

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
МОСКОВСКИЙ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

---

**М.В. ИСАКОВ, В.А. ПЕРМЯКОВ**

Лабораторная работа № 4  
по курсу  
Электродинамика и распространение радиоволн.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИНИЙ РАДИОСВЯЗИ  
ВЧ (ДЕКАМЕТРОВОГО) ДИАПАЗОНА ВОЛН

УДК 621.396.22:621.371.332.1:551.510.535(076.5)

**Моделирование линий радиосвязи ВЧ (декаметрового) диапазона волн.** /Исаков М.В., Пермяков В.А. -М.: НИУ "МЭИ", -2017, - стр.

Описание лабораторной работы содержит краткие сведения о принципах расчета КВ-радиотрасс, основных параметрах, влияющих на характеристики линии радиосвязи, и методах их определения, домашнее задание и задание к экспериментальной части, а также контрольные вопросы для самостоятельной работы студентов.

Описание лабораторной работы предназначено для студентов радиотехнического факультета.

---

## 1. Введение

Целью данной лабораторной работы является закрепление навыков расчета радиолиний ВЧ (декаметрового) диапазона волн и исследование физических закономерностей, существующих на данных трассах. Ранее этот диапазон назывался диапазоном коротких волн (КВ). Особенностью линий ВЧ (КВ) связи является то, что радиус действия земной волны в этом диапазоне невелик и обычно не превышает нескольких десятков километров. В тоже время радиоволны данного диапазона способны распространяться на расстояния в сотни и тысячи километров и даже возвращаться в исходную точку, обогнув весь Земной шар. Дальнее распространение радиоволн ВЧ-диапазона обусловлено многократным переотражением радиоволны между земной поверхностью и ионосферой. Возможность осуществления связи между различными пунктами при этом определяется в основном состоянием ионосферы.

Расчёт линий ВЧ радиосвязи включает определение диапазона частот, при которых возможна связь, необходимой мощности передатчика, определение максимальной дальности связи при заданной мощности передатчика, расчет надежности связи при заданной мощности на заданной трассе.

Поскольку распространение волн ВЧ-диапазона определяется состоянием ионосферы, рассмотрим сначала структуру ионосферы. Распределение электронов в ионосфере зависит от долготы и широты места, времени суток, времени года и солнечной активности. Типичное изменение концентрации электронов  $N_e$  по высоте для дня и ночи изображено на рис. 1 и 2.

В настоящее время подробно разработана широтная модель ионосферы, которая включает описание наиболее характерных областей ионосферы: область средних широт, экваториальные и низкие широты, главный ионосферный провал, полярные и авроральные пики, полярная полость. Каждая из этих областей имеет свои особенности.

В средних широтах состояние ионосферы определяется в основном коротковолновым излучением Солнца. Параметры ионосферы в этой области сохраняют регулярный характер почти всегда, за исключением ситуации во время очень сильных магнитных бурь.

В экваториальных и низких широтах на распределение  $N_e$  сильно влияет электроструя в области  $E$  ионосферы вблизи геомагнитного экватора. Состояние ионосферы в экваториальной области тесно связано с процессами в высокоширотной и приполярной ионосфере и характеризуется большой изменчивостью.

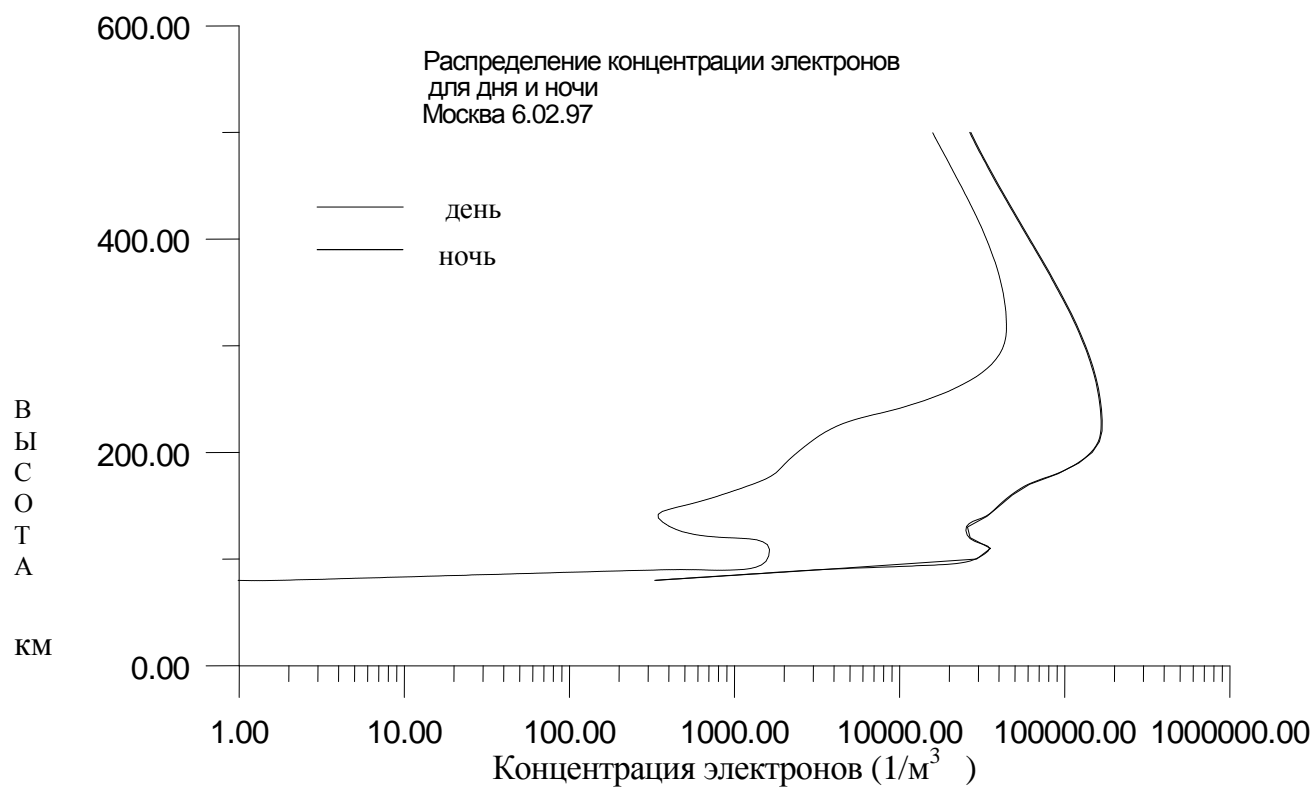


Рис. 1

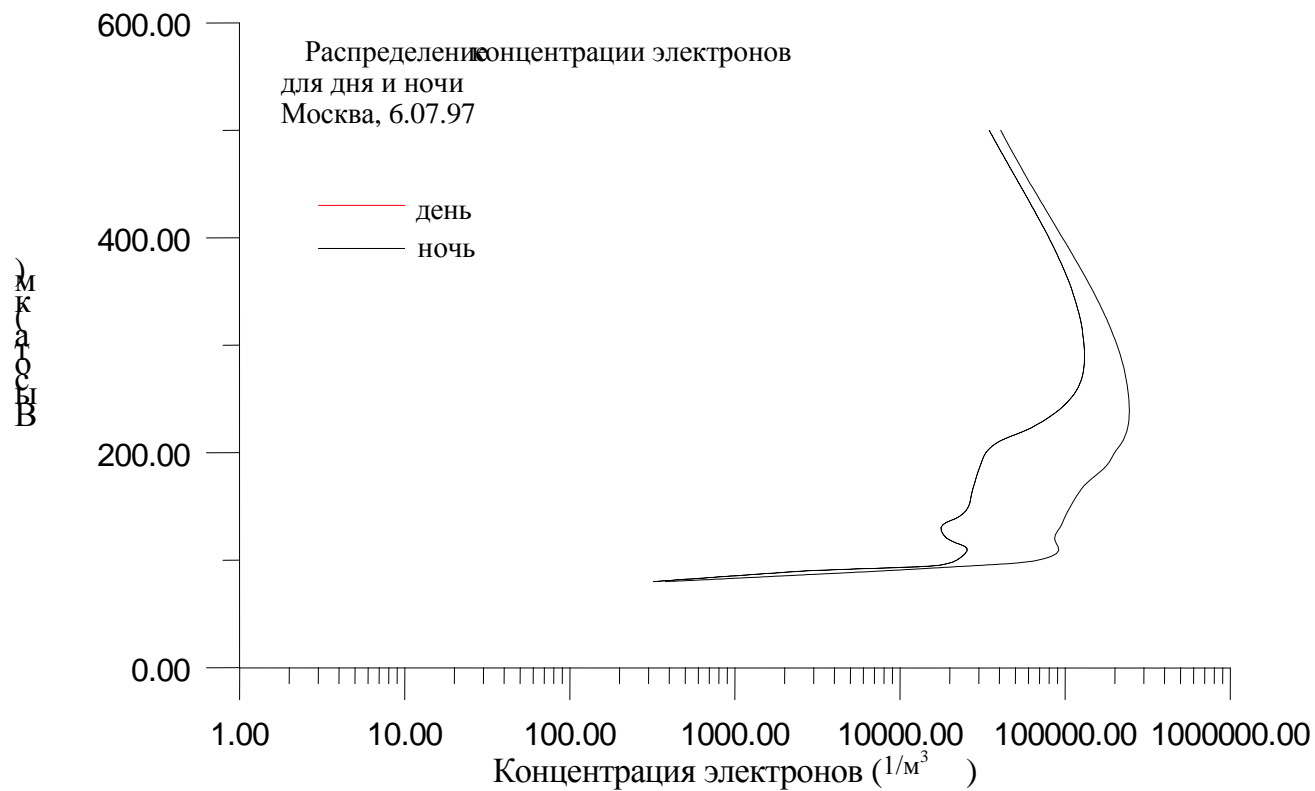


Рис. 2

Главный ионосферный провал представляет собой область пониженной концентрации на широтах  $50^\circ - 60^\circ$ . На больших широтах наблюдаются полярный и авроральные пики распределения электронной концентрации в области  $F$ . Географическое положение этих пиков может лежать в области широт  $75^\circ - 80^\circ$ . Максимум на освещенной области при этом называют полярным пиком, а на ночной стороне – авроральным. На большей широте (непосредственно у полюсов) расположена полярная полость – область пониженной электронной концентрации, которая наиболее отчетливо наблюдается в зимний период.

