

Министерство высшего и среднего специального образования РСФСР

Горьковский ордена Трудового Красного Знамени
научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Препринт № 175

ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ МЕЖДУ ЭЛЕКТРОННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ
И ФАРАДЕЕВСКИМ ВРАЩЕНИЕМ В ИОНОСФЕРЕ ПУТЁМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ (НА ЯЗЫКЕ ФОРТРАН)

Л. А. Добрушский

Горький 1984

УДК 551.510.535

Приведена библиотека программ, позволяющая вычислять фарадеевское вращение в ионосфере плоскости поляризации линейно – поляризованного радиоизлучения вдоль произвольного луча зрения при наблюдении в пункте с произвольными географическими координатами. Для каждой программы дано краткое пояснение по её использованию. В качестве иллюстрации рассмотрено несколько задач, имеющих самостоятельный интерес.



©

Горьковский научно-исследовательский радиофизический институт (НИРФИ)

Введение

Фарадеевское вращение плоскости поляризации линейно-поляризованного радиоизлучения в ионосфере определяется величинами электронной концентрации и продольной проекции геомагнитного поля вдоль луча зрения. Как показано в [1], связь между электронным содержанием в ионосфере вдоль направления l' до высоты $h \int_0^h N dl'$ и углом поворота плоскости поляризации вдоль направления l ψ даётся выражением

$$\int_0^h N dl' = k \left(\frac{\int_0^h \hat{N} dl'}{\int_0^h \hat{N} B_l dl} \right) \psi, \quad (I)$$

где \hat{N} - высотный профиль электронной концентрации, B_l - проекция геомагнитного поля на направление l , k - коэффициент, пропорциональный квадрату частоты и зависящий от выбора единиц измерения. Предлагаемая ниже библиотека подпрограмм позволяет вычислять для заданных направлений l и l' стоящее в скобках в правой части (I) выражение и, тем самым, исследовать связь между ψ и $h \int_0^h N dl'$ в зависимости от формы высотного профиля \hat{N} и высоты h . Примеры такого анализа имеются в [1]. Эти же программы могут служить основой для учёта вклада ионосферы в приращение позиционного угла линейно-поляризованного космического радиоизлучения в радиоастрономии (подробнее смотрите в [1]).

В первой части работы приведён текст библиотеки подпрограмм и дано краткое описание назначения и особенностей каждой подпрограммы. Во второй части проиллюстрирована работа некоторых из этих подпрограмм. Для этого рассмотрена задача определения геометрии геомагнитного поля для трёх пунктов - Алхабада, Горького и Мурманска вдоль лучей зрения, соответствующих слежению за тремя различными источни-

ками линейно-поляризованного излучения: геостационарным спутником, областью Полярной звезды и областью сильной поляризации с координатами $\delta = 61^{\circ}$, $\alpha = 4^{\text{h}}30^{\text{m}}$. В третьей части работы приведены некоторые программы, при помощи которых исследовалась связь между ψ и $\int_0^h N dl'$ в [1]. Эти программы представляют самостоятельный интерес, поскольку, меняя численные значения параметров, мы можем получать результаты, аналогичные получаемым в [1], но для других источников линейно-поляризованного излучения, других пунктов наблюдения и других геофизических условий.

Библиотека подпрограмм

SUBROUTINE TAZ - служит для перехода из экваториальной в горизонтальную систему координат.

Перед обращением к TAZ должны быть заданы:

- 1) часовой угол T в радианах (COMMON/CTAZ1/),
- 2) склонение СК в радианах (COMMON/CTAZ/),
- 3) широта U и долгота D ϕ места наблюдения в радианах (COMMON/ГЕОГР/).

Искомые величины азимута и зенитного угла в радианах присваиваются соответственно переменным AV и ZV из COMMON.

