

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН УКВ-ДИАПАЗОНА

Д.С. Лукин, Д.В. Растягаев

Российский новый университет, Москва, Россия
rdv@rosnou.ru

STUDYING THE INFLUENCE OF THE EARTH'S IONOSPHERE ON VHF RADIO WAVE PROPAGATION

D.S. Lukin, D.V. Rastyagaev

Russian New University, Moscow, Russia
rdv@rosnou.ru

Аннотация. Исследуется влияние ионосферы Земли на поляризационные характеристики радиоволн мегагерцового диапазона. Рассмотрен частотный диапазон, пограничный для применимости понятия «фарадеевское вращение», т. е. рассмотрены частоты, для которых представление о распространении радиоволн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией вдоль одной и той же траектории является весьма условным. Проанализировано влияние ионосферы Земли на характеристики высокочастотных радиосигналов в зависимости от пространственной модели ионосферной плазмы, географических координат, ориентации магнитного поля, ионосферных неоднородностей. К таким характеристикам относятся угол фарадеевского вращеня, девиация фазы, отклонение траектории радиосигнала и другие. Проведено сопоставление результатов моделирования поляризационных характеристик декаметрового и дециметрового диапазонов.

Ключевые слова: ионосфера, девиация фазы, фарадеевское вращение, поляризационные характеристики, распространение декаметровых и дециметровых радиоволн.

Abstract. We study the Earth's ionosphere effect on polarization characteristics of radio waves in megahertz range. The frequency range is considered, which is borderline for the applicability of the concept of "Faraday rotation", that is, the frequencies are considered for which the idea of the propagation of radio waves with ordinary and extraordinary polarization along the same trajectory is very conditional. The effect of the Earth's ionosphere on the characteristics of high-frequency radio signals is analyzed depending on the spatial model of the ionospheric plasma, geographic coordinates, magnetic field orientation, and ionospheric inhomogeneities. These characteristics include Faraday rotation angle, phase deviation, deviation of the radio signal trajectory, and others. We compare the results of modeling of polarization characteristics in decameter and decimeter ranges.

Keywords: ionosphere, phase deviation, Faraday rotation, polarization characteristics, propagation of decameter and decimeter radio waves.

ВВЕДЕНИЕ

Необходимость решения задач радиосвязи, радионавигации, радиолокации, а также проблемы дистанционного зондирования среды распространения делают актуальным изучение распространения электромагнитных волн в верхней и нижней атмосфере. 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 круга задач. Полученные таким образом решения не охватывают всего многообразия реальных характеристик неоднородных сред, представляющих непосредственный интерес для практического исследования. Применение лучевых (асимптотических) методов волновой теории, с одной стороны, и численных методов с другой, позволяет значительно продвинуться в этой области.

Лучевые методы являются традиционным инструментом исследования процессов распространения коротких волн в различных средах [Казанцев и др., 1967; Лукин, Спиридонов, 1969; Лукин, Палкин, 1982; Крюковский и др., 2009].

Настоящая работа посвящена исследованию влияния ионосферы Земли на поляризационные характеристики радиоволн мегагерцового диапазона. Актуальность работы определяется необходимостью совершенствования методов расчета излучения, про-

ходящего 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]. В работе рассматривается частотный диапазон, для которого представление о распространении радиоволн с обыкновенной и необыкновенной поляризацией вдоль одной и той же траектории является весьма условным (пограничным для применимости понятия «фарадеевское вращение»). Проведен анализ влияния ионосферы Земли на параметры высокочастотных радиосигналов в зависимости от пространственной модели ионосферной плазмы для заданных географических координат и ориентации магнитного поля. Исследованы следующие характеристики: поворот вектора поляризации (угол фарадеевского вращеня), фазовый сдвиг (девиация фазы), отклонение угла прицеливания, отклонение траектории радиосигнала от прямой, поляризационные коэффициенты и другие.

