

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ДОНСКОЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра «Геодезия»

Спутниковые технологии в геодезии

Методические указания выполнения лабораторных и
практических работ для студентов обучающихся по УГН(С) 21.00.00

Ростов-на-Дону
ДГТУ
2019

УДК 528

Составитель: к.т.н., доцент Яковлев В.В., Ст. препод. Арсеньев Д.М.

Спутниковые технологии в геодезии

Методические указания выполнения лабораторных и практических работ для студентов обучающихся по УГН(С) 21.00.00
-Ростов-на-Дону: Донской гос. техн. ун-т, 2019. –28 с.

УДК 528

Печатается по решению редакционно-издательского совета
Донского государственного технического университета

Ответственный за выпуск зав. кафедрой «Геодезия»
канд. техн. наук, доцент Л.Ф. Кирильчик

В печать 11.07.2018-07-17
Формат 60х84/16. Объем 1.5 усл. п. л.
Тираж 100 экз. Заказ №

Издательский центр ДГТУ
Адрес университета и полиграфического предприятия
344000, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1

© Донской государственный
технический университет, 2019

ВВЕДЕНИЕ

В системах оптической и радиолокации космических объектов, а также в спутниковых навигационно-геодезических измерительных комплексах получение наиболее точной технической информации в значительной степени зависит от принятой методики учета элементов траектории и запаздывания электромагнитных волн (ЭМВ) в атмосфере Земли от источника до приемника полезного сигнала.

Для изучения и учета влияния атмосферы на распространение электромагнитных волн необходимо знать вертикальное распределение диэлектрической проницаемости или коэффициента преломления в тропосфере, стратосфере и ионосфере Земли.

Коэффициент преломления тропосферы определяется косвенным путем и является функцией меняющихся метеорологических параметров содержания водяного пара, температуры и давления воздуха. Для оптического диапазона коэффициент преломления зависит от эффективной длины волны излучения (длина волны монохроматического лазерного излучения). Для радиодиапазона тропосфера является недиспергирующей средой, т.е. коэффициент преломления не зависит от несущей частоты.

Тропосфера Земли в средней полосе простирается примерно до высот 10-11 км. В ней сосредоточена основная атмосферная масса. Здесь формируются туман, облачность, атмосферные осадки. Характерным явлением в тропосфере является общее понижение температуры с высотой примерно на $6,5^\circ$ на 1 км. В нижней тропосфере (пограничном слое) до высот 1-1,5 км от земной поверхности часто наблюдаются явления температурной инверсии (повышение температуры с высотой).

Тропосферная поправка в спутниковых измерительных системах учитывается по данным аэрологического зондирования или по различным стандартным, широтным и уточненным местным моделям атмосферы с раздельной аппроксимацией, особенно для радиодиапазона, высотного профиля сухой и влажной составляющих коэффициента преломления.

Область атмосферы, начиная с высоты 50-60 км над поверхностью Земли, где газ частично или полностью ионизирован и содержит большое количество свободных электронов, называют ионосферой. При анализе распространения радиоволн верхнюю границу ионосферы можно ограничить высотой около 1000 км.

Ионосферные слои обычно характеризуются следующими параметрами: электронной плотностью в максимуме ионизации $N_{\text{эmax}}$; высотой нижней границы ионизации h_0 ; полутолщиной слоя (высотой от нижней границы слоя до максимума ионизации h_{max}) и др. Слои принято обозначать символами:

Слой D - самый нижний ионосферный слой с наименьшей ионизацией (электронной плотностью) расположен примерно в диапазоне высот 60-100 км.

Слой E со значительно большей электронной плотностью расположен примерно в диапазоне высот 100-250 км. Самый верхний слой F имеет максимальную электронную плотность на высотах примерно 250-400 км.

Коэффициент преломления ионосферы является функцией электронной

плотности и частоты радиоволн, т.е. для радиоволн ионосфера является диспергирующей средой, что позволяет в значительной степени учитывать ионосферное запаздывание сигнала с использованием двух или более несущих радиочастот. В одночастотных измерительных системах для учета ионосферного влияния необходима информация об электронной плотности ионосферы вдоль траектории электромагнитных волн, получение которой представляет довольно сложную задачу.

Изменение электронной плотности в ионосфере во времени происходит обычно симметрично относительно местного полдня. Максимальное значение N_{max} наблюдается в летние месяцы. Наиболее полную информацию о состоянии ионосферы дают многочисленные станции наземного вертикального зондирования, расположенные в различных широтных зонах, и специальные исследования верхней ионосферы с ИСЗ, имеющих полярные орбиты. Для исследований элементов запаздывания сигнала и кривизны траектории радиоволн в спутниковых навигационно-геодезических системах и при радиолокации космических объектов наиболее удобными в практическом отношении являются так называемые гибридные модели ионосферы, сочетающие в себе теоретические исследования основных ионосферных процессов и статистические данные непосредственного ионосферного зондирования.

В прил. 1, 2 даны в сокращении для учебных расчетов эмпирические модели высотного распределения электронной плотности в среднеширотной ионосфере для четных часов суток в экстремальных (летних и зимних) гелиогеофизических условиях.

Между тропосферой и ионосферой на высотах примерно с 10-11 до 60- 80 км простирается стратосфера. В этом слое отмечается относительное постоянство диэлектрической проницаемости на различных высотах и для целей учета элементов распространения ЭВМ оптического и радиодиапазона вполне достаточна метеорологическая стратификация стратосферы, принятая в стандартных моделях атмосферы различных широтных зон.

В прил.3 даны высотные профили метеорологических параметров стратосферы в экстремальных (летних и зимних) физико-географических условиях среднеширотной зоны.

Расчет и анализ особенностей распространения электромагнитных волн в различных атмосферных слоях и методика их учета в оптико-электронных, радиогеодезических и спутниковых геодезических системах и ставится основной задачей данных методических указаний.

Тропосфера Земли

Задание 1. Обработка материалов аэрологического зондирования

Исходные данные:

H'' - высота нижней границы атмосферного слоя, км;

$P''(H'')$, $e''(H'')$, $t^{\circ}C^*(H'')$ - соответственно полное барометрическое давление воздуха, влажность (давление водяных паров) и температура воздуха на высоте H'' ;

$B_m A_m$ - широта расположения наземной станции и средний азимут траектории электромагнитных волн соответственно;

λ_{γ} - эффективная длина волн излучения (оптический диапазон), мкм;

Рабочие формулы:

1. Вычисление давления и температура воздуха на произвольных промежуточных высотах H атмосферного слоя.