BLOCK DATA - содержит массивы G и G1 (COMMON/GG1/), в которые занесены значения коэффициентов ряда Гаусса, определяющие международное аналитическое поле на эпоху 1975 года, а также массивы DG и DG1 (COMMON/DGG1/) коэффициентов, определяющих вековой ход геомагнитного поля. Значения для коэффициентов взяты из [2].

SUBROUTINE ГОДМП(ГОД) - производит пересчет коэффициентов ряда Гаусса на эпоху, задаваемую параметром ГОД. В приводимых ниже примерах ГОД = 1983.

SUBROUTINE ИЗМР - предназначена для вычисления элементов геомагнитного поля. В основу этой подпрограммы положена программа из [3].

Перед обращением к подпрограмме необходимо определить

1) порядок мультипольного приближения вычисляемого поля (параметр NE, COMMON/IFL/), так, NE = 1, 2, 3...8 соответственно определяют дипольное приближение, приближение с точностью до мультиполей третьего, четвертого, ..., девятого порядков,

2) координаты точки, в которой определяется магнитное поле, т.е. высоту над поверхностью Земли в километрах C (I), широту в градусах.

С (4) и долготу в градусах С (7) (COMMON/ГНЗ/).

Искомые элементы магнитного поля в гаммах (10^{-5} Гаусс) B_x , B_y и B_z присваиваются переменным BX , BY и BZ из COMMON/CF/. Направления x , y и z выбраны, как это принято в теории геомагнетизма, т.е. B_x - компонента геомагнитного поля, направленная на Север, а компоненты B_y и B_z соответствуют направлениям на восток и вертикально вниз.

FUNCTION BISEC(R, NN) - служит для вычисления проекции магнитного поля на луч зрения делённой на косинус зенитного угла в этой точке.

Формальные параметры этой подпрограммы:

1) R - высота над поверхностью Земли (в километрах),

2) NN - порядок мультипольного приближения (см. описание SUBROUTINE ИЭМР).

Перед обращением к подпрограмме необходимо задать

1) азимут ΔV и зенитный угол ZV (в радианах) - COMMON,

2) широту Π и долготу $D\phi$ места наблюдения в радианах (COMMON/ГЕОГ/).

Значение зенитного угла в радианах в точке, для которой вычисляется проекция геомагнитного поля, присваивается параметру ZI из COMMON/FB/. Вызывается п/п ИЭМР.

FUNCTION SH(R) - вычисляет номер силовой трубки $L = SH(R)$.

Формальный параметр R - высота над поверхностью Земли в километрах.

Перед обращением к подпрограмме необходимо задать азимут ΔV и зенитный угол ZV в радианах (COMMON).

Вызывается подпрограмма BISEC(R, 1), для обеспечения работы BISEC(R, 1) должны быть определены координаты места наблюдения COMMON/ГЕОГ/.

FUNCTION SC(X) - вычисляет величину, обратную масштабу высот (для распределения электронной концентрации) в текущей точке на луче зрения.

Формальный параметр X - высота над поверхностью Земли в километрах.

Перед обращением к подпрограмме должны быть определены выходные параметры модели распределения электронной концентрации: высота максимума электронной концентрации в километрах XM; параметр, определяющий градиент температуры с высотой J (см. табл. I); параметр N, который определяет выбор зависимости высоты перехода от преоб-

ладания ионов O^+ к преобладанию ионов H^+ с широтой - так, $H = 0$ соответствует ночным условиям, $H = 1$ - дневным, $H = 2$ - широтной зависимостью высоты перехода пренебрегают; приращение высоты перехода в километрах DDXT; температура плазмы в максимуме электронной концентрации TM (СОММОН/СССН/).

Соответствие между параметром J и скоростью изменения температуры с высотой

Т а б л и ц а I

J	:	1	2	3	4	5	6	7	8
$\frac{\partial T}{\partial z}$, $\frac{^{\circ}K}{KM}$:	0	0,167	0,375	0,643	1,0	1,5	2,25	3,5

Вызывается подпрограмма SH(R).