МЕТОД БИХАРАКТЕРИСТИК ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ РАДИОВОЛН

В основе лучевых методов лежит система обыкновенных дифференциальных уравнений Гамильтона. При моделировании лучевых траекторий в плазме

гамильтонову бихарактеристическую систему уравнений можно преобразовать к следующему виду [Казанцев и др., 1967; Лукин, Спиридонов, 1969; Казанцев, Лукин, 1967а; Казанцев, и др., 1967в; Крюковский и др., 2015; Крюковский, Скворцова, 2016]:

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

где Γ — гамильтониан

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

В формулах (1), (2) введены обозначения: \vec{k} — волновой вектор; $\vec{r} = (x, y, z)$ — координаты луча; f — рабочая частота излучения; $\omega = 2\pi f$ — круговая частота; t — параметр вдоль лучевой траектории (групповое время); $\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega)$ — эффективная диэлектрическая проницаемость среды распространения.

Для рабочих частот излучения дециметрового диапазона плазменная частота ω_p

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

много меньше рабочей частоты ω , тогда можно считать, что

$$\varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega) = 1 - v, \quad v = \frac{\omega_p^2}{\omega^2}. \quad (4)$$

В формулах (3), (4) m_e — масса электрона; e — заряд электрона; $N(\vec{r})$ — электронная концентрация.

При более низкой частоте (десятки мегагерц) среду распространения уже нельзя считать изотропной. Поэтому для вычисления эффективной диэлектрической проницаемости применена формула Эпплтона—Хартри (Лассена) [Дэвис, 1973; Гинзбург, 1967]:

$$\varepsilon_{\pm} = 1 - \frac{2v(1-v)}{2(1-v) - u \sin^2 \theta \pm \sqrt{u^2 \sin^4 \theta + 4u(1-v)^2 \cos^2 \theta}}, \quad (5)$$

где величина u — отношение квадрата гирочастоты частоты ω_H к квадрату рабочей частоты

$$u = \left(\frac{\omega_H}{\omega} \right)^2 = \frac{e^2 H_0^2}{m_e^2 c^2 \omega^2}, \quad (6)$$

где H_0 — величина напряженности магнитного поля Земли.

В формуле (5) θ — угол между волновым вектором \vec{k} и вектором напряженности магнитного поля Земли $\vec{H}_0 = (H_{0x}, H_{0y}, H_{0z})$, ориентация которого задается углами γ и φ :

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

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

Угол φ противоположен углу магнитного склонения, а угол γ — углу магнитного наклонения. В расчетах, приведенных в работе, предполагалась, что $\varphi=0$, а $\gamma=-57^\circ$. Знак «+» в формуле (5) соответствует обыкновенной волне, «-» — необыкновенной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В работе в качестве модельных задач исследуется распространение радиоволн мегагерцового диапазона в ионосфере 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 и 460 МГц. Геометрия задачи показана на рис. 1: орбита КА показана черной толстой линией, в нижней части — поверхность Земли, на которой расположен приемник. Распределение электронной концентрации показано серым цветом. Более темные области соответствуют более высокой концентрации электронов в соответствии с легендой, на которой 1 ед. = 10^6 см^{-3} . В работе выбрана двуслойная модель ионосферы, содержащая слои F (верхний) и E (нижний).

Показаны траектории лучей, приходящих в точку наблюдения, в плоскости распространения XZ. При движении КА слева направо угол наклона лучей в точке приема меняется от 150° до 30° относительно положительного направления оси X. Начальный волновой вектор $\vec{k}(0)$ определяется углом выхода луча. Видно, что при частоте излучения 460 МГц все лучи — прямые линии (панель б), однако при частоте 20 МГц (панель а) отклонение крайних лучей довольно заметно. Различия в траекториях лучей о- и х-волн в рамках масштаба рисунка незаметны.

Ниже показаны графики полного электронного содержания TEC вдоль лучей в зависимости от времени t и координаты x , вычисленные в точке приема (рис. 2, а), а также зависимость группового времени t от координаты x (рис. 2, б).

Несовпадение кривых на рис. 2, а объясняется отличием лучевых траекторий для различных типов волн. Из рис. 2, б видно, что максимальное групповое время для частоты 460 МГц существенно меньше, чем для частоты 20 МГц.