Для политропных слоев (температура с высотой убывает по линейному закону)

$$P = P'' \left(1 - \gamma \frac{h_{rn} - h_{rn}''}{T} \right)^{\frac{G \cdot 10^3}{R_y \gamma}} \quad (1)$$

и

$$T = T'' - \gamma \Delta h_{rn} \quad (2)$$

Для изотермических слоев (температура в атмосферном слое постоянна)

$$P = P'' \exp \left[- \frac{G(h_{rn} - h_{rn}'') \cdot 10^3}{R_y T} \right] \quad (3)$$

и

$$T'' = \text{const}, \quad (4)$$

где P'' и P - измеренное атмосферное давление на высоте H'' и вычисленное на произвольных высотах соответственно;

T'' и T - температура (в градусах Кельвина) для тех же условий.

($T^{\circ}K = t^{\circ}C + 273,16$);

h_{rn}'', h_{rn} - геопотенциальные высоты нижней границы атмосферного слоя и текущих точек, определяемых по формулам:

$$h_{rn}'' = \frac{\hat{r}_3 \cdot H^*}{\hat{r}_3 + H^*} \quad \text{и} \quad h_{rn} = \frac{\hat{r}_3 \cdot H^*}{\hat{r}_3 + H^*} \quad (5)$$

γ - вертикальный градиент температуры.

$$\gamma = \frac{T'' - T}{H - H''}, \text{ гр/км}; \quad (6)$$

$G = 9.80665 \text{ м/с}^2$ - гравитационное земное ускорение на уровне моря;

$R_y = 287,05287 \text{ м}^2/\text{гр} \cdot \text{с}^2$ - удельная газовая постоянная;

\hat{r}_3 - средний радиус Земли на широте расположения наземной станции.

За средний радиус Земли можно принять радиус кривизны нормального

сечения, проходящего через среднюю точку трассы, определяемого по формуле:

$$r \approx R_A = \frac{C}{\sqrt{1+e'^2 \cdot \cos^2 B_m (1+e'^2 \cdot \cos^2 B_m \cdot \cos^2 A_m)}} \quad (7)$$

$C = 6399699$ - полярный радиус эллипсоида Красовского, м;

$e'^2 = 0.006738$ - квадрат второго эксцентриситета меридианного эллипса;

B_m - средняя широта траектории, равная полусумме широт конечных пунктов;

A_m - средний азимут траектории.

2.Вычисление влажности воздуха (давление водяных паров) на произвольных высотах трассы по формуле Ганна

$$e(H) = e_0 10^{-H/6.3}, \quad (8)$$

где e_0, e - давление водяных паров соответственно на уровне моря и в текущих точках на высотах H .

При наличии данных о влажности воздуха на опорных высотах метеорологического зондирования расчет ее на промежуточных высотах атмосферного слоя выполняется методом линейной интерполяции или для климатических условий среднеширотных зон по формуле

$$e(H) = e'' \exp(-0.42 (H - H'')), \quad (9)$$

где $e''(H'')$ и $e(H)$ - давление водяных паров в нижней границе слоя на высоте H'' и на промежуточных высотах H соответственно.

Примечание: Если в данных радиозондирования атмосферы вместо давления водяных паров (e) представлена относительная влажность (Π) воздуха при температуре 1°C , то вычисление e производится по «Психрометрическим таблицам» (прил.4) с учетом выражения

$$e = \frac{E(t) \cdot U}{100},$$

где E - насыщенная упругость водяного пара выбирается из указанных таблиц в функции температуры воздуха ($t^\circ\text{C}$).

3. Вычисление индекса преломления в текущих точках траектории электромагнитных волн с заданным шагом численного интегрирования по формулам :

для базисных измерений на наклонных трассах в горной местности светодальномерами типа СГ (источник света гелий-неоновый лазер с $\lambda=0,6328$ мкм)

$$N_{0.6328} = 80.942 \frac{P}{T} - 11.740 \frac{e}{T}, \quad (10)$$

где P и e - в гПа (мбарах).

При спутниковой импульсной лазерной локации ($\lambda=0,6943$ мкм)

$$N_{0.6943} = 80.356 \frac{P}{T} - 11.918 \frac{e}{T}, \quad (11)$$

где P и e -в гПа (мбарах)

$$N_p = 77.624 \frac{P}{T} - 12.924 \frac{e}{T} + 37.188 \cdot 10^4 \frac{e}{T}, \quad (12)$$

где Р и е - в гПа (мбарах).

Результаты вычислений представить в виде таблицы (табл.1).

Таблица 1

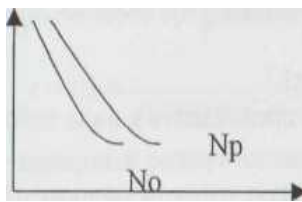
Н, км	t°C	γ, гр/км	Р, гПа	е, гПа	Np	N _{0,6328}	N _{0,6328}
0	42,0	+16,842	1006,8	15,3	304,6	256,1	258,0
0,2	38,6		984,9	14,2	299,0	254,6	255,2
0,31	36,0		973,1	13,7	296,0	252,4	253,6
0,4	35,3	+16,842	963,5	13,2	293,6	250,5	252,4
0,5	33,6		952,8	12,7	290,9	249,1	251,0
0,6	31,6	+20,0	942,2	12,3	288,7	247,9	249,8
0,61	31,4		941,2	12,2	288,5	247,9	249,7
0,77	29,0		924,4	11,6	284,0	245,4	247,2
0,8	28,6	+12,174	921,3	11,4	283,1	244,9	246,7
1,0	26,2		900,6	10,6	277,1	241,3	243,1
1,2	24,2	+10,0	880,2	9,9	270,8	237,5	239,2
1,32	23,0		868,1	9,4	267,2	235,2	236,9
1,4	22,4	+7,778	860,1	9,2	264,6	233,5	235,2
1,5	21,6		850,2	8,8	261,4	231,4	233,1
1,6	20,6	+9,60	840,4	8,5	258,4	229,5	231,2
1,8	18,7		821,0	7,9	252,6	225,7	227,4
2,0	16,8		802,0	7,4	247,0	222,0	223,6
2,5					-	-	-
3,0	9,2		711,8	5,1	-	-	-
3,5					-	-	-
4,0	3,0		630,0	3,6	-	-	-
4,5					-	-	-
5,0	-4,2		555,8	2,5	-	-	-
5,5					-	-	-
5,84	-10,3		490,1	1,8	-	-	-

Задание 2. Аппроксимация высотного профиля индекса преломления экспоненциальной функции вида

$$N(H) = N_0 e^{kH}, \quad (13)$$

1. Построить графики высотного профиля $N(H)$ для различных длин волн оптического диапазона и для радиоволн (рис.1)

Н, км



N

Рис.1

2.Вычисление коэффициентов N_0 и k , а также коэффициентов корреляции r аппроксимирующей функции (13) методом наименьших квадратов по формулам:

$$N_0 = \exp[1/n(\sum_i \ln N_i - k \sum_i H_i)]; \quad (14)$$

$$k = \frac{\sum_{i=1}^n H_i \ln N_i - 1/n \sum_i H_i \sum_i \ln N_i}{\sum_i H_i - 1/n (\sum_i H_i)^2}; \quad (15)$$

$$r^2 = \frac{[\sum_{i=1}^n H_i \ln N_i - 1/n \sum_i H_i \sum_i \ln N_i]^2}{[\sum_i H_i^2 - 1/n (\sum_i H_i)^2][\sum_i (\ln N_i)^2 - 1/n (\sum_i \ln N_i)^2]}; \quad (16)$$

Вычисление коэффициентов целесообразно выполнять на мини ЭВМ типа МК-52 с блоком расширения памяти БРП-3 или по типовым программам на ПЭВМ.

