фарадеевского вращения вдоль лучевой траектории



Если источник излучения расположен в ионосферной плазме, то при распространении сигнала вдоль луча угол фарадеевского вращения сначала ускоренно нарастает, потом зависимость становится линейной, далее скорость изменения угла медленно уменьшается с уменьшением электронной концентрации.

Покинув ионосферный слой, угол вращения перестаёт меняться и остаётся постоянным до встречи с Землей.

Выводы

- влияние поглощения на амплитуду радиосигнала на выбранных частотах невелико (меньше 1 мкВ/м);
- ошибка полного электронного содержания вдоль выбранной трассы не превышает 0.02 TECU;
- отклонения луча от прямолинейного распространения может на наклонных трассах на частоте 200 МГц достигать 400 м по горизонтали и превышать 12 м по вертикали;
- угол фарадеевского вращения существенно зависит от ориентации трассы относительно магнитного поля Земли и на 200 МГц принимает значения от 1 до 7 радиан в зависимости от ориентации трассы; с ростом частоты значения угла быстро уменьшаются;
- девиация фазы отрицательная, по модулю это сотни радиан, и даже для частоты 1500 МГц девиация составляет более 100 рад.
- прохождение траектории через ПИВ слабо сказывается на интегральных характеристиках, но оказывает существенное влияние на дифференциальные;
- на выбранных частотах коэффициенты поляризации по модулю близки к единице, а продольной (вдоль траектории) компонентой поля можно пренебречь.