ДЕВИАЦИЯ ФАЗЫ

Исследуем зависимость скорости изменения фазы (производной фазы по групповому времени) от высоты. Величина определяется формулой:

$$\Phi'_0(t) = \frac{dx}{dt} k_x(t) + \frac{dy}{dt} k_y(t) + \quad (8)$$

$$+ \frac{dz}{dt} k_z(t) = \Phi'(t) - \omega.$$

Далее проинтегрировав производную (8)

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

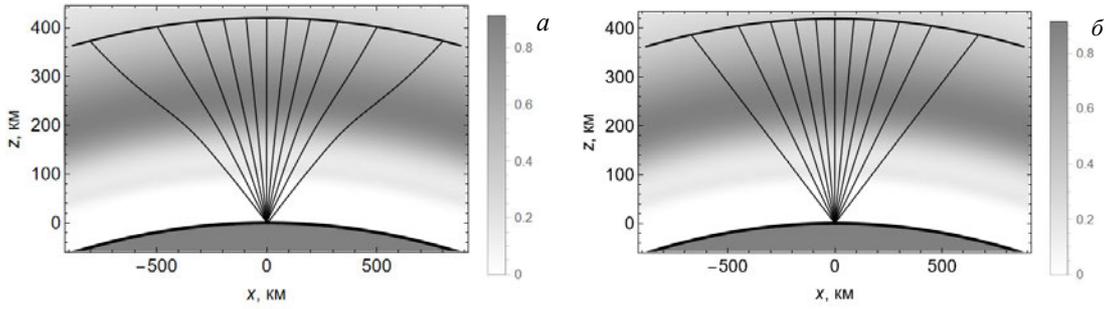


Рис. 1. Лучевые траектории и распределение электронной концентрации в ионосфере: а — $f=20$ МГц; б — $f=460$ МГц

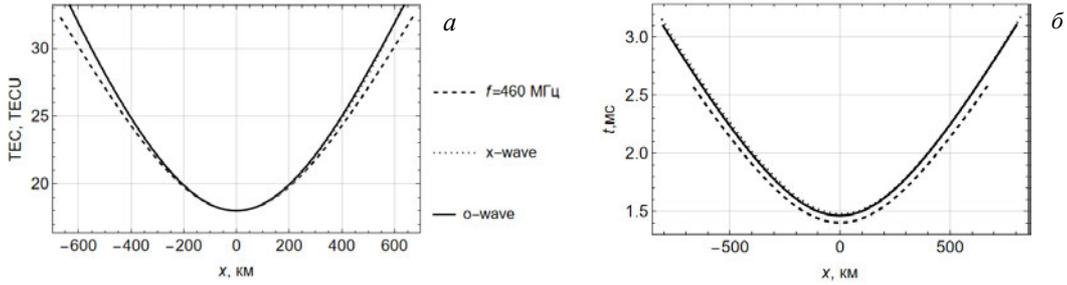


Рис. 2. Графики ТЕС вдоль лучей от координаты x (а); зависимость группового времени t от координаты x выхода луча (б)

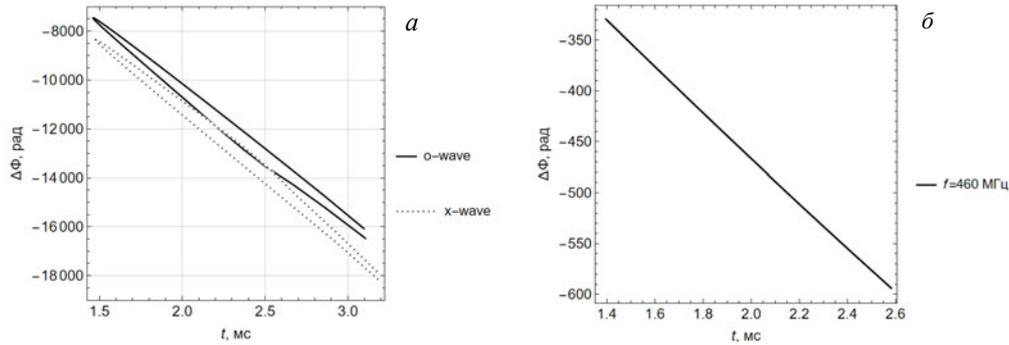


Рис. 3. Зависимость девиации фазы $\Delta\Phi$ от группового времени t для $f=20$ МГц (а); $f=460$ МГц (б)

определяем $\Delta\Phi$ — зависимость отклонения (девиации) фазы от группового времени в точке приема сигнала (рис. 3).