3.Выполнить анализ точности аппроксимации высотных профилей экспоненциальной функцией (13) методом сравнения с реальными профилями $N(H)$ по результатам метеорологического зондирования атмосферы (табл. 2).

Ст.Мин.Воды, 25.08 75г. (14-20)

Таблица 2

H, км	$\lambda=0,6328$			$\lambda=0,694$			Радиодиапазон		
	$N_{(13)}$	$N_{(H)}$	ΔN	$N_{(13)}$	$N_{(H)}$	ΔN	$N_{(13)}$	$N_{(H)}$	ΔN
0,31	263,7	259,9	4,8	262,6	258,0	4,6	313,7	308,7	5,0
0,5	259,9	256,6	3,3	257,5	254,4	3,1	294,2	290,7	3,5

Задание 3. Расчет элементов траектории и запаздывания сигнала в тропосфере Земли

Исходные данные приведены на рис.2.

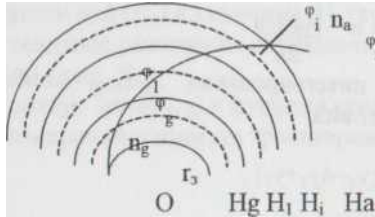


Рис.2

r_3 - средний радиус Земли в функции широты и азимута траектории;
 H_g, H_a - высоты наземной станции и конечного пункта наблюдений соответственно;

n_g, φ_g - соответственно коэффициент преломления воздуха и видимое зенитное расстояние (угол прихода волны) в пункте расположения наземной станции слежения;

n_a, φ_a - то же, для конечного пункта траектории;

$N(H)$ - высотная стратификация тропосферы с шагом численного интегрирования.

Расчетные формулы.

Геометрическая длина кривой траектории

$$l = \int_{H_g}^{H_a} \sec \varphi_i dH_i \quad (17)$$

где φ_i -значение зенитных расстояний в текущих точках траектории электромагнитных волн, определяемых для сферически слоистой модели атмосферы по формуле Снеллиуса

$$n_g \text{Sig} \varphi_g(r_3 + H_g) = n_1 \text{Sig} \varphi_1(r_3 + H_1) = \dots = n_i \text{Sig} \varphi_i(r_3 + H_i) = \text{const.} \quad (18)$$

С учетом обозначений постоянного для данной станции наблюдений выражения

$$n_g \text{Sig} \varphi_g(r_3 + H_g) = K \quad \text{и} \quad (r_3 + H_i) = a_i;$$

$$\text{Sin} \varphi_i = K / n_i a_i. \quad (19)$$

Поправка в результаты измерений в действительных внешних условиях по отношению к условиям свободного пространства

$$\Delta S = 10^{-6} \int_{H_g}^{H_a} \sec \varphi_i dH_i, \quad (20)$$

Поправка ΔS не учитывает отличие длины кривой траектории от хорды. Численное интегрирование выражений (18), (20) при n четном числе интервалов интегрирования целесообразно выполнять по формуле Симпсона

$$\int_{H_g}^{H_a} y dH \approx \frac{h}{3[(y_0 + y_{2n}) + 4(y_1 + y_3 + y_{n-1}) + 2(y_2 + y_4 + y_{2n-2})]}, \quad (21)$$

$$\text{где } y = N \sec \varphi \text{ и } h = \frac{H_a - H_g}{2n}.$$

Если интервал интегрирования $x_0 - x_{0+2h}$ разбит на две части, то выражение (21) примет вид

$$\int_{x_0}^{x_0+2h} y dH \approx \frac{h}{3(y_0 + 4y_1 + y_2)}, \quad (22)$$

где y_0, y_1, y_2 - значения интегрируемой функции в трех точках интегрируемого интервала.

В зависимости от высоты атмосферных слоев и зенитного расстояния наблюдений шаг интегрирования (h) может принимать значения: 0,1, 0,2, 0,4, 0,5, 1,0, 2,0 и более км.

Для оценки точности метода численного интегрирования по формулам (21), (22) с шагом интегрирования h необходимо выполнить повторное интегрирование с удвоением шага, т.е. при $2h$.

С использованием результатов интегрирования при шагах h и $2h$ погрешность численного интегрирования (R) оценивается следующим приближенным выражением:

$$R \approx \frac{\Delta S h - \Delta S 2h}{15}.$$

Пример расчета элементов траектории и запаздывания сигнала в тропосфере Земли приведен в табл.3

Таблица 3

Ст. Мин. Воды ($r_3 = 6377,591$ км), $\varphi_g = 70^\circ$, $K = 5994,8014$

№ точки	H, км	N _p	φ_i	Sec φ_i	L	N Sec φ_i	ΔS
0	0	304,7	70,000000	2,9238066	0,0	890,9	0,0
1	0,2	294,5	69,996682	2,9233393		861,0	
2	0,4	285,2	69,993206	2,9228536	1,169334	833,5	344,6
3	0,6	278,3	69,989366	2,9223143		813,4	
4	0,8	268,8	69,985916	2,9218316	2,338264	785,4	669,4
5	1,0	263,0	69,981901	2,9212693		768,3	
6	1,2	260,0	69,977438	2,9206450	3,506768	759,2	977,3

Задание 4. Расчет кривизны траектории электромагнитных волн методом полярных координат

Исходные данные:

1. Сферически слоистая стратификация атмосферы (высотный профиль коэффициента преломления $n(H)$);
2. Высоты начальной (H_0) и конечной (H_k) точек траектории;
3. Видимое зенитное расстояние наблюдаемого объекта (φ_0) или угол прихода волны (α_0) (рис. 3);
4. Средний радиус Земли (r_3) в функции средней широты начальной и конечной точек измерений и азимута траектории.