Изменение распределения концентрации электронов по долготе связано в основном с изменением условий солнечного освещения и в течение суток перемещается по поверхности Земли, отслеживая её вращение.

Пример глобального распределения максимальной концентрации электронов в слое  $F2$  по поверхности Земного шара изображен на рис.3.

Распределение максимального значения концентрации  
3 часа, 15 июня 1994, Москва

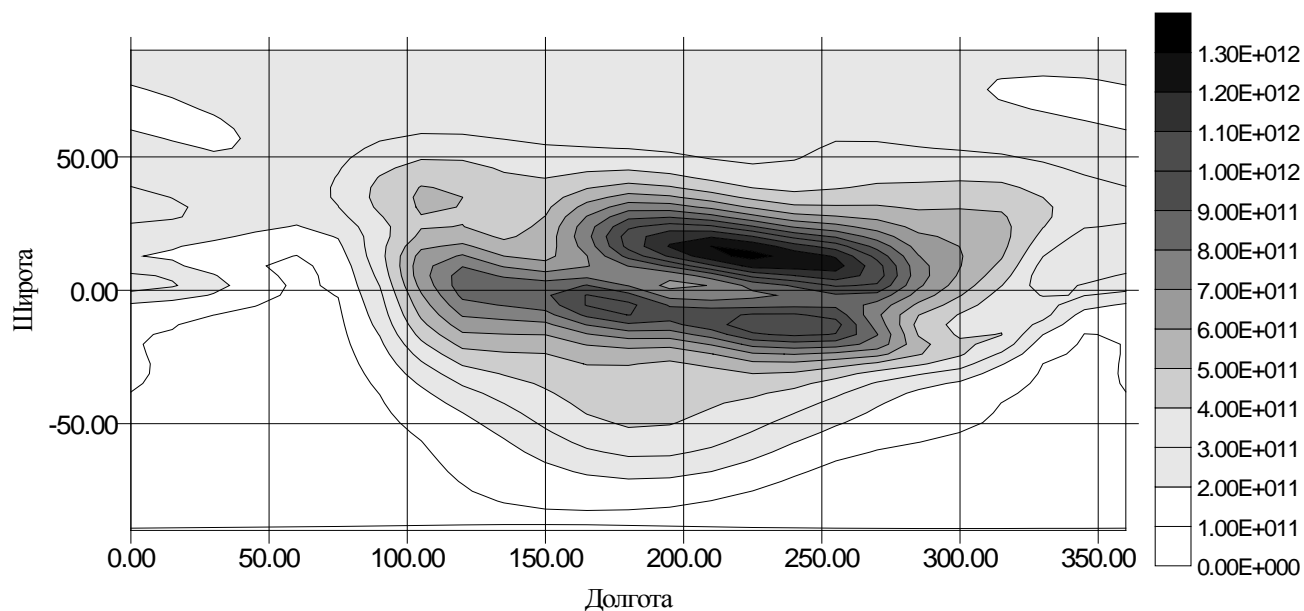


Рис. 3

На рис. 4 приведен пример распределения максимальной концентрации электронов в слое  $E$ .

Распределение максимальной концентрации электронов  
в слое E. 3 часа 15 июня 1994 г. Москва

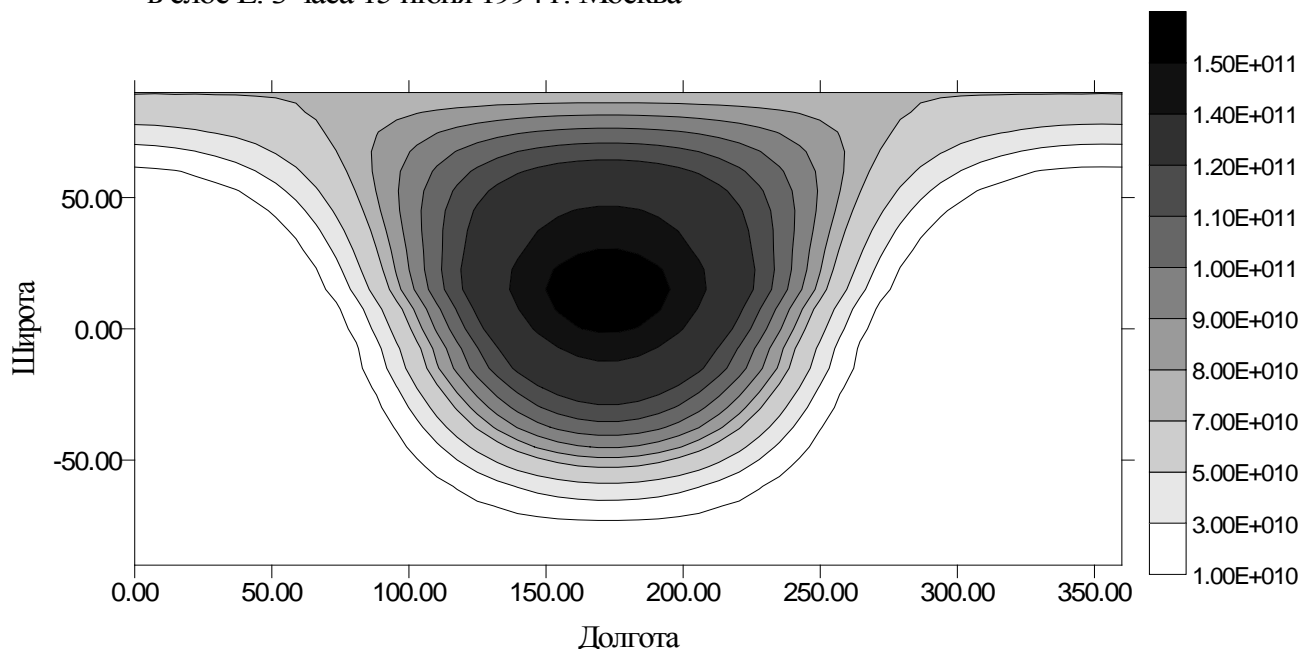


Рис. 4

Изменение концентрации электронов в каком-либо пункте в течение суток можно получить из рис. 3, 4, связав локальное время и долготу соотношением:

$$t = \varphi \cdot 24 / 360, \text{ где } \varphi - \text{долгота в градусах, } t - \text{локальное время, час.}$$

Характерные графики изменения максимальной концентрации в течении суток для широты Москвы для слоев F и E приведены на рис. 5, 6. На рис. 7 приведено изменение высоты слоя F в течение суток для этой же широты. Высота слоя E остается постоянной и равной 110 км.

Изменение максимальной концентрации слоя F в течении суток  
для лета (сплошная кривая) и зимы (штриховая). Широта Москвы.