Замечание - для обеспечения работы SH(R) ранее должны быть определены:

- 1) азимут и зенитный угол источника (СОММОН),
- 2) географические координаты места наблюдения (СОММОН/ГЕОГР/).

FUNCTION CON(X) - предназначена для вычисления отношения электронной концентрации в данной точке к электронной концентрации в максимуме.

Формальный параметр X - высота над поверхностью Земли в километрах.

Перед обращением к CON(X) должны быть определены входные параметры модели распределения электронной концентрации (см. описание подпрограммы SC(X)) - СОММОН/СССН/.

Вызывается подпрограмма SC(X), а также используются стандартные программы WTS и GS12 из Library 1.

Замечание - см. замечание к п/п SC(X).

FUNCTION CONL(X) - вычисляет отношение $CON(X)/COS(Z1)$, где Z1 - текущий зенитный угол.

Формальный параметр X - высота над поверхностью Земли в километрах.

Перед обращением к подпрограмме необходимо задать координаты источника ΔV , ZV (в радианах) - СОММОН.

Вызывается подпрограмма CON(X).

Замечание - I) ранее должны быть определены входные параметры

модели (см. описание п/п SC(X) COMMON/SCCM/ , 2) см. замечание к п/п SC(X).

FUNCTION F(R) - вычисляет выражение $VISEC(R,8)*CON(R)$.

Формальный параметр R - высота над поверхностью Земли в километрах.

Вызываются подпрограммы $VISEC(R,8)$ и $CONL(R)$.

Замечание - должна быть обеспечена работа п/п $CONL(R)$ и $VISEC(R,8)$ в полном объеме (см. соответствующие описания).

Т а б л и ц а 2

Название п/п Название COMMON	TAZ	ИЗМЕР	VISEC (R,NH)	SH(R)	SC(R)	CON(R)	CONL(R)	F(R)
/ /			*	*	*	*	*	*
/STAZ1/	*							
/STAZ/	*							
/ТЕОГР/	*		*	*	*	*	*	*
/MF1/		*						
/F13/		*						
/SCCM/					*	*	*	*

Звездочками в таблице показаны те COMMON, массивы и переменные которых должны быть определены перед вызовом данной подпрограммы.

Для удобства пользования библиотекой подпрограмм в табл. 2 приведены все подпрограммы, которые требуют перед вызовом определения значений некоторых массивов и переменных. COMMON, содержащие эти массивы и переменные, отмечены звездочками.

```

FUNCTION BLSEC(R,NH)
COMMON/ MFI/NNH
COMMON/CF/ BX, BY, BZ
COMMON AV, ZV
COMMON/EM3 /C(9)
COMMON/EB/Z1
COMMON/ FEOIP/ U, Do
ACOS(X)=PI/2.-ASIN(X)
NNH=NH
PI=3.141592653589
A=AV; Z=ZV
X=R
T=6371./(6371.+X)
S=Z-ASIN(T*SIN(Z))
B=ACOS(COS(S)*SIN(U)=SIN(S)*COS(U)*COS(A))
IF(X.EQ.0.)GOTO3
IF(Z.NE.0.)GOTO 25
CONTINUE
A1=PI/2.
GOTO 2
CONTINUE
IF(1./COS(U)**2-(TAN(U)/COS(S))**2)1,1,5
CONTINUE
A1=PI-ASIN(SQRT(1/COS(U)**2-(TAN(U)/COS(S))**2))
A2=2.*PI-A1
IF(A.LE.A1)O=ASIN(COS(U)*SIN(A)/SIN(B))
IF(A.GE.A1.AND.A.LT.A2)O=PI-ASIN(COS(U)*SIN(A)/SIN(B))
IF(A.GE.A2)O=2*PI+ASIN(COS(U)*SIN(A)/SIN(B))
CONTINUE
D=DO-ASIN((SIN(O))*SIN(S)/COS(U))
GOTO 2
CONTINUE
IF(A-PI)6,6,7
O=ASIN(COS(U)*SIN(A)/SIN(B))
GO TO 14
O=2*PI-ASIN(COS(U)*SIN(A)/SIN(B))
CONTINUE
IF(A-SQRT(1./SIN(S)**2-1./((TAN(S)*SIN(U))**2))11,12,12
D=PI-DO-ASIN(SIN(O)*SIN(S)/COS(U))
CONTINUE
C(1)=X;C(A)=(PI/2-B)*180./PI;C(7)=D*180./PI
CALL KZIMP
Z1=Z-S
B1=-BZ+COS(Z1)-BY*SIN(O)*SIN(Z1)-BX*COS(O)*SIN(Z1)
BLSEC=-B1/COS(Z1)
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE FORMN(FOR)
COMMON/GG1/G(44),G1(44)
COMMON/DG1/DG(44),DG1(44)
DO I=1,44
G(I)=G(I)+DG(I)*(FOR-1975)
G1(I)=G1(I)+DG1(I)*(FOR-1975)
RETURN
END