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

В формуле (10) $\omega R/c$ — фаза луча вдоль траектории в отсутствии ионосферного слоя.

Каждая кривая на панели а имеет две ветви. Крайнее левое значение девиации фазы соответствует вертикальному лучу (см. рис. 1). Сравнивая на рис. 3 панели а, б, видим, что при частоте 460 МГц кривая не расщепляется и абсолютное значение девиации фазы существенно меньше.

ВРАЩЕНИЕ ПЛОСКОСТИ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Известно, что при распространении обыкновенной волна и необыкновенной волны вдоль одной и той же лучевой траектории, можно говорить о вращении плоскости поляризации (фарадеевском вращении) [Дэвис, 1973]. Угол фарадеевского вращение Ω находится интегрированием вдоль лучевой траектории разности $\Delta\mu$ показателей преломления обыкновенной и необыкновенной волны [Бова и др., 2018; Дэвис, 1973; Гинзбург, 1967]:

венной и необыкновенной волны [Бова и др., 2018; Дэвис, 1973; Гинзбург, 1967]:

$$\Omega(t) = \frac{1}{2} \times \quad (11)$$

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

Проведя вычисления, можно установить, что абсолютные значения $\Delta\mu$ в случае рабочей частоты 460 МГц на 4 порядка меньше, чем в случае частоты 20 МГц.

На рис. 4 представлена зависимость квадрата косинуса угла θ между волновым вектором и напряженность магнитного поля от высоты для каждого луча.

Для крайнего правого луча (см. рис. 1) $\cos^2\theta$ близок к нулю ($\theta=93^\circ$). Существует луч, для которого $\cos^2\theta$ близок к единице, так как θ близок к нулю.

Зависимость угла фарадеевского вращение Ω от группового времени в точке приема сигнала, вычисленная по формуле (12), показана ниже на рис. 5.

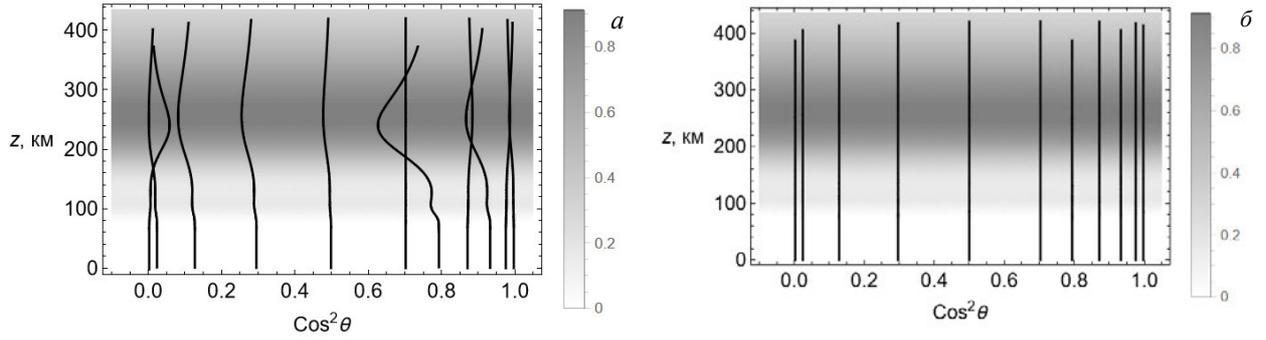


Рис. 4. Зависимость величины $\cos^2\theta$ от высоты вдоль лучей: *a* — $f=20$ МГц; *б* — $f=460$ МГц