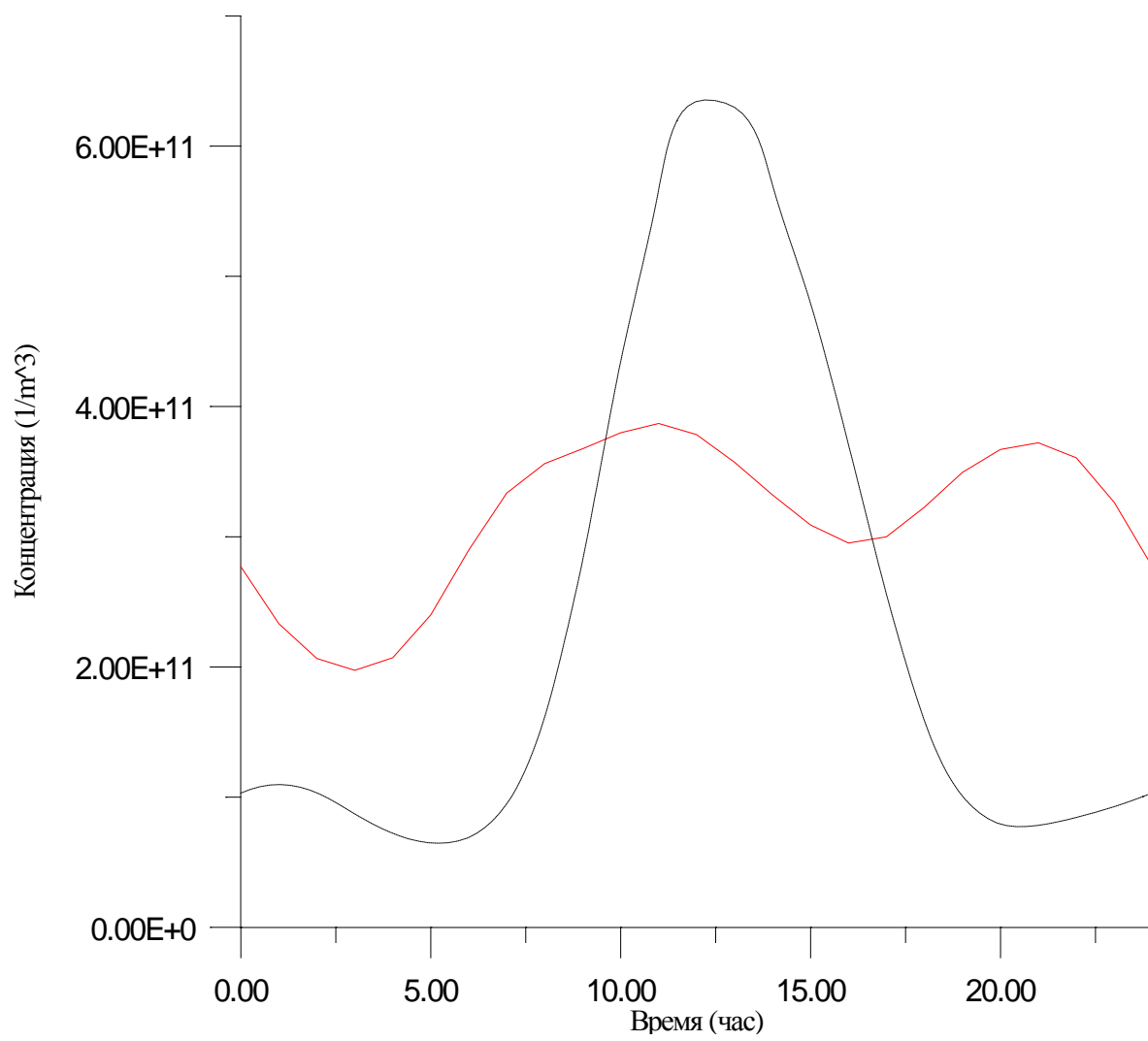


Рис. 5.

Изменение максимальной концентрации в течении суток слоя E для лета (сплошная кривая) и зимы (штриховая). Широта Москвы.

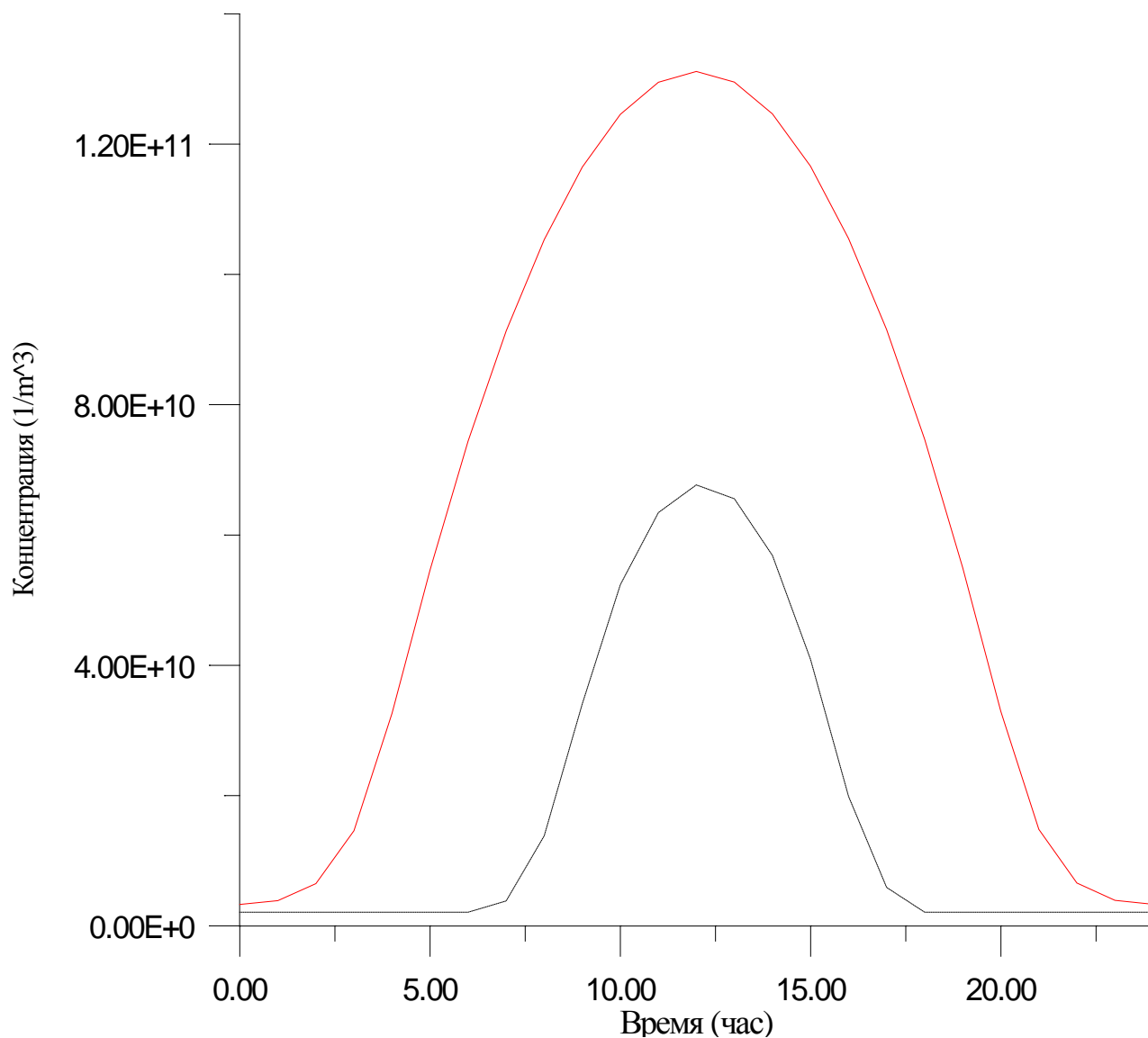


Рис. 6

Для моделирования ионосферы в данной работе используется модель IRI-95 (International Reference Ionosphere) – глобальная модель ионосферы, принятая международным радиосоюзом URSI в 1995 г. В рамках данной модели описываются все основные характеристики ионосферы на планете при изменении активности Солнца (активность Солнца характеризуется средним числом солнечных пятен за месяц).



Изменение высоты максимума слоя F2/F в течении суток для лета (сплошная кривая) и зимы (шптриховая). Широта Москвы.