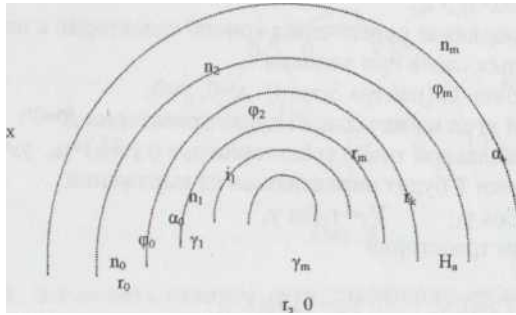


Рис.3

Последовательность расчета:

1. Последовательное вычисление углов прихода волны от α_0 до α_m из закона Снеллиуса для сферически симметричной поверхности атмосферных слоев

$$n_0 r_0 \cos \alpha_0 = n_1 r_1 \cos \alpha_1 = n_m r_m \cos \alpha_m = \text{const} \quad (24)$$

где

$$r_0 = r_3 + H_0, \quad r_1 = r_3 + H_1, \quad r_m = r_3 + H_m,$$

H_0, H_1, \dots, H_m - высоты нижней границы соответствующих атмосферных слоев. При использовании вычисленных значений зенитных расстояний в текущих точках траектории (φ_i) (см. задание 3, формула (19)) углы прихода волны определяются из выражения

$$\alpha_m = n/2 - \varphi_m. \quad (25)$$

2. Вычисление углов падения i_0, i_1, \dots, i_m в каждом из треугольников по теореме синусов:

$$\begin{aligned}\sin i_0/r_0 &= \sin (\Pi/2+\alpha_0)/r_1; \\ \sin i_1/r_1 &= \sin (\Pi/2+\alpha_1)/r_2; (26)\end{aligned}$$

.....

$$\sin i_m/r_m = \sin (\Pi/2+\alpha_m)/r_{m+1}.$$

$$\text{Откуда в общем случае } \sin i_m/r_{m+1} = \cos \alpha_m \cdot r_m \quad (27)$$

3. Вычисление центральных углов в каждом из треугольников по формуле

$$\begin{aligned}\gamma_0 &= n/2 - a_0 - i_0; \\ \gamma_1 &= n/2 - a_1 - i_1; \quad (28)\end{aligned}$$

.....

$$\gamma_m = n/2 - a_m - i_m;$$

4. Вычисление координат пересечения кривой траектории с верхней границей атмосферных слоев при условии:

- координаты точки О (центра Земли) $x=0, y=0$;
- дирекционный угол на начальный пункт траектории $A=0^\circ$;
- координаты начальной точки траектории $x_0=(r_3+H_0)=r_0, y_0=0$.

Координаты точки 1 будут определяться из выражений

$$X_1=r_1 \cos \gamma_1; \quad Y_1=r_1 \sin \gamma_1 \quad (29)$$

или для любой точки траектории

$$X_m = r_m \cos \sum_{i=0}^m \gamma_i; Y_m = r_m \sin \sum_{i=0}^m \gamma_i; \quad (30)$$

5. Вычисление наикратчайшего расстояния между начальной и текущей точками траектории по формуле:

$$\begin{aligned}D_m &= \sqrt{(X_m - X_0)^2 + (Y_m - Y_0)^2}; \\ D_m &= \sqrt{\Delta X_m^2 + \Delta Y_m^2}. \quad (31)\end{aligned}$$

6. Вычислить поправку за отличие геометрической длины дуги траектории (I_m), найденной методом численного интегрирования по формуле (17), от хорды D_m по формуле

$$\Delta S_{m(\text{дуги})} = I_m - D_m \quad (32)$$

7. Вычислить истинное зенитное расстояние между начальной и конечной точками траектории по формуле

$$\operatorname{tg} Z_m = \frac{\Delta Y_m}{\Delta X_m} \quad (33)$$

и угол рефракции из выражения

$$\Delta Z_m = Z_m - \varphi \quad (34)$$

Вычисление поправок за кривизну дуги траектории и углов рефракции необходимо выполнять по индивидуально составленным программам на ПЭВМ.

Стратосфера Земли

В стратосфере Земли (от верхней границы тропосферы на высотах от 10-12 км до нижней границы ионосферы до высот примерно 80-200 км) часть метеорологической информации можно получить с помощью высоких метеорологических зондов. В остальной части (слое) стратосферы метеорологическая информация, необходимая для анализа элементов траектории ЭВМ, принимается по стандартной модели атмосферы СМА 4401-81 или по ГОСТ 24631-81. Атмосферы справочные. Параметры в СМА влажность воздуха в тропосфере и стратосфере Земли не представлена ($e=0$).

Действительное значение влажности в нижней стратосфере составляет сотые доли мбар (гПа) и не оказывает практического влияния на характер распространения ЭВМ.

Задание 5. Расчет элементов траектории запаздывания сигнала и стратосфере Земли

Исходные данные:

H_g, H_a - высоты наземной станции и верхней границы тропосферы;

H_k (или H_{\min}^n) - высота верхней границы стратосферы (или нижней границы ионосферы Земли);

r_z - средний радиус Земли, принятый для исследования тропосферы рефракции (см. задание 1, формулу (7));

φ_g - видимое зенитное расстояние или угол прихода волны (a_g) в пункте наземной станции;

1 - геометрическая длина кривой траектории ЭВМ в тропосфере Земли (см. табл.3);

ΔS - поправка, учитывающая запаздывание сигнала в тропосфере Земли по отношению к вакууму;

$\varphi_a, (\alpha_a)$ - текущее значение зенитного расстояния в верхней границе тропосферы и начале стратосферы на высоте H_a или угол прихода волны к нижней границе стратосферы.

Последовательность расчета:

1. Определить верхнюю границу стратосферы или нижнюю границу ионосферы H_{\min} , где $N_s=0, n_n=1; N_p=0$ (рис.5);

2. Вычислить индекс преломления радиоволн в стратосфере Земли по формуле (12) по метеорологическим данным из радиозондирования атмосферы или при использовании СМА (без учета влажности воздуха - $e=0$) по формуле

$$N'_p = 77.6224P/T \quad (38)$$

Интервал послойной стратификации стратосферы относительно N_p' (H) зависит от угла прихода волны к нижней границе на высоте H_a и для обеспечения точности численного интегрирования выражений (17), (20) по формуле Симпсона (21) составляет обычно 10,20 км

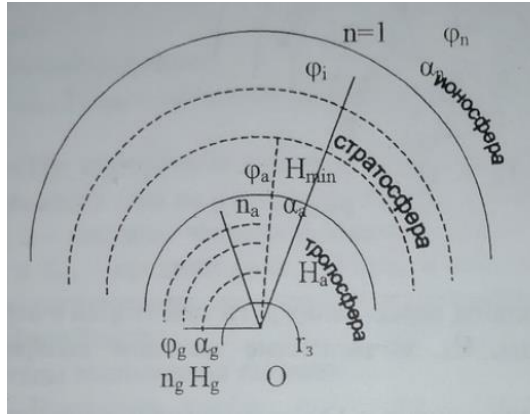


Рис.5

3. Вычислить длину дуги траектории радиоволн (l') и поправку в дальность ($\Delta S'$) в стратосфере Земли от верхней границы тропосферы (H_a) донижней границы ионосферы (H_{min}^n) методом численного интегрирования соответственно выражений (17) и (20). При этом значения зенитных расстояний в текущих точках стратосферы (φ_i) или углов прихода волны (α_i) определяется из выражения (19), (25) как продолжение расчетов в тропосфере Земли, т.е. для тех же начальных условий распространения радиоволн в точке наземной станции (рис.2,5). Вычисления представить в табличном виде (табл.5).