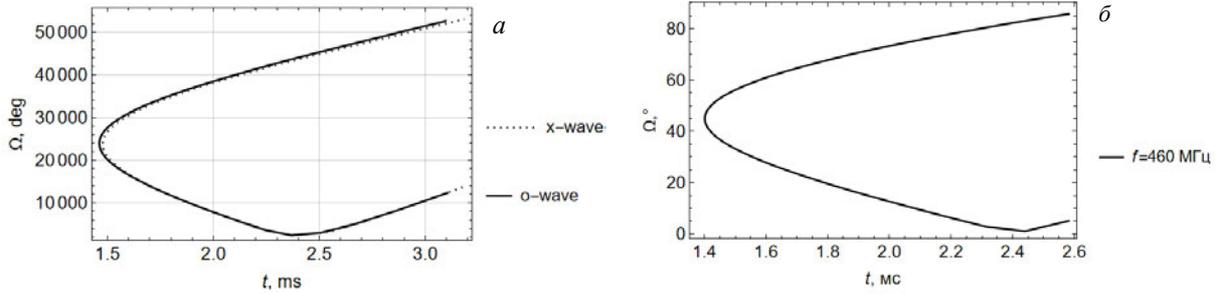


Рис. 5. Зависимость угла Ω от группового времени t : *a* — $f=20$ МГц; *б* — $f=460$ МГц

Для частоты 20 МГц (рис. 5, *a*) говорить о фарадеевском вращении можно довольно условно. На рис. 5, верхняя ветвь кривой соответствует левой части рис. 1, а нижняя ветвь кривой — правой части. Вертикальный луч соответствует левому краю рис. 5.

КОЭФФИЦИЕНТЫ ПОЛЯРИЗАЦИИ

Рассмотрим коэффициенты поляризации волн [Дэвис, 1973] вдоль траекторий, позволяющие определить соотношения между компонентами вектора напряженности электрического поля \vec{E} вдоль лучевых траекторий. Будем считать, что компонента E_2 вектора \vec{E} лежит в плоскости, образованной волновым вектором \vec{k} и вектором напряженности магнитного поля \vec{H}_0 и ортогональна компоненте E_1 . Компонента E_1 направлена вдоль волнового вектора \vec{k} , а компонента E_3 ортогональна компонентам E_1 и E_2 и составляет с ними правую тройку.

Тогда справедливы выражения [Дэвис, 1973]

$$\frac{E_3}{E_2} = R_{\mp}, \quad R_{-} = iR_0, \quad R_{+} = iR_x, \quad (13)$$

где

$$R_{\mp} = \frac{i}{2Y_L} \left(\frac{Y_T^2}{1-\nu} \mp \sqrt{\frac{Y_T^4}{(1-\nu)^2} + 4Y_L^2} \right). \quad (14)$$

В формуле (14) « \rightarrow » соответствует обыкновенной волне, а « \leftarrow » — необыкновенной, введены обозначения

$$Y_L = \sqrt{u} \cos \theta, \quad Y_T = \sqrt{u} \sin \theta. \quad (15)$$

На рис. 6 показан результат численного расчета коэффициента R_0 .

Видно, что большая часть линий сгруппирована в окрестности -1 , что говорит о почти круговой поляризации для этих лучей. Интересно отметить, что хотя при $\theta = \pi/2$ $R_0 = 0$ на частоте 460 МГц, уже при $\theta = 93^\circ$ коэффициент R_0 близок к $+1$ и поляризация волны опять становится круговой.

Коэффициент R_x может быть вычислен из соотношения $R_0 R_x = 1$ (см. [Дэвис, 1973]).

Отношение продольной электрической компоненты волнового поля к поперечной определяет соотношение (16)

$$\frac{E_1}{E_2} = \operatorname{tg} \psi_{\alpha, x} = -\frac{R_{0,x} Y_T}{1-\nu} (1 - \epsilon_{\pm}) \quad (16)$$

Результаты численного моделирования в случае обыкновенной волны показаны на рис. 7.