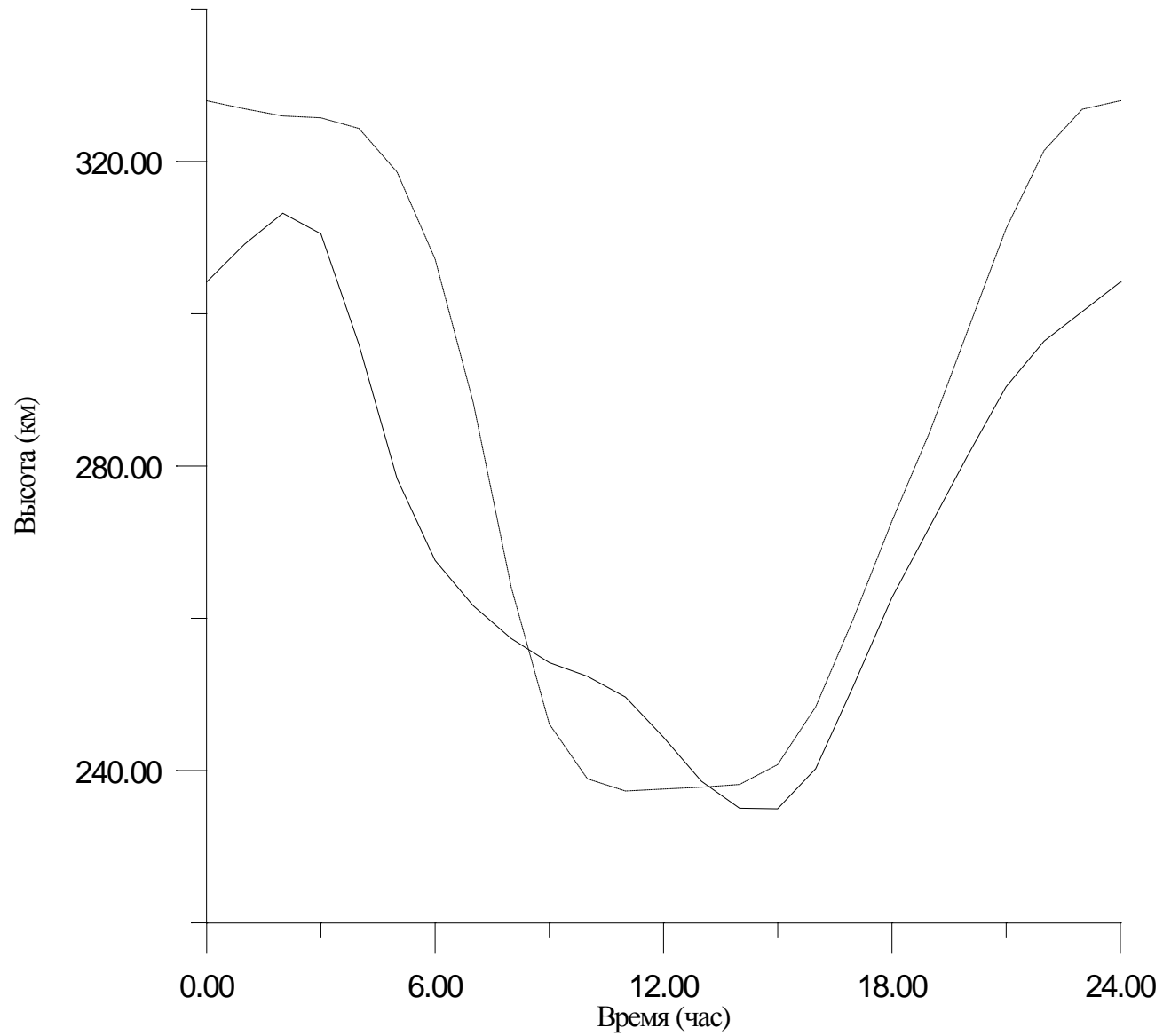


Рис. 7.

### Методика расчёта радиотрасс.

Рассмотрим прежде всего определение диапазона частот, пригодных для осуществления радиосвязи на заданной трассе. Диапазон частот определяется максимально применимой частотой (МПЧ) и наименьшей применимой частотой (НПЧ).

#### 2.1 Расчет МПЧ.

Величина МПЧ определяется условиями отражения волны от ионосферных слоев. Основой для расчёта МПЧ являются экспериментальные данные вертикального зондирования ионосферы. Если пренебречь сферичностью ионосферы и влиянием магнитного поля Земли, то МПЧ можно определить по закону секанса. Пусть  $\theta$  - угол падения волны на ионосферу. Тогда МПЧ можно найти по формуле:

$$f_{\text{МПЧ}} = 0,9 f_0 \sec \theta. \quad (3)$$

Здесь  $f_0$  - плазменная частота для максимальной концентрации в точке отражения (частота, на которой диэлектрическая проницаемость плазмы в максимуме концентрации слоя равна нулю). Плазменная частота связана с концентрацией электронов соотношением

$$f_0 = \sqrt{\frac{e^2 N_e}{m \epsilon_0}} \approx 9 \sqrt{N_e}, \text{ Гц}$$

где концентрация электронов берется в  $1/\text{м}^3$ . Коэффициент 0,9 в (3) взят для того, чтобы обеспечить надежное отражение от ионосферного слоя при наклонном падении волны. Дело в том, что при приближении частоты передатчика к критической частоте слоя ( $f_0 \sec \theta$ ) существенно уменьшается коэффициент отражения от плазменного слоя и значительная часть мощности волны при этом рассеивается в пространстве. Кроме того, значения концентрации электронов, используемые для расчета МПЧ, берутся на основе прогноза. Поэтому при выборе рабочей частоты из условия равенства критической частоте, в реальных условиях радиосвязи концентрация электронов может оказаться ниже прогнозной и отражение от ионосферного слоя будет отсутствовать.

Для оценки угла падения  $\theta$  в пределах одного скачка можно воспользоваться плоской моделью ионосферы. Тогда, если расстояние между передатчиком и приемником равно  $r$ , а высота слоя -  $h$ , то  $\theta = \arctg\left(\frac{r}{2h}\right)$ .

Если длина радиотрассы не превышает 3500 - 4000 км, то возможна связь за счет одного отражения от ионосферы. При большем расстоянии между передатчиком и приёмником связь возможна только за счёт нескольких переотражений. Поскольку состояние ионосферы в различных точках отражения может быть различным, то различными будут значения критических частот, при кото-

рых возможно отражение. В этом случае в качестве МПЧ принимается минимальное из значений, полученных для каждого скачка.

Расчёт МПЧ может осуществляться по экспериментальным данным, по картам прогноза МПЧ, публикуемых Институтом земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн РАН или на основе различных моделей строения ионосферы. Для определения МПЧ по данным прогноза или с использованием моделей ионосферы необходимо определить трассу, вдоль которой происходит распространение между передатчиком и приемником, рассчитать число отражений от ионосферы на данной трассе и, разделив длину трассы на число отражений, рассчитать координаты точек, в которых происходит отражение радиоволн. При этом следует иметь в виду, что длина одного скачка не может превышать 4000 км. Данное ограничение связано с кривизной Земли и средней высотой расположения максимума плотности слоя F. Для прогноза распределения максимумов плотности различных слоёв обычно используют меркаторскую проекцию карты Земного шара (см. рис.8). На этой проекции меридианы и параллели отображаются взаимно перпендикулярными прямыми линиями.

Следует иметь в виду, что меркаторская проекция дает сильное искажение масштабов, особенно вблизи полюсов. Соответственно в этой проекции прямая на поверхности Земного шара, представляющая из себя линию большого круга

(то-есть сечение Земли плоскостью, проходящей через заданные точки и центр Земли) на меркаторской проекции будет кривой. Наибольшее отклонение от прямой будет наблюдаться для приполярных трасс. На рис.9 представлены линии больших кругов в меркаторской проекции.

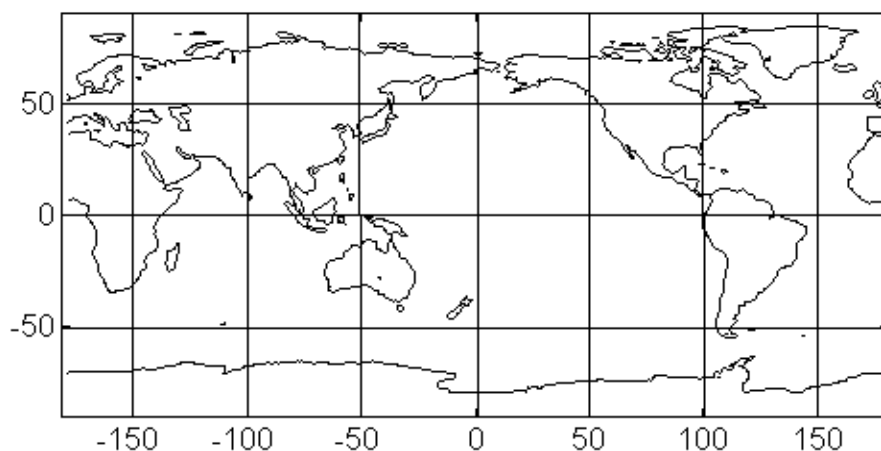


Рис. 8

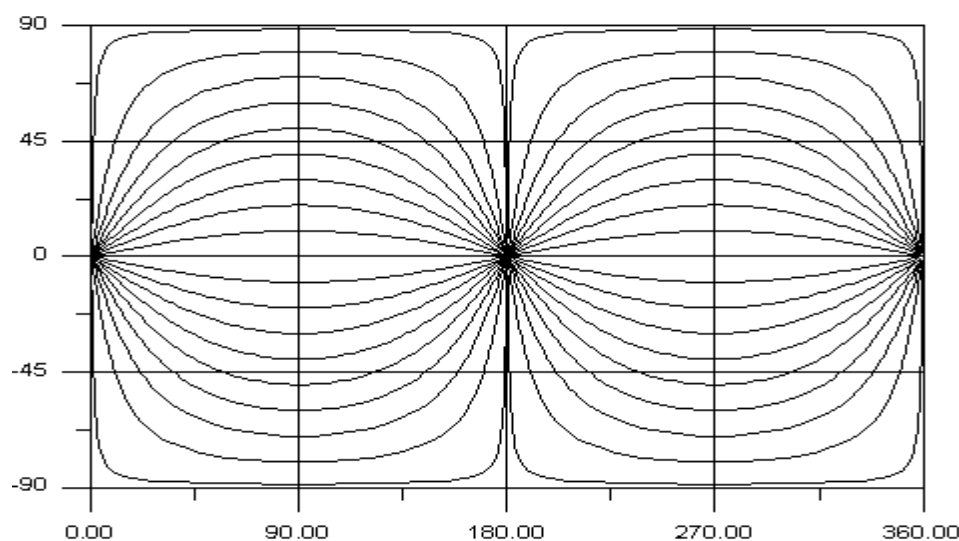


Рис. 9

Расчёт МПЧ осуществляется следующим образом:

На листе кальки или тонкой бумаги рисуем сетку меридианов и параллелей в меркаторской проекции, причём размер сетки совпадает с размером линий большого круга на рис.6. На этой сетке отмечаем координаты передатчика и приёмника.