Таблица 5

H	N_p	φ_i	$\text{Sec}\varphi_i$	l'	$N\text{Sec}\varphi_i$	$\Delta S'$	Примечание
H_a	(из расчётов в тропосфере Земли, см.табл.3)						
H_i							
H_{min}^n							

Задание 6. Вычислить поправку в измеренное значение наклонной дальности за кривизну траектории ЭВМ от наземной станции до верхней границы стратосферы (рис.6)

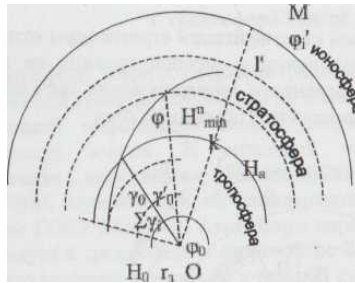


Рис. 6

Исходные данные:

X_k, Y_k - координаты пересечения дуги траектории с верхней границей тропосферы на высоте H_a , вычисленные методом полярных координат (см. задание 4, табл.3);

$\varphi_i (a_i)$ - значения зенитных расстояний (или углов прихода волны) в текущих точках стратосферы на высотах H_i (см. табл.5);

Методика расчета:

1. Вычисление углов падения i'_i в каждом из треугольников по теореме синусов (27);

2. Вычисление центральных углов в каждом из треугольников высотной стратификации стратосферы по формуле (28);

3. Вычисление координат пересечения дуги траектории с верхней границей стратосферы на высоте H_{min}^n , как продолжение аналогичных расчетов в тропосфере Земли методом полярных координат. Вычисления представить в таблице, аналогичной табл. 4.

4. Вычислить наикратчайшее расстояние в стратосфере Земли по формуле (31);

5. Вычислить отличие дуги траектории ЭВМ в стратосфере Земли от хорды по формуле (32);

6. Вычислить суммарную длину кривой траектории ЭВМ в тропосфере и стратосфере Земли;

7. Вычислить по координатам наикратчайшее расстояние от наземной станции до верхней границы стратосферы;

8. Вычислить поправку за кривизну траектории от наземной станции до верхней границы стратосферы по формуле (32),

9. Вычислить зенитное расстояние между этими пунктами по формуле (33) и угол рефракции по формуле (34);

Сравнить полученные результаты в пунктах 8, 9 с аналогичными расчетами в тропосфере Земли.

Ионосфера Земли

Задание 7. Выполнить графический анализ высотного профиля электронной плотности $N_3(H)$ и коэффициента преломления $n_i(H)$ ионосферы.

Исходные данные:

H_{\min}^i , H_{\max}^i - принятые высоты нижней и верхней границ ионосферы, км;

$N_3(H)$ -измеренное или модельное значение электронной плотности ионизированного газа на различных высотах в ионосфере Земли, эл/см³;

f_1 , f_2 - несущие частоты радиоволн, кГц;

$r_{\text{З}}$ и A_m — средний радиус Земли и азимут траектории, принятые для расчета геометрических элементов распространения радиоволн в тропосфере и стратосфере Земли;

Этапы выполнения задания:

1. Построить график высотного профиля электронной плотности ионосферы $N_3(H)$ -рис.7;

2. Вычислить коэффициент преломления ионосферы (без учета влияния магнитного поля Земли и столкновений электронов с ионами и нейтральными частицами) не менее чем для двух заданных когерентных радиочастот по формуле:

$$n_i = \sqrt{1 + \frac{80,75912 N_3(\text{эл/см}^3)}{f^2(\text{кГц})}} \quad (39)$$

Вычисления представить в виде таблицы (табл.6).

Таблица 6

H, км	N_3 (эл/см ³)	n_i		Примечание
		f_1 , кГц	f_2 , кГц	
H_{\min}^i				
...				
H_i				
...				
H_{\min}^i				

3. Построить графики высотного профиля коэффициента преломления для каждого из данных радиочастот в едином высотном масштабе с графиком электронной плотности ионосферы (рис.8).

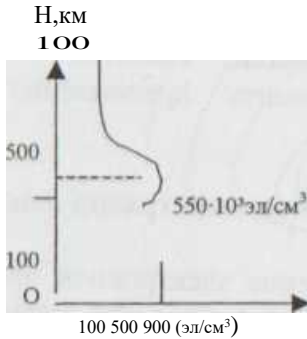


Рис.7

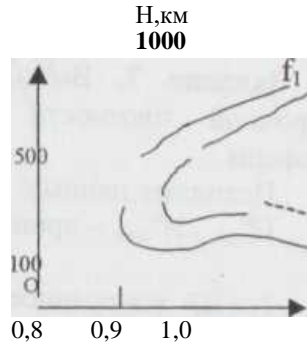


Рис. 8

4. Определить методом линейной интерполяции значения коэффициента преломления ионосферы на различных промежуточных высотах с шагом 5, 10, 20, 25 или 50 км, обеспечивающим заданную точность вычисления рефракционных поправок методом численного интегрирования для различных зенитных расстояний наблюдений космических объектов в * точке наземной станции слежения;

Задание 8. Расчет геометрических элементов траектории ЭВМ и запаздывания сигнала в ионосфере

Исходные данные приведены на рис.9:

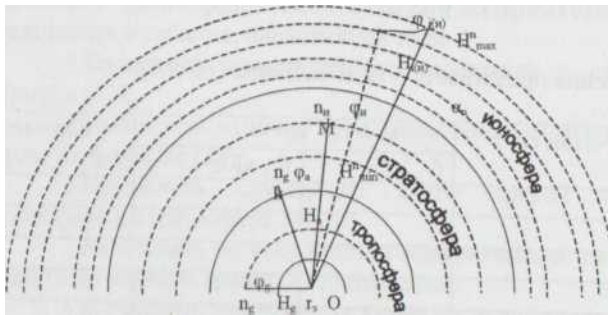


Рис.9

r_z , ϕ_g - средний радиус Земли и видимое зенитное расстояние в точке наземной станции, принятые для расчета элементов траектории и скорости ЭВМ в тропосфере и стратосфере Земли.;

$n_i(H)$ - высотная стратификация коэффициента преломления ионосферы для заданных радиочастот с шагом численного интегрирования;

$\varphi_{и}$ или $(\alpha_{и})$ - зенитное расстояние (или угол прихода волны) в нижней границе ионосферы или в конечной точке распространения сигнала М в стратосфере Земли на высоте N_{\min}^n (по результатам расчета геометрических элементов траектории ЭВМ в стратосфере Земли - табл.5);

N_{\min}^n - принятая максимальная высота ионосферного слоя.