```



```

SUBROUTINE TAZ
COMMON/CTAZ1/T
COMMON AV,ZV
COMMON/CTAZ/CK
COMMON/TEOIP/U,DO
ACOS(X)=PI/2.-ASIN(X)
PI=3.141592653589
Z=ACOS(COS(U)*COS(CK)+SIN(U)*SIN(CK))
XV=COS(CK)*SIN(T)
YV=COS(CK)*SIN(U)*COS(T)-SIN(CK)*COS(U)
IF(YV.LE.0.)GOTO 41
IF(XV.LT.0.)GOTO 49
A=ATAN(XV/YV)
GOTO 50
41 IF(YV.LT.0)GOTO 44
A=PI/2.
GOTO 50
44 A=PI+ATAN(XV/YV)
GOTO 50
49 A=2.*PI+ATAN(XV/YV)
50 AV=A;ZV=Z
RETURN
END

```

```

BLOCKDATA
COMMON/GG1/G(44),G1(44)
COMMON/DGG1/DG(44),DG1(44)
DATAG,G1/-30186.,-2036.,-1898.,2997.,1551.,
# 1299.,-2144.,1296.,806.,951.,807.,462.,-393.,235.,
* -204.,368.,275.,-20.,-161.,-38.,
* 46.,57.,15.,-210.,-1.,-8.,-114.,
* 66.,-57.,-7.,7.,-22.,-9.,11.,-8.,
* 11.,13.,3.,-12.,-4.,6.,-2.,9.,1.,0.,5735.,
* 0.,-2124.,-37.,0.,-361.,249.,-253.,
* 0.,148.,-264.,37.,-307.,0.,39.,142.,-147.,-99.,74.,
* 0.,-23.,102.,88.,-43.,-9.,-4.,0.,-68.,-24.,-4.,11.,
* 27.,-17.,-14.,
* 0.,4.,-15.,2.,-19.,1.,18.,-6.,-19/
DATADG,DG1/25.6,10.,-24.9,.7,4.3,-3.8,-10.4,-4.1,
-4.2,
* -.2,-2,-3.9,-2.1,-3.1,.3,-.7,1.1,-1.6,-.5,1.,
* .2,.5,2.,2.8,0.,.9,-.1,3*0.,.6,.9,2*.3,-.5,
* .2,.3,.0,-.2,-.4,-.3,.6,-.3,-.1,0.,-10.2,0.,-3.,
-18.9,
* 0.,6.9,2.5,-5.0,0.,5.,.8,1.7,-1.,0.,1.2,2.3,-2.,
1.3,1.1,
* 0.,-.5,-.1,-.2,-1.3,.7,1.7,0.,-1.4,-.1,2*.3,-.7,
1.,8,
* 0.,-.2,-.4,-.2,-.3,.4,-.3,-.6,.3/
END