Совместим полученную сетку с рисунком с изображениями линий большого круга по линии экватора и будем передвигать один рисунок относительно другого вдоль экватора до тех пор, пока одна из линий большого круга не пройдет через точки расположения передатчика и приёмника. Нарисуем на нашей сетке часть линии большого круга, соединяющую передатчик и приёмник.

Определим расстояние между передатчиком и приёмником. Если это расстояние не превышает 4000 км, отметим среднюю точку трассы и определим её координаты.

По карте прогноза МПЧ определим величину  $f_0$  - критическую частоту в точке отражения.

По формуле (3) определяем МПЧ. Угол падения волны на ионосферный слой при этом определяем исходя из плоской модели ионосферы в пределах скачка.

Для трасс большой протяженности определение всех точек отражения может представлять сложную задачу. Поэтому в инженерной практике обычно используется следующая методика: определяются две точки, отстоящие от концов трассы на расстояние 2000 км, в этих точках находятся критические частоты, далее для определения МПЧ используется наименьшее из этих двух значений частот. Расстояние скачка при этом принимается равным 4000 км.

## 2.2 Расчет НПЧ.

Существование НПЧ обуславливается тем, что при понижении частоты растёт поглощение, испытываемое радиоволнами при распространении через ионосферу. При этом возрастает роль различных помех (атмосферных, промышленных, по соседнему каналу, замираний и т.п.). Величина НПЧ определяется условием, чтобы отношение сигнал/шум было не ниже минимально-необходимого значения для данного вида связи. Если волна на трассе распространения испытала  $n$ -кратное отражение, то, кроме поглощения в ионосфере, необходимо также учитывать потери при отражении волны от поверхности Земли. Влияние магнитного поля Земли приводит к тому, что волна расщепляется на обыкновенную и необыкновенную волны, поглощение которых и поляризационные характеристики в ионосфере различны. Если пренебречь этим различием, то поглощение в ионосфере может быть определено по следующему закону:

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \exp(-\Gamma(r)) , \quad (4)$$

где  $\Gamma = \int_r \delta(r) dr$  - интегральный коэффициент поглощения на пути  $r$  вдоль

трассы, а  $E_0$ - амплитуда поля в точке приёма без учёта поглощения. Для оценки величины поглощения на одном скачке можно воспользоваться методикой А.Н.Казанцева [2]. Полный коэффициент поглощения по этой методике определяется как сумма коэффициентов поглощения в неотклоняющих слоях ( $D$ ,  $E$ ,  $F1$ ) и в отклоняющем слое  $F2$ . Величину поглощения на одном скачке при этом можно рассчитать по формуле:

$$\Gamma_i = \frac{A_\Sigma}{(f + f_{np})^2} + B_{F2} f^2 , \quad (5)$$

здесь  $A_\Sigma = A_D + A_E + A_{F1}$ . Коэффициенты  $A_D$ ,  $A_E$  и  $A_{F1}$ , определяющие парциальное поглощение в слоях  $E$ ,  $D$  и  $F1$ , определяются по формулам:

$$A_D \approx 3(f_{\text{эф}})^2 \sec \theta_D, \quad A_E \approx 2,5(f_{\text{эф}})^2 \sec \theta_E, \quad A_{F1} \approx 0,4(f_{\text{эф}})^2 \sec \theta_{F1}.$$

Поглощение в отклоняющем слое  $F2$  зависит от угла падения волны на слой и равно [2]:

$$B_{F2} \approx 0,02 \cos^2 \varphi_{F2},$$

где  $\varphi_{F2}$  – угол падения волны на слой  $F2$ . Данный коэффициент зависит только от протяженности трассы и высоты расположения слоя  $F2$ . На трассах большой протяженности (больше 2000 км) коэффициент  $B$  становится пренебрежимо малым и поглощением в слое  $F2$  можно пренебречь.

А.Н. Казанцевым было показано также, что интегральные коэффициенты поглощения в слоях  $D$  и  $F1$ , так же, как и в слое  $E$ , можно связать с единственным параметром - критической частотой слоя  $E(f_{крE})$ . Если пренебречь измене-

нием угла падения для неотклоняющихся слоев, то для грубого определения параметра  $A_\Sigma$  получаем  $A_\Sigma \approx 5,9(f_{\text{эф}E})^2 \sec\theta$ ,  $\theta$  - угол падения на ионосферу.

В формулу (5) входит также  $f_{\text{нр}}$  - продольная составляющая гиромагнитной частоты. Для оценки величины поглощения можно считать  $f_{\text{нр}} = 0,8$  МГц. Интегральный коэффициент поглощения на многоскачковой трассе можно определить как сумму коэффициентов поглощения на каждом скачке.

Для многоскачковых трасс необходимо также учитывать коэффициент отражения от поверхности Земли  $R$ . Коэффициент отражения зависит от параметров почвы в точке отражения, однако для практических расчётов можно принять усредненный коэффициент отражения  $R=0,8$ . Окончательно выражение для амплитуды сигнала можно представить в виде:

$$E = \frac{\sqrt{60PD}}{r} R^{(n-1)} \exp(-\Gamma). \quad (6)$$

В этом выражении  $r$  - длина радиотрассы,  $P$  - мощность передатчика,  $D$  - КНД антенны передатчика. Для многоскачковых трасс  $\Gamma$  равно сумме интегральных коэффициентов поглощения на каждом скачке, рассчитываемых по формуле (5). Таким образом, для определения НПЧ мы должны определить величину  $f_{\text{эф}E}$  вблизи точки отражения, для заданного значения отношения сигнал/шум найти допустимое значение интегрального коэффициента затухания и далее определить частоту, при которой затухание на трассе не превышает допустимое значение. Критическая частота слоя  $E$  определяется по карте прогноза критических частот слоя  $E$  либо на основании некоторых моделей глобального распределения концентрации электронов в слое  $E$ .

### 3. Методика расчёта радиотрассы на ПЭВМ.

При моделировании радиотрасс в данной программе была использована глобальная модель ионосферы *IRI-95*. Для расчета радиотрассы сначала необходимо построить линию большого круга, соответствующую точкам расположения передатчика и приёмника. Плоскость, проходящая через две заданные точки на поверхности Земли и центр Земли, определяется уравнением

$$\begin{aligned} & x(\cos\theta_1 \sin\varphi_1 \sin\theta_2 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\varphi_2) + \\ & y(\sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\varphi_2 - \cos\theta_1 \cos\varphi_1 \sin\theta_2) + \\ & z \cos\theta_1 \cos\theta_2 (\cos\varphi_1 \sin\varphi_2 - \sin\varphi_1 \sin\varphi_2) = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Здесь  $x, y, z$  - декартовы координаты точки на плоскости, индексы 1 и 2 относятся к координатам соответственно передатчика и приёмника. Угол  $\varphi$  отсчитывается от нулевого меридиана (положительный для восточной долготы и отрицательный для западной),  $\theta$  - широта точки, причем она положительна для

северной широты и отрицательна для южной. Угол  $\theta = \frac{\pi}{2} - \vartheta$ , где  $\vartheta$  - угол в полярной системе координат, отсчитываемый от Земной оси. Данное уравнение плоскости применимо в случае, если две заданные точки не лежат на одном диаметре. В последнем случае (антиподные точки) в качестве данной плоскости можно рассматривать любую плоскость, проходящую через рассматриваемый диаметр (для антиподных точек все пути распространения равнозначны). Расчет полей в антиподных точках требует дополнительного рассмотрения и в рамках данной лабораторной работы такие точки исключаются. Уравнение (8) можно записать в виде  $\vec{r}\vec{N} = 0$ , где  $\vec{r}$  - радиус вектор точки, принадлежащей данной плоскости, а  $\vec{N}$  - вектор нормали к данной плоскости. Угол между направлением нормали и осью  $z$  составляет:

$$\cos\Theta = \frac{N_z}{|\vec{N}|},$$

где  $N_z$  - составляющая вектора нормали вдоль оси  $z$ .

Данная плоскость пересекается с плоскостью Земного экватора по линии, расположенной под углом

$$\psi = \arctg \frac{\cos\theta_1 \sin\varphi_1 \sin\theta_2 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \sin\varphi_2}{\cos\theta_1 \cos\varphi_1 \sin\theta_2 - \sin\theta_1 \cos\theta_2 \cos\varphi_2} \quad (8)$$

к линии диаметра, проходящего через нулевой и 180-й меридианы.

Перейдем к новой системе координат, повернув исходную систему по широте на угол  $\psi$  и затем произведем вращение системы координат вокруг новой оси  $x'$  на угол  $\Theta$ . В результате мы приходим к новым координатам искомых точек:

$$\begin{aligned} \theta_i^n &= 0 \\ \varphi_i^n &= \arctg \frac{\cos\theta_i \sin(\varphi_i - \psi) \cos\Theta + \sin\theta_i \sin\Theta}{\cos\theta_i \cos(\varphi_i - \psi)} \end{aligned} \quad (9)$$

Индексы  $i=1, 2$  относятся соответственно к точкам расположения передатчика и приёмника в старой и новой системах координат.