Последовательность расчета:

1. Определение зенитных расстояний (φ_i^n) траектории ЭВМ в текущих точках ионосферных слоев (рис.9) по формуле Снеллиуса

$$n_g \sin \varphi_g(r_3 + H_g) = n_{и} \sin \varphi_{и}(r_3 + H_{\min}^n) = n_{и(и)} \sin \varphi_{и(и)}(r_3 + H_i^n) \quad (40)$$

откуда

$$\sin \varphi_{и(и)} = k / n_{и(и)}(r_3 + H_i^n) \quad (41)$$

где

$$k = n_{и} \sin \varphi_{и}(r_3 + H_{\min}^n). \quad (42)$$

2. Расчет геометрической длины кривой траектории в ионосфере Земли для каждой из заданных двух радиочастот f_1 и f_2 по формуле

$$l_{и} = \int_{H_{\min}^n}^{H_{\max}^n} \sec \varphi_{и(и)} dH. \quad (43)$$

3. Определить линейную величину поправки $(\Delta S_{и})$ в измеренное значение наклонной дальности (оптической длины пути) за атмосферное запаздывание сигнала в ионосфере Земли по формуле

$$\Delta S_{и} = \int_{H_{\min}^n}^{H_{\max}^n} \frac{1 - n_{и(и)}}{n_{и(и)}} \sec \varphi_{и(и)} dH \quad (44)$$

Расчеты из двух радиочастот представить в виде таблицы (табл.7).

Таблица 7

Н,км	$n_{и}$	$\varphi_{и(и)}$	$\sec \varphi_{и(и)}$	$l_{и}$	$(1 - n_{и(и)}) / n_{и(и)} \sec \varphi_{и(и)}$	$\Delta S_{и}$
H_{\min}^n	(израсчетав конечной точке стратосферы Земли на высоте H_{\min}^n , табл. 5					
$H_i(f_1)$						
$H_i(f_2)$						
$H_{\max}^n(f_1)$						
$H_{\max}^n(f_2)$						

X_M, Y_M - координаты пересечения дуги траектории с верхней границей стратосферы на высоте H_{\min}^n , вычисленные методом полярных координат (см.табл.7).

Методика расчета:

1. Вычисление углов падения (i_1) в каждом из треугольников высотной стратификации ионосферы Земли по теореме синусов (27);
2. Вычисление центральных углов в каждом из треугольников по формуле (28);
3. Вычисление траектории ЭВМ в пункте расположения наблюдаемого объекта на максимальной условной высоте ионосферного слоя. Вычисления являются продолжением аналогичных расчетов в стратосфере Земли;
4. Вычислить расстояние между начальной и конечной точками дуги траектории (хорду) в ионосфере Земли по формуле (31);
5. Вычислить отличие дуги траектории от хорды по формуле (32);
6. Сравнить полученное значение с аналогичными расчетами в тропосфере и стратосфере Земли;
7. Вычислить суммарную геометрическую длину кривой траектории ЭВМ от наземной станции до наблюдаемого объекта в тропосфере, стратосфере и ионосфере Земли
8. Вычислить по координатам расстояние между точками наземной станции и наблюдаемого объекта;

9. Вычислить поправку за кривизну дуги траектории от наземной станции до наблюдаемого объекта по формуле (32).

10. Вычислить истинное зенитное расстояние между этими пунктами по формуле (33) и угол рефракции по формуле (34).

Результаты вычислений отдельно для двух заданных радиочастот f_1 и f_2 представить в таблице, аналогичной табл.4.

Сделать выводы об особенностях распространения сигнала в различных атмосферных слоях (тропосфере, стратосфере и ионосфере Земли) в зависимости от климатических и гелио-географических условий, зенитного расстояния наблюдения и частоты радиоволн.

Эмпирическая модель высотного распределения электронной
концентрации в среднеширотной ионосфере зимнего сезона
(декабрь-январь)

Высота, км	Местное время,ч					
	0	02	04	06	08	10
85			1,72(2)	4,51(2)	1,00(3)	3,21(3)
90			3,15(3)	8,01(3)	3,51(3)	1,11(4)
95			4,70(3)	2,01(3)	6,51(3)	2,52(4)
100			6,01(3)	5,03(3)	1,35(4)	5,01(4)
110			4,01(3)	5,50(3)	3,52(4)	9,81(4)
120			1,70(3)	2,03(3)	7,02(4)	1,05(5)
130			1,50(3)	2,52(3)	6,60(4)	1,18(5)
140			1,52(3)	8,01(3)	5,83(4)	1,25(5)
150			1,80(3)	3,02(3)	5,51(4)	1,62(5)
160			3,00(3)	2,63(3)	6,12(4)	1,80(5)
170			5,00(3)	2,91(3)	8,25(4)	2,11(5)
180			1,03(4)	4,00(3)	1,36(5)	2,55(5)
190			3,02(4)	4,00(4)	1,65(5)	3,07(5)
200		4,02(4)	4,16(4)	5,98(4)	1,99(5)	3,57(5)
250	5,57(4)	7,35(4)	9,95(4)	1,06(4)	1,90(5)	4,14(5)
300	7,12(4)	7,87(4)	9,18(4)	8,59(4)	1,08(5)	2,32(5)
350	4,90(4)	5,38(4)	5,77(4)	4,79(4)	5,67(4)	1,46(5)
400	3,52(4)	3,59(4)	3,58(4)	2,87(4)	3,59(4)	8,74(4)
450	2,36(4)	2,33(4)	2,34(4)	1,86(4)	2,40(4)	6,12(4)
500	1,55(4)	1,61(4)	1,55(4)	1,26(4)	1,94(4)	4,29(4)
550	1,06(4)	1,22(4)	1,02(4)	9,04(3)	1,52(4)	3,15(4)
600	7,79(3)	8,73(3)	7,03(3)	7,07(3)	1,24(4)	2,53(4)
650	5,83(3)	6,03(3)	5,65(3)	5,75(3)	1,04(4)	1,91(4)
700	4,55(3)	4,51(3)	4,32(3)	4,55(3)	9,06(3)	1,76(4)
750	3,62(3)	3,80(3)	3,60(3)	3,61(3)	7,55(3)	1,57(4)
800	2,82(3)	3,02(3)	3,01(3)	3,13(3)	6,45(3)	1,31(4)
850	2,30(3)	2,61(3)	2,62(3)	2,86(3)	5,85(3)	1,07(4)
900	2,00(3)	2,02(3)	2,10(3)	2,55(3)	5,30(3)	9,05(3)
950	1,80(3)	1,95(3)	1,95(3)	2,08(3)	4,65(3)	7,60(3)
1000	1,50(3)	1,80(3)	1,83(3)	1,88(3)	4,00(3)	6,43(3)

Примечание. В прил.1;2 1,83(3) означает $1,83 \cdot 10^3 \text{ см}^{-3}$ Таблицы заимствованы из [3].