```

```

SUBROUTINE HEMMP
COMMON/TI/D,AJ,HC

```

```

COMMON/FM3/C(9)
COMMON/ VF1/NH
COMMON/CF/BX, BY, BZ
COMMON/ GG1/G(44), G1(44)
COMMON/ DGGL/DG(44), DG1(44)
C СИНТЕЗ СЪЕДИЧЕННЫХ ГАРМОНИК
INTEGER E, PR
REAL L, LL, LP, NR
DIMENSION F(25, 25), R(25, 25), U1(25),
*U2(25), S(25, 25)
E=1
A3=.1E-07
PI=3.141593
RS=6371.2
A=6378.16
B=6356.776
NH=NH+1
I=0
H=C(1)
17 E1=C(4)
18 F2=F1*PI/180.
IF(R.EQ.0)GO TO 19
S1=A**2*COS(F2)**2+B**2*SIN(F2)**2
S2=A**4*COS(F2)**2+B**4*SIN(F2)**2
R1=SQRT(H**2+2*H*SQRT(S1)+S2/S1)
ARG=(B**2+H*SQRT(S1))/(A**2+H*SQRT(S1)+SIN(F2)*
COS(F2))
F3=ATAN(ARG)
F2=F2-F3
S1=SIN(F2)
S2=COS(F2)
GO TO 20
19 F3=F2
V=PI/2.-F3
C1=SIN(F)
C2=COS(F)
S(1,1)=1.
DO 22 N=2, NH
S(1,N)=S(1,N-1)*(2*N-1)/(N-1.)
S(2,N)=S(1,N)*SQRT(N-1.)*2/N)
IF(N.LT.3) GO TO 22
21 DO 21 M=3, N
22 S(M,N)=S(M-1,N)*SQRT((N-M+1.)/(M+M-1.))
CONTINUE
C ВЧИСЛЕНИЕ СЪЕДИЧЕННЫХ ДУГЛИН
F(1,1)=1.
R(1,1)=0.
F(1,2)=G2
R(1,2)=-C1
F(2,2)=C1
R(2,2)=G2
DO 26 N=3, NH
DO 26 M=1, N
IF(N=N) 25, 24, 23
25 F(M,N)=0.
R(M,N)=0.

```

```

GO TO 26
24 P(M,N)=C1*P(M-1,N-1)
R(M,N)=C1*R(M-1,N-1)+C2*P(M-1,N-1)
GOTO26
25 NR=((N-2)**2-(M-1)**2)/((2*N-3)*(2*N-5))
P(M,N)=C2*P(M,N-1)-NR*P(M,N-2)
R(M,N)=C2*R(M,N-1)-C1*P(M,N-1)-NR*R(M,N-2)
26 CONTINUE
DO27N=1,NH
DO27M=1,N
P(M,N)=P(M,N)*S(M,N)
27 R(M,N)=R(M,N)*S(M,N)
L1=RS/(RS+H)
IF(E.EQ.1)L1=RS/R1
A1=A3
IF(ABS(SIN(F)).GR.A3)A1=SIN(F)
L=C(7)
28 I=I+1
L=L*PI/180.
DO29M=1,NH
U1(M)=SIN((M-1)*L)
29 U2(M)=COS((M-1)*L)
WRITE3 P(M,N)
X=0.
Y=0.
Z=0.
J=0
DO30N=2,NH
DO30M=1,N
A2=(M-1)/A1
J=J+1
X=X+(G(J)*U2(M)+G1(J)*U1(M))*L1** (N+1)*R(M,N)
Y=Y+(G(J)*U1(M)-G1(J)*U2(M))*L1** (N+1)*P(M,N)
* A2
30 Z=Z+(-1)**N*(G(J)*U2(M)+G1(J)*U1(M))*L1** (N+1)
* P(M,N)
IF(E.EQ.0)GOTO31
X1=X*S2+Z*S1
Z1=Z*S2-X*S1
X=X1
Z=Z1
31 T=SQRT(X**2+Y**2+Z**2)
BX=X;BY=Y;BZ=Z
HC=SQRT(X**2+Y**2)
D=ATAN(Y/X)
IF(Y)33,32,32
32 IF(X)35,36,36
33 IF(X)35,34,34
34 D=D.*PI+D
GOTO36
35 D=PI+D
36 LP=ATAN(Z/HC)
IF(D-PI)38,37,37
37 D=D-2.*PI
38 L=L/.01745329
AJ=LP