В новой системе координат легко рассчитать расстояние между точками:

$$L = R_0 \cdot (\varphi_2^n - \varphi_1^n). \quad (10)$$

Здесь  $R_0$  - радиус Земли. При распространении волны из точки 1 в точку 2 вдоль трассы меняется только угол  $\varphi^n$ . Обратный переход к исходной системе координат можно рассчитать по формулам:

$$\theta = \arctg \frac{\sin(\varphi^n + \psi) \sin \Theta}{\sqrt{\cos^2(\varphi^n + \psi) + \sin^2(\varphi^n + \psi) \cos^2 \Theta}} \quad (11)$$

$$\varphi = \arctg(\cos \Theta \operatorname{tg}(\varphi^n + \psi))$$

При работе программы сначала рассчитывается линия большого круга для точек расположения передатчика и приёмника по формулам (8-11). По формуле (10) определяется расстояние между передатчиком и приёмником.

Для расчета радиотрассы используется метод геометрической оптики [4]. Расчет производится вдоль линии большого круга. При этом мы пренебрегаем изменением параметров ионосферы в направлениях, перпендикулярных проекции радиотрассы на поверхность Земли. В сферических координатах уравнения траекторий лучей согласно методу геометрической оптики имеют вид:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{d\tau} &= p_\rho; \quad \frac{d\theta}{d\tau} = \frac{1}{\rho} p_\theta; \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \frac{1}{\rho \sin \theta} p_\varphi \\ \frac{dp_\rho}{d\tau} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} + \frac{p_\theta^2}{\rho} + \frac{p_\varphi^2}{\rho}; \\ \frac{dp_\theta}{d\tau} &= \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \theta} - \frac{p_\rho p_\theta}{\rho} - \frac{\operatorname{ctg} \theta \cdot p_\varphi^2}{\rho}; \\ \frac{dp_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{2\rho \sin \theta} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} - \frac{p_\rho p_\varphi}{\rho} - \operatorname{ctg} \theta \frac{p_\theta p_\varphi}{\rho} \end{aligned}$$

Перейдем в новую систему координат (9). В этой системе координат с учетом предположения об изменении параметров ионосферы только вдоль направления распространения получим упрощенную систему:

$$\begin{aligned} \frac{d\rho}{d\tau} &= p_\rho \\ \frac{d\varphi}{d\tau} &= \frac{p_\varphi}{\rho} \\ \frac{dp_\rho}{d\tau} &= \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \rho} + \frac{p_\varphi^2}{\rho} \\ \frac{dp_\varphi}{d\tau} &= \frac{1}{2\rho} \cdot \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} - \frac{p_\rho p_\varphi}{\rho} \end{aligned} \quad (12)$$

Начальные условия для интегрирования системы (12) задаются в виде  $\rho = R_0$ ;  $p_\rho = \sin \varphi$ ;  $\varphi = 0$ ;  $p_\varphi = R_0 \cos \varphi$  при  $\tau=0$  (здесь  $\varphi$  - угол возвышения луча).



Для определения амплитуды волны вдоль луча необходимо рассчитать расходимость волны  $\mathcal{F} = \mathcal{D}(\tau^0)/\mathcal{D}(\tau)$ , где  $\mathcal{D}$  - якобиан преобразования от сферической системы координат к лучевым. Прямой численный метод расчета величины якобиана  $\mathcal{D}$  основан на интегрировании одновременно с системой уравнений лучей присоединённой системы уравнений, получающейся из исходной системы (12) дифференцированием по лучевым параметрам  $\xi$  и  $\eta$ :

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial \rho}{\partial \xi} \right) &= \frac{\partial p_\rho}{\partial \xi}; \quad \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial \rho}{\partial \eta} \right) = \frac{\partial p_\theta}{\partial \eta} \\ \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right) &= \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\theta}{\partial \xi} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial \xi}; \quad \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right) = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p_\theta}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho^2} \frac{\partial \rho}{\partial \eta}; \\ \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \xi} \right) &= \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial p_\varphi}{\partial \xi} - \frac{1}{\rho^2 \sin^2 \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \rho}{\partial \xi} + \rho \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial \xi} \right); \\ \frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial \varphi}{\partial \eta} \right) &= \frac{1}{\rho \sin \theta} \frac{\partial p_\varphi}{\partial \eta} - \frac{1}{\rho^2 \sin^2 \theta} \left( \sin \theta \frac{\partial \rho}{\partial \eta} + \rho \cos \theta \frac{\partial \theta}{\partial \eta} \right); \end{aligned} \quad (13)$$

для производных координат и ещё шести уравнений для производных лучевых импульсов:

$$\frac{d}{d\tau} \left( \frac{\partial p_i}{\partial \zeta_j} \right) = \sum_k \left( \frac{\partial f_i}{\partial q_k} \frac{\partial q_k}{\partial \zeta_j} + \frac{\partial f_i}{\partial p_k} \frac{\partial p_k}{\partial \zeta_j} \right), \quad (14)$$

где  $p_i, p_k$  принимают значения  $p_\rho, p_\theta, p_\varphi$ , а  $q_i - \rho, \theta, \varphi$ . Функции  $f_i$  определяются выражениями

$$f_i = \frac{1}{2h_i} \frac{\partial \varepsilon}{\partial q_i} + \frac{1}{h_i} \sum_k \left( p_k \frac{\partial h_k}{\partial q_i} - p_i \frac{\partial h_i}{\partial q_k} \right),$$

где  $h_i$  – коэффициенты Ламе сферической системы координат ( $h_\rho = 1, h_\theta = \rho, h_\varphi = \rho \sin \theta$ ). Явный вид функций  $f_i$  оказывается достаточно громоздким и в данном описании не приводится.

Решение системы (12-14) производится численно, с использованием стандартной процедуры интегрирования систем обыкновенных дифференциальных уравнений Рунге-Кутты-Фельберга [5]. Результатом решения этой системы является траектория волны в ионосфере вдоль линии, связывающей передатчик и приёмник. В условиях слабого поглощения (если частота волны много больше частоты столкновений в плазме) наличие мнимой части диэлектрической проницаемости не приводит к изменению траектории лучей. При этом величину поглощения волны в ионосфере можно найти непосредственным интегрированием вдоль луча по формуле (4). Интегрирование системы (12-14) про-

исходит до момента, когда луч касается поверхности Земли  $\rho = R_0$ . Если эта точка не является конечной точкой траектории, то определяется угол падения луча в этой точке и расчет продолжается от данной точки с начальным условием  $\phi = \phi_{\text{п}}$ , где  $\phi_{\text{п}}$  - угол возвышения волны в точке падения.

#### 4. Расчётное задание.

1. Нарисовать траекторию волны ( отрезок линии большого круга), соединяющие два пункта связи, один из которых расположен в Москве, а второй – в городе, указанном для каждой бригады в таблице 1.

2. Составить волновое расписание связи этих пунктов. Расчет волнового расписания проводить с интервалом времени 8 часов. Координаты Москвы –  $56^\circ$  северной широты и  $37^\circ$  восточной долготы. Зависимость концентрации электронов в слоях  $F$  и  $E$  и высоты максимума слоя  $F$  взять из графиков 5-7. При расчете можно считать, что все пункты находятся на одной широте.

Таблица 1.

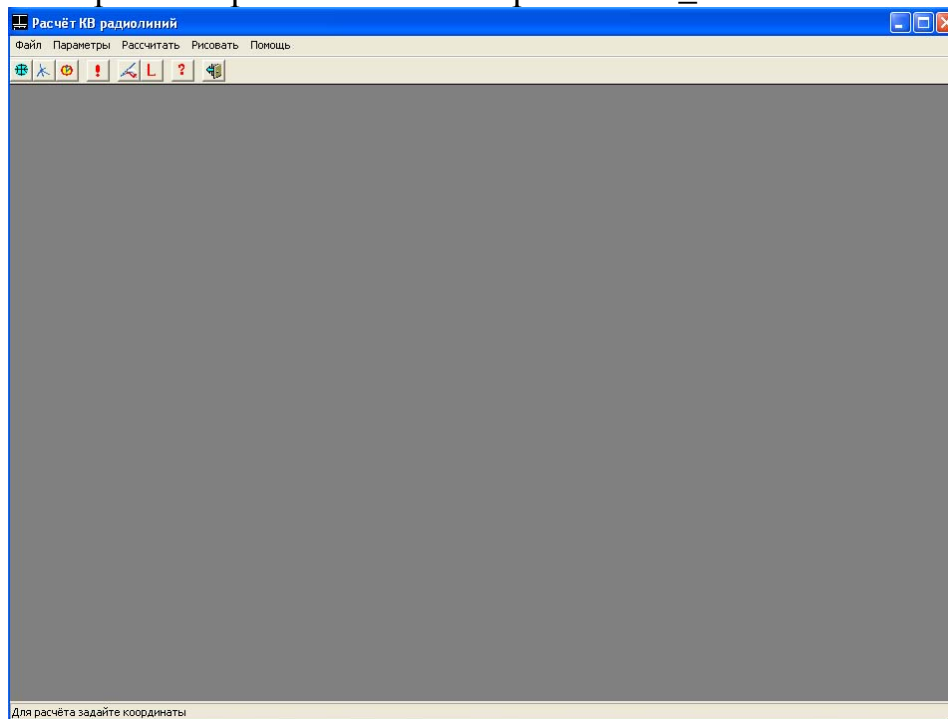
№ бригады	Город	Координаты		Время года	Расстояние до Москвы
		Широта	Долгота		
1	Киев	50 с.ш.	30 в.д.	Лето	880 км
2	Минск	54 с.ш.	27 в.д.	Зима	990 км
3	Варшава	52 с.ш.	21 в.д.	Лето	1450 км
4	Берлин	53 с.ш.	13 в.д.	Зима	1900 км
5	Париж	49 с.ш.	2 в.д.	Лето	2800 км
6	Лондон	52 с.ш.	0 в.д.	Зима	2900 км

Мощность передатчика для всех трасс принять равной 10 кВт, КНД. антенн – 10.