Анализируя результаты проведенных расчетов видно, что продольная компонента по модулю существенно меньше поперечных даже на частоте 20 МГц, а на частоте 460 МГц она пренебрежимо мала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в работе методом бихарактеристик выполнено сравнение поляризационных параметров радиоволн дециметрового (460 МГц) и декаметрового (20 МГц) диапазонов. Рассмотрены эффекты рефракции, фарадеевского вращения и девиации фазы при пролете КА в меридианном направлении, исследованы поляризационные коэффициенты. Представлены результаты математического моделирования. Результаты работы актуальны для решения современных задач радиосвязи, радиолокации и радионавигации, а также задач дистанционного зондирования Земли из космоса [Kutuz et al, 1996; Кутуза, Мошков, 1988; Andreeva, et al, 2016; Franke et al, 2003].

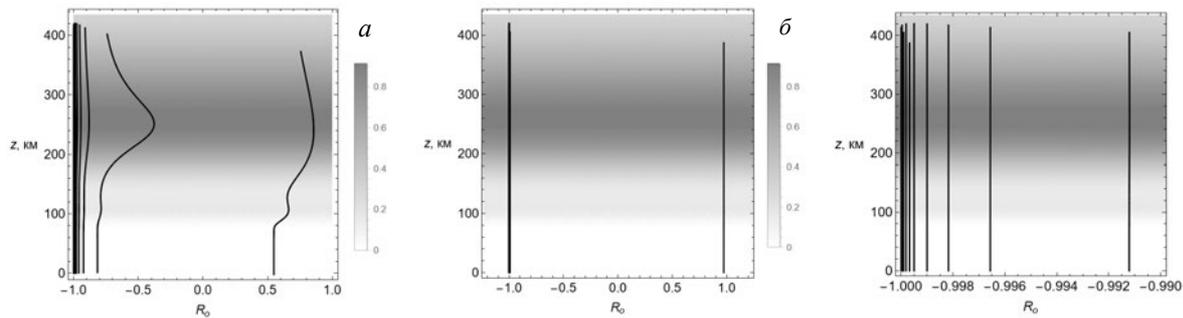


Рис. 6. Коэффициент поляризации R_0 : $f=20$ МГц (а); $f=460$ МГц (б); $f=460$ МГц (фрагмент) (в)

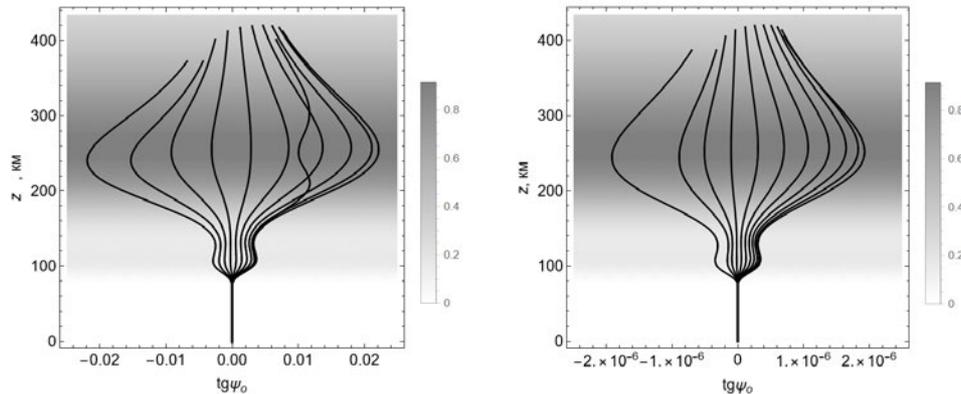


Рис. 7. Отношение $\frac{E_1}{E_2} = \text{tg } \psi_0$ для обыкновенной волны для $f=20$ МГц (а), $f=460$ МГц (б)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Бова Ю.И., Крюковский А.С., Кутуза Б.Г. и др. Исследование влияния ионосферы на распространение электромагнитных волн Р-диапазона. *Физические основы приборостроения*. 2018. Т. 7, № 1 (27). С. 54–61.

Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Выборнов Ф.И. Моделирование распространения дециметровых радиоволн в условиях волновых возмущений концентрации электронов. *Изв. вузов. Радиофизика*. 2018. Т. 61, № 6. С. 462–473.

Гинзбург В.Л. *Распространение электромагнитных волн в плазме*. 2-е изд. М.: Наука, 1967.