Высота, км	Местное время,ч					
	12	14	16	18	20	22
85	3,01(3)	2,23(3)	9,01(2)	5,41(2)		
90	1,41(4)	9,01(3)	6,03(3)	3,61(3)		
95	3,54(4)	2,52(4)	1,61(4)	9,04(3)		
100	6,51(4)	5,72(4)	2,21(4)	1,51(4)		
110	1,16(5)	1,00(5)	3,81(4)	1,75(4)		
120	1,18(5)	8,31(4)	4,26(4)	1,20(4)		
130	1,25(5)	8,02(4)	3,85(4)	1,25(4)		
140	1,43(5)	1,04(5)	3,85(4)	1,55(4)		
150	1,71(5)	1,51(5)	4,00(4)	1,81(4)	6,02(3)	
160	1,97(5)	1,81(5)	6,10(4)	2,32(4)	9,03(3)	
170	2,32(5)	2,12(5)	8,02(4)	3,03(4)	1,41(4)	
180	2,76(5)	2,80(5)	1,24(5)	6,62(4)	2,02(4)	1,28(4)
190	3,29(5)	3,52(5)	2,30(5)	1,03(5)	3,86(4)	2,18(4)
200	4,02(5)	4,10(5)	3,27(5)	1,37(5)	5,05(4)	3,15(4)
250	5,20(5)	4,87(5)	4,46(5)	2,69(5)	9,89(4)	6,85(4)
300	3,27(5)	3,17(5)	3,02(5)	1,93(5)	9,01(4)	6,83(4)
350	1,99(5)	1,92(5)	1,87(5)	1,34(5)	6,02(4)	5,33(4)
400	1,32(5)	1,35(5)	1,30(5)	9,12(4)	4,44(4)	3,72(4)
450	8,83(4)	8,77(4)	8,84(4)	6,05(4)	3,10(4)	2,58(4)
500	6,38(4)	6,38(4)	6,32(4)	4,14(4)	2,10(4)	1,81(4)
550	4,75(4)	4,99(4)	4,95(4)	3,19(4)	1,60(4)	1,10(3)
600	3,82(4)	4,16(4)	3,96(4)	2,49(4)	1,21(4)	8,35(3)
650	2,28(4)	3,18(4)	3,24(4)	1,85(4)	8,45(3)	6,30(3)
700	2,15(4)	2,62(4)	2,58(4)	1,56(4)	7,50(3)	5,15(3)
750	1,92(4)	2,23(4)	2,03(4)	1,29(4)	6,16(3)	4,03(3)
800	1,68(4)	1,92(4)	1,59(4)	1,07(4)	4,82(3)	3,45(3)
850	1,36(4)	1,71(4)	1,38(4)	9,00(3)	4,32(3)	2,95(3)
900	1,28(4)	1,52(4)	1,19(4)	7,77(3)	3,65(3)	2,33(3)
950	1,05(4)	1,32(4)	1,07(4)	6,81(3)	3,10(3)	2,12(3)
1000	9,46(3)	1,20(4)	9,34(3)	5,88(3)	2,95(3)	1,90(3)

Эмпирическая модель высотного распределения
электронной концентрации в среднеширотной ионосфере летнего сезона
(июнь-июль)

Высота, км	Местное время, ч					
	0	02	04	06	08	10
85					1,70(2)	1,21(3)
90					1,15(3)	9,02(3)
95				1,44(4)	3,17(4)	5,03(4)
100				2,25(4)	8,01(4)	1,30(5)
110				6,51(4)	1,25(5)	1,60(5)
120				8,72(4)	1,23(5)	1,70(5)
130				6,55(4)	1,30(5)	1,81(5)
140				6,02(4)	1,47(5)	2,22(5)
150				6,51(4)	1,71(5)	2,41(5)
160				7,02(4)	2,02(5)	3,03(5)
170				8,51(4)	2,55(5)	3,21(5)
180			2,32(4)	1,23(5)	2,80(5)	3,75(5)
190	1,26(4)		3,80(4)	1,70(5)	3,20(5)	4,16(5)
200	1,75(4)	1,09(4)	5,60(4)	1,83(5)	3,75(5)	4,80(5)
250	1,03(5)	1,20(5)	2,10(5)	5,35(5)	7,12(5)	7,05(5)
300	3,65(5)	4,60(5)	5,25(5)	8,79(5)	9,63(5)	9,15(5)
350	7,55(5)	7,57(5)	6,20(5)	8,20(5)	8,04(5)	7,10(5)
400	7,80(5)	6,55(5)	5,05(5)	6,65(5)	5,70(5)	5,25(5)
450	5,82(5)	4,34(5)	3,95(5)	5,23(5)	4,05(5)	3,99(5)
500	4,11(5)	2,62(5)	3,08(5)	3,95(5)	2,84(5)	3,04(5)
550	2,82(5)	1,70(5)	2,35(5)	3,05(5)	2,15(5)	2,32(5)
600	1,85(5)	1,08(5)	1,75(5)	2,49(5)	1,61(5)	1,76(5)
650	1,25(5)	7,30(4)	1,30(5)	1,81(5)	1,28(5)	1,38(5)
700	9,36(4)	5,12(4)	1,03(5)	1,45(5)	1,03(5)	1,14(5)
750	6,60(4)	3,65(4)	8,20(4)	1,14(5)	8,17(4)	9,34(4)
800	4,92(4)	2,44(4)	6,40(4)	9,82(4)	6,64(4)	7,46(4)
850	3,63(4)	1,75(4)	5,22(4)	7,96(4)	5,56(4)	6,08(4)
900	2,55(4)	1,33(4)	4,25(4)	6,43(4)	4,75(4)	5,06(4)
950	2,08(4)	1,15(4)	3,53(4)	5,40(4)	4,07(4)	4,31(4)
1000	1,66(4)	9,24(3)	2,95(4)	4,53(4)	3,60(4)	3,68(4)