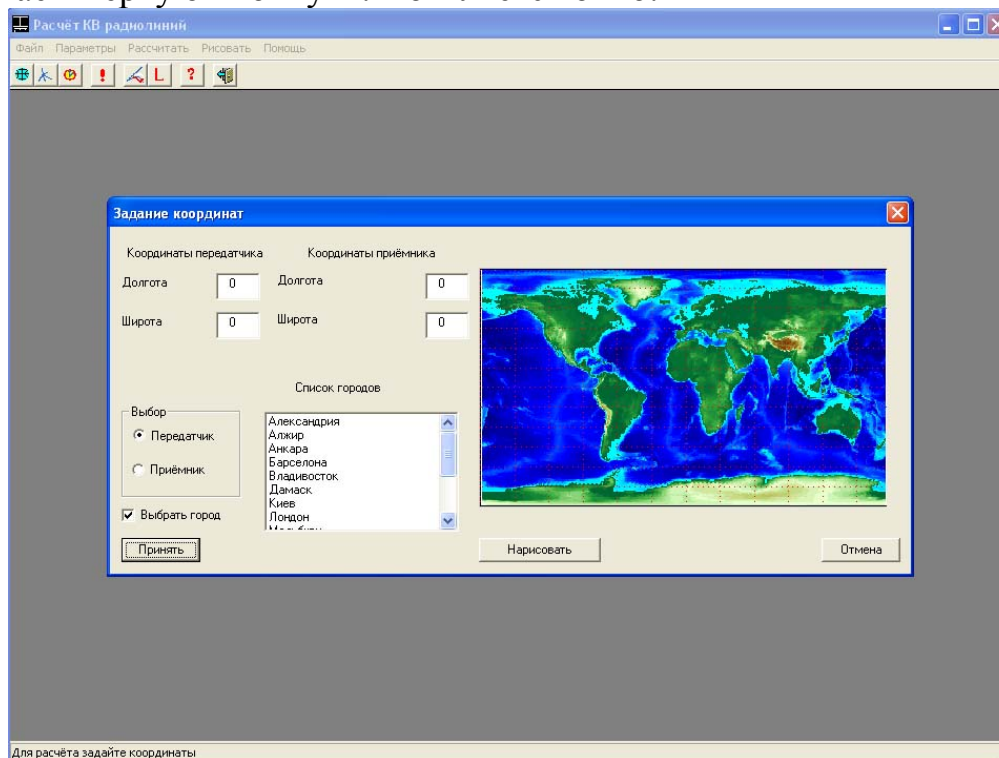
Уровень помех принять равным 10 мВ/м.

## 5. Инструкция по работе с программой расчета радиолиний декаметрового диапазона волн.

1. Запускается ярлык на рабочем столе «Ярлык к HF\_RP». Появляется окно

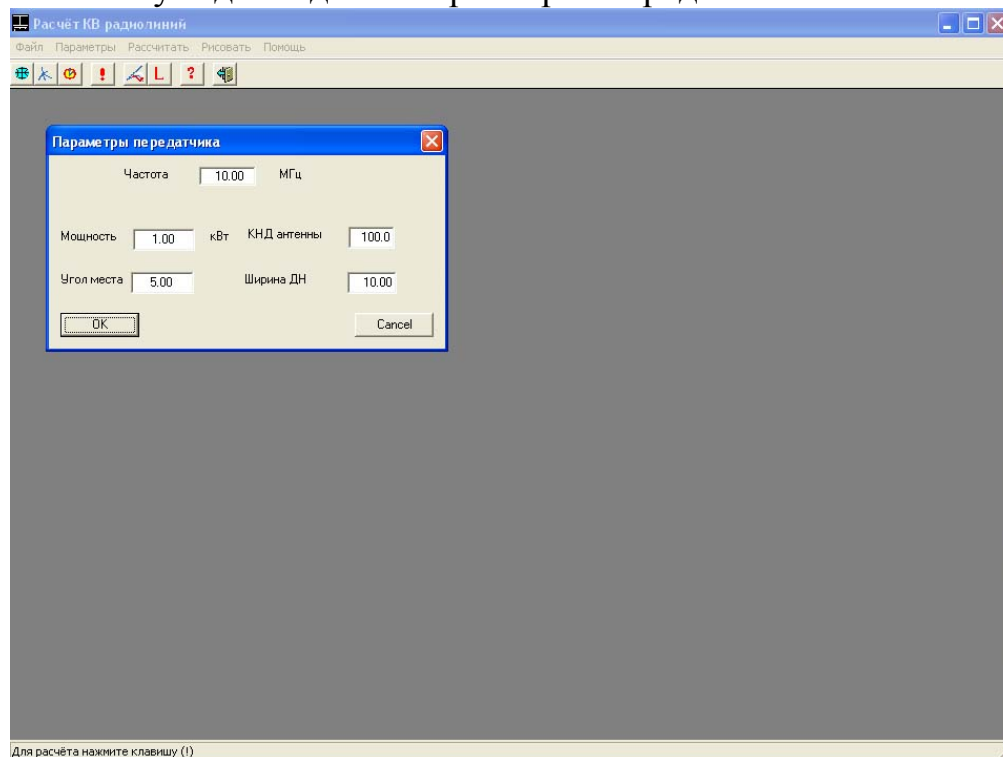


2. Нажимаем первую кнопку . Появляется окно:




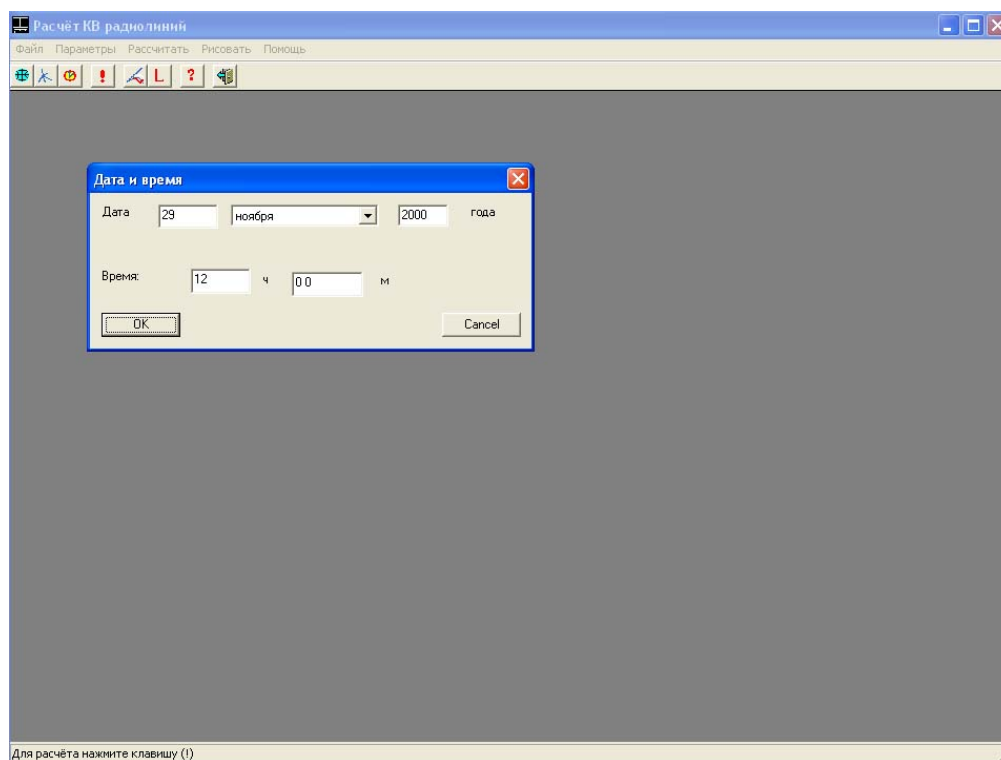
3. Далее требуется задать координаты передатчика и приемника. Координаты можно задавать непосредственно в окошках или выбрав название города из списка. В последнем случае нужно выбрать переключатель: передатчик или приёмник. При вводе координат нужно предварительно очистить окна задания координат. Очищать окна следует прогоном курсора до крайнего левого положения в окне. Далее нужно нажать кнопки «Нарисовать» и «Принять».

4. Нажать клавишу  для задания параметров передатчика. Появится окно:





Существенными параметрами являются «Частота», «Угол места», «Ширина ДН». Предполагается, что диаграмма направленности симметрична относительно центра, заданного углом места, с точностью до  $1^\circ$ . Минимальный угол места рекомендуется задавать не менее  $5^\circ$ . Ширина ДН должна быть не больше  $10^\circ$ . Лучи считаются через  $1^\circ$ , т.е. число задаваемых лучей – не более 10.