Данилкин Н.П., Жбанков Г.А., Журавлев С.В., Котонаева Н.Г. Трансионосферное радиозондирование с учетом отражения радиоволн от Земли. *Геоматематика и аэронавигация*. 2014. Т. 54, № 4. С. 508.

Дэвис К. *Радиоволны в ионосфере*. М.: Мир, 1973. 502 с.

Иванов Д.В. *Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных дециметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений*. Монография. Йошкар-Ола: Марийский гос. технический ун-т. 2006. 266 с.

Ипатов Е.Б., Крюковский А.С., Лукин Д.С. и др. Методы моделирования распространения электромагнитных волн в ионосфере с учетом распределений электронной концентрации и магнитного поля Земли. *Радиотехника и электроника*. 2014. Т. 59, № 12. С. 1180–1187.

Казанцев А.Н., Лукин Д.С. Исследование ионосферного распространения радиоволн. *Радиотехника и электроника*. 1967а. Т. 12, № 2. С. 1891–1910.

Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Спиридонов Ю.Г. Метод исследования распространения радиоволн в неоднородной магнитоактивной ионосфере. *Косм. иссл.* 1967б. Т. 5, вып. 4. С. 593–600.

Казанцев А.Н., Лукин Д.С., Фоминых С.И. Метод рас-

чета рефракции радиоволн и рефракционных ошибок при определении траектории ИСЗ. *Косм. иссл.* 1967в. Т. 5, № 4. С. 602–607.

Крюковский А.С., Кутуза Б.Г., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование поляризационных характеристик радиоволн мегагерцового диапазона в ионосфере Земли. *Труды военно-космической академии им. А.Ф. Можайского*. 2022 (в печати).

Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2009. Т. 14, № 8. С. 17–26.

Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В., Скворцова Ю.И. Математическое моделирование распространения частотно-модулированных радиоволн в ионосферной плазме. *Радиотехника и электроника*. 2015. Т. 60, № 10. С. 1001–1009.

Крюковский А.С., Скворцова Ю.И. Математическое моделирование распространения радиоволн в нестационарной плазме с учетом кривизны поверхности земли и ионосферных слоев. *Вестник Российского нового университета. Сер. Сложные системы: модели, анализ и управление*. 2016. № 1-2. С. 34–40.

Кутуза Б.Г., Мошков А.В. Влияние фарадеевского вращения плоскости поляризации в ионосфере при измерении из космоса радиоизлучения поверхности океана. *Исследование Земли из космоса*. 1988. № 5. С. 94–98.

Лукин Д.С., Палкин Е.А. *Численный канонический метод в задачах дифракции и распространения электромагнитных волн в неоднородных средах*. М.: МФТИ, 1982. 159 с.

Andreeva E.S., Frolov V.L., Kunitsyn V.E., et al. Radiotomography and HF ray tracing of the artificially disturbed ionosphere above the Sura heating facility. *Radio Sci.* 2016. Vol. 51, no. 6. P. 638–644. DOI: [10.1002/2015RS005939](https://doi.org/10.1002/2015RS005939).

Bova Y., Kryukovsky A., Kutuza B., Stasevich V. The influence of ionospheric inhomogeneities on remote sensing of the Earth from space. *Proc. the European Conference on Synthetic Aperture Radar EUSAR-13*. 2021. P. 902–907.

Franke S.J., Yeh K.C., Andreeva E.S., Kunitsyn V.E. A study of the equatorial anomaly ionosphere using tomographic images. *Radio Sci.* 2003. Vol. 38, no. 1. P. 1011–1020.

Kryukovsky A.S., Bova Y.I., Rastyagaev D.V., Kutuza B.G. Effects of ionospheric inhomogeneities on remote sensing of the Earth by space-borne P-band SAR. *Radio Sci.* 2022. Vol. 57, no. 6. e2021RS007341.

Kutuza B.G., Kalinkevitch A.A., Ephimov A.I., et al. Application of SAR operating at P-band for space experiments. *Proc. EUSAR'96*. Germany, Konigswinter, 1996. P. 309–313.