Примечание. В прил.2 - 3,68 (4) означает $3,68 \cdot 10^4 \text{ см}^{-3}$

Продолжение прил.2

Высота, км	Местное время,ч					
	12	14	16	18	20	22
85	4,01(3)					
90	3,31(4)					
95	9,02(4)	6,40(4)	2,80(4)	1,51(4)		
100	1,61(5)	1,40(5)	9,00(4)	3,03(4)		
110	1,95(5)	1,90(5)	1,43(5)	6,50(4)		
120	2,01(5)	1,80(5)	1,30(5)	5,00(4)		
130	2,30(5)	2,03(5)	1,70(5)	8,00(4)		
140	2,55(5)	2,31(5)	2,00(5)	1,08(5)		
150	2,75(5)	2,80(5)	2,40(5)	1,25(5)		
160	2,96(5)	2,92(5)	2,71(5)	1,40(5)		
170	3,10(5)	3,03(5)	3,10(5)	1,61(5)		
180	3,60(5)	3,50(5)	3,70(5)	1,75(5)		
190	4,13(5)	3,95(5)	4,05(5)	1,80(5)		
200	4,54(5)	4,35(5)	4,05(5)	2,45(5)	1,03(5)	1,97(4)
250	6,96(5)	6,96(5)	6,60(5)	5,95(5)	3,15(5)	1,25(5)
300	8,60(5)	8,27(5)	8,43(5)	8,40(5)	6,50(5)	4,75(5)
350	7,59(5)	7,35(5)	8,05(5)	8,24(5)	8,94(5)	8,67(5)
400	5,63(5)	5,50(5)	6,30(5)	6,59(5)	6,70(5)	8,50(5)
450	4,20(5)	4,15(5)	5,06(5)	4,68(5)	4,52(5)	6,18(5)
500	3,11(5)	3,20(5)	3,25(5)	3,50(5)	3,16(5)	4,30(5)
550	2,25(5)	2,30(5)	3,08(5)	2,81(5)	2,23(5)	3,05(5)
600	1,75(5)	1,76(5)	2,30(5)	2,10(5)	1,70(5)	1,97(5)
650	1,30(5)	1,30(5)	1,77(5)	1,65(5)	1,28(5)	1,38(5)
700	1,08(5)	1,06(5)	1,42(5)	1,18(5)	1,03(5)	1,05(5)
750	8,82(4)	8,54(4)	1,09(5)	9,70(4)	8,20(4)	7,45(4)
800	7,02(4)	7,05(4)	9,27(4)	7,52(4)	6,60(4)	5,90(4)
850	5,90(4)	5,80(4)	7,30(4)	6,13(4)	5,42(4)	4,33(4)
900	4,91(4)	4,95(4)	6,11(4)	5,32(4)	4,48(4)	3,40(4)
950	4,24(4)	4,23(4)	5,23(4)	4,73(4)	3,80(4)	2,81(4)
1000	3,60(4)	3,98(4)	4,59(4)	4,28(4)	3,20(4)	2,20(4)

В промежуточных (между экстремальными) состояниях ионосферы высотный профиль электронной плотности составляется индивидуально методом простейшей временной интерполяции.

Приложение 3

Средние значения параметров стратосферы на широте 45° в зимний период (декабрь-январь) и летний (июнь-июль)

Геометрическая высота, км	Зимний период		Летний период	
	Температура Т, К	Давление Р, гПа(мбар)	Температура Т, К	Давление Р, гПа (мбар)
12	217,9	187,0	222,3	205,4
14	217,1	136,8	216,2	150,3
16	216,3	99,9	216,2	109,7
18	215,5	72,9	217,3	80,1
20	215,4	53,2	219,7	58,7
22	215,4	38,8	222,1	43,2
24	215,4	28,3	224,4	31,9
26	215,4	20,7	227,5	23,6
28	215,4	15,1	231,5	17,8
30	219,9	11,1	235,5	13,1
40	243,9	2,6	259,2	3,3
50	262,8	0,7	276,6	1,0
60	249,2	0,2	254,6	0,3
70	229,0	0,04	212,5	0,07
80	208,4	0,00	182,1	0,01

Таблица составлена в сокращении по материалам [5].

В остальных (между экстремальными) климатических условиях высотный профиль метеорологических величин составляется индивидуально методом простейшей временной интерполяции.

Приложение 4

Насыщенная упругость водяного пара $E(\text{мбар})$ над плоской поверхностью чистой воды и льда при разных температурах $t^{\circ}\text{C}$

$t^{\circ}\text{C}$	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Вода										
50	123,390	29,644	136,169	42,972	150,064	57,455	165,155	73,174	181,523	190,213
40	73,7980	7,7980	82,0107	6,4186	91,0292	5,8501	100,889	06,154	111,654	117,396
30	42,4272	4,9242	47,5478	0,3035	53,1966	6,2329	59,4183	2,7870	66,2604	69,9297
20	23,3708	4,8583	25,4279	8,0834	29,8289	1,6682	33,6058	5,6459	37,7930	40,0518
10	12,2709	3,1178	14,0156	4,9672	15,9750	7,0420	18,1711	9,3653	20,6278	21,9618
00	6,1070	6,5653	7,0538	7,5743	8,1284	8,7181	9,3453	0,0120	10,7204	11,4726
-00	6,1070	5,6772	5,2745	4,8974	4,5444	4,2142	3,9055	3,6171	3,3478	3,0965
-10	2,8622	2,6438	2,4404	2,2512	2,0751	1,9114	1,7594	1,6183	1,4874	1,3661
-20	1,2538	1,1498	1,0536	0,9647	0,8826	0,8068	0,7369	0,6726	0,6133	0,5588
-30	0,5087	0,4627	0,4204	0,3817	0,3462	0,3138	0,2841	0,2570	0,2322	0,2097
-40	0,18909	0,17037	0,15334	0,13788	0,12384	0,11111	0,09959	0,08916	0,07973	0,07122
-50	0,06354	0,05663	0,05040	0,04481	0,03979	0,03528	0,03125	0,02764	0,02442	0,02154
-60	0,01897	0,01667	0,01466	0,01286	0,01126	0,00985	0,00860	0,00747	0,00653	0,00567
Лед										
-00	6,1064	5,6219	5,1727	4,7564	4,3709	4,0141	3,6840	3,3789	3,0970	2,8368
-10	2,5966	2,3752	2,1712	1,9833	1,8104	1,6514	1,5053	1,3711	1,2479	1,1350
-20	1,0315	0,9368	0,8500	0,7708	0,6983	0,6322	0,5719	0,5169	0,4668	0,4212
-30	0,3797	0,3420	0,3078	0,2768	0,2487	0,2232	0,2002	0,1794	0,1606	0,1436
-40	0,1283	0,1145	0,1021	0,0995	0,08094	0,07196	0,06390	0,05669	0,05024	0,04448
-50	0,03933	0,03474	0,03066	0,02702	0,02379	0,02092	0,01837	0,01612	0,01412	0,01236
-60	0,01080	0,00943	0,00822	0,00716	0,00622	0,00540	0,00469	0,00406	0,00351	0,00303

Примечание. Таблица в сокращении заимствована из [4]

ЛИТЕРАТУРА

1. Яковлев В.А. Радиогодезические измерения: Учебное пособие Ростов н/Д: Рост. инж.-строит, ин-т, 1985.
2. Яковлев В.А. Атмосферная коррекция радиогодезических измерений систем локации: Учебное пособие Ростов н/Д: Рост.гос.стр.ин-т, 1993-107с.
3. Фаткуллин М.Н. и др. Эмпирические модели среднеширотной ионосферы. -М.: Наука, 1981. -256 с.
4. Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии Физика атмосферы-Л Гидрометеиздат.,1976. -640 с.
5. Атмосферы справочные. Параметры ГОСТ 24631-81. –М. Издательство стандартов, 1981-30. – 30с.