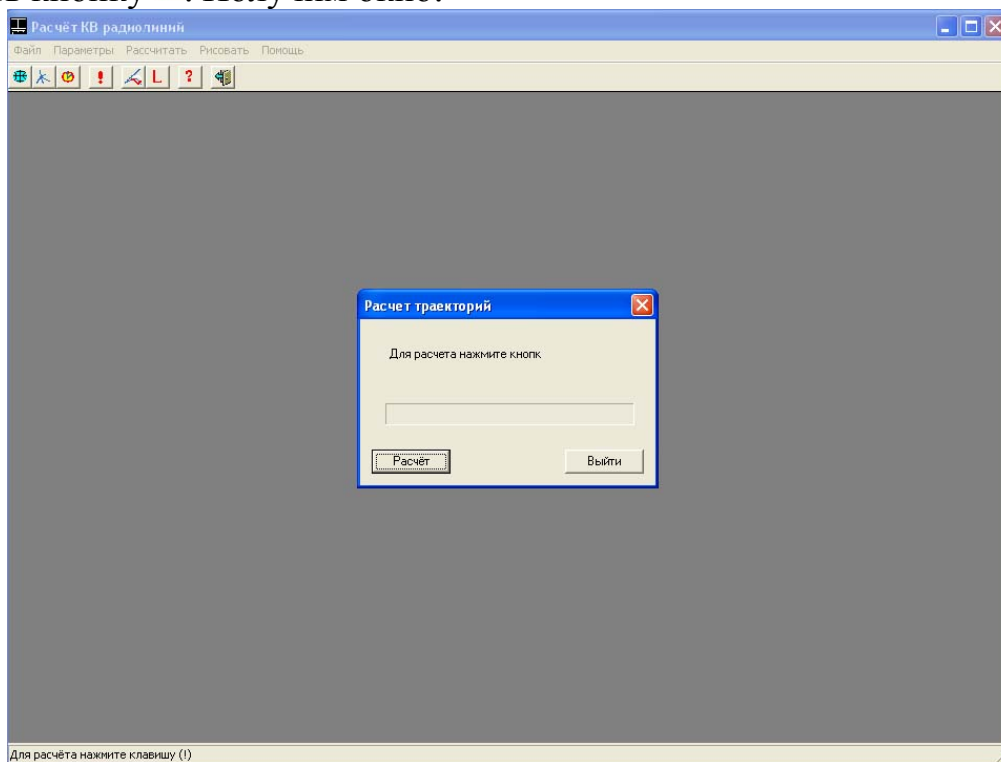
5. Нажать клавишу  для задания даты и времени. Появится окно:




Дата в настоящей версии ограничена 2000 годом.

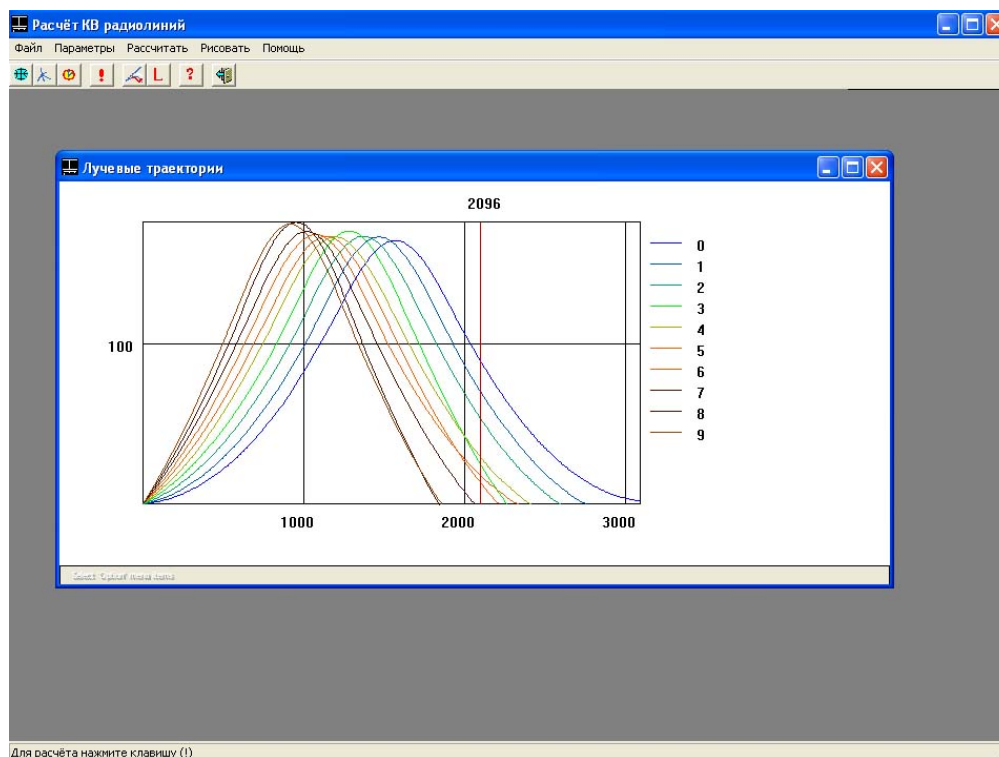
6. Снова нажать клавишу , посмотреть траекторию радиолинии на карте и нажать кнопку «Принять». **ВНИМАНИЕ! Если после изменения частоты не нажать клавишу , будет проводиться расчет с предыдущей частотой!**

7. Нажать кнопку . Получим окно:



Нажимаем «Расчет». В окошке “Progresbar” отображается ход решения. После завершения расчета нажмите клавишу «Выйти».

8. Для просмотра результата нажмите клавишу . Появится окно с результатами:



Цифры справа – углы места лучей. Вертикальной линией отмечено положение приемной станции, над ней наверху указана длина трассы вдоль поверхности Земли.

Параметры передающей антенны (направление главного лепестка и ширина диаграммы направленности) считаются правильно выбранными, если пучок лучей, идущих от передающей антенны, покрывает область на земле, в которой находится приемный пункт. Оптимальным является вариант, когда точка приема находится вблизи среднего луча. Если пункт приема не освещен пучком лучей, связь будет отсутствовать. Для обеспечения связи нужно изменять угол, под которым направлен главный лепесток диаграммы направленности. Ширину ДН менять нецелесообразно, так как изменится КНД антенны. Для повторного расчета переходим к пункту 4 инструкции.

Окончательный результат, при котором удалось достичь обеспечения связи, выдать на печать с помощью команды Print\_Screen.

7. Помимо траекторий лучей программа позволяет рассчитать изменение амплитуды поля вдоль траекторий лучей (в дБ). Для этого нужно нажать кнопку, обозначенную буквой *L*. Расчет амплитуды поля следует проводить после того, как закончен поиск радиолинии. График амплитуды также выдать на печать.

## 6. Задание к экспериментальной части.

Для заданных пунктов расположения передатчика и приёмника:

1. Задать координаты передатчика и приёмника, рассчитать траекторию радиотрассы, отобразив её на экране дисплея. Задать московское время 0 ч. Задать рабочую частоту и рассчитать траекторию волны от передатчика и приёмника. Изменяя значение частоты, определить МПЧ на трассе. Записать длину трассы и МПЧ. При этом необходимо обратить внимание на значение затухания на трассе. Если затухание на трассе меньше допустимого, то уменьшая частоту, определить НПЧ.
2. Изменив московское время (в меню **Опции**), повторить п.1. Последовательно задавая различные моменты времени через каждые 4 часа, построить зависимости МПЧ и НПЧ в течении суток и на основании полученных данных составить волновое расписание для заданных пунктов линии радиосвязи.
3. Рассмотреть многолучевое распространение на трассе, определить зону молчания и область многолучевого приёма.

Отчет по работе должен содержать а) исходные данные для проведения расчетов, б) графики траекторий лучей, в) графики потерь радиолинии, г) выводы по итогам выполнения работы.

## 5. Контрольные вопросы.

1. Понятие МПЧ и НПЧ. Какими физическими процессами ограничивается диапазон рабочих частот на радиотрассе?
2. Расчёт МПЧ на трассах длиной до 4000 км.
3. Расчет МПЧ на многоскачковых трассах.
4. Принципы расчёта НПЧ. Что такое волновое расписание.
- 5.
6. Условия отсутствия многолучевого распространения на КВ-трассах. Влияние многолучевого распространения на параметры радиолиний.

## ЛИТЕРАТУРА

Пермяков В.А., Солодухов В.В., Бодров В.В., Исаков М.В. Распространение радиоволн: учебное пособие. Под ред. В.А. Пермякова, В.В. Солодухова. – М.: Издательский дом МЭИ, 2008. – 192 с.

1. Грудинская Г.П. Распространение радиоволн. М.:Высшая школа. 1975
2. Гинзбург В.Л. Распространение электромагнитных волн в плазме. М.:ГИФМЛ, 1960, 552 с.
3. Кравцов Ю.А., Орлов Ю.И. Геометрическая оптика неоднородных сред. М.: Наука, 1980, 304 с.