```

RETURN
END

FUNCTIONSH(R)
COMMON/CF/BX, BY, BZ
T=6371./.(6371.+R)
SHELL=BLSEC(R,1)
SHELL=1./.(COS(ATAN(BZ*0.5/SQRT(BX*BX+BY*BY)))
**2*T)
SH=SHELL
RETURN
END

FUNCTIONSC(X)
INTEGER DEHB

REAL

COMMON/SCCH/XM, J, N, DDXT, TM

ACOS(X)=PI/2.-ASIN(X)

DEHB=N

PI=3.141592

L=SH(X)

FI=ACOS(1./SQRT(L*6370./6770.))*180./PI

AMO=26.75E-4;BK=1.38;GO=9.82E+3

U=5K*TM/(AMO*GO*(6370./((XM+6370.))**2)

XT=700.

IF(N.EQ.2) GO TO 2

IF(DEHB.NE.1)GOTO1

XT=1300.

IF(FI.LE.55.)XT=24.*(FI-30.)+700.

IF(FI.LE.30.)XT=700.

GOTO2

1 CONTINUE

XT=900.

IF(FI.LE.65.)XT=600.+30.*(FI-55)

IF(FI.LE.55.)XT=500.+(20./3.)*(FI-40.)

IF(FI.LE.40)XT=700.-5.*FI

2 CONTINUE

XT=XT+DDXT

19 GOTO(3,4,5,6,7,8,9,10),J

3 DT=0.;U=1.492;V=.355;R=2.15;DXB=.558;DXT=.104

GOTO11

4 DT=.167;U=1.437;V=.43;R=2.294;DXB=.575;DXT=.12

GOTO11

5 DT=.375;U=1.411;V=.539;R=2.4;DXB=.599;DXT=.147

GOTO11

6 DT=.643;U=1.415;V=.698;R=2.494;DXB=.628;DXT=.191

GOTO11

7 DT=1.;U=1.45;V=.932;R=2.55;DXB=.67;DXT=.267

GOTO11

8 DT=1.5;U=1.738;V=1.444;R=2.415;DXB=.75;DXT=.366

GOTO11

9 DT=2.25;U=3.5;V=2.917;R=1.709;DXB=1.;DXT=.55

GOTO11

10 DT=3.5;U=20.;V=10.2;R=.889;DXB=1.5;DXT=1.23

11 CONTINUE

TB=(TM+DT*(XT-XM))/(1.+(DXB-DXT)*DT)

```

XY=XT+DIT*TB
HA=TB/R
D=(I-XA)/HA
IF(DT.GT.2.8)GOTO12
H=HA*EXP(U*D/SQRT(V+D*D))
GOTO13
12 CONTINUE
E=11.25*D+8.99
IF(E)14,14,15
15 H=HA*EXP(.1438*E-1.41)
GOTO13
14 H=HA*EXP(.1438*(E+.01076*E**3)-1.41)
13 CONTINUE
SC=(1.-EXP((XM-X)/4))/H
RETURN
END

```

```

FUNCTIONCON(X)
EXTERNA LSC
COMMON/SCCH/XM,J,N,DDXT,TM
IF(X.LE.XM)GOTO1
CALLWTS
Y=GS12(SC,XM,X)
CON=EXP(-Y)
GOTO2
1 CONTINUE
AMO=26.75E-4;BK=1.38;GO=9.82F3
U=2.*BK*TM/(AMO*GO*(6371./(XM+6371.))**2)
CON=EXP((XM-X)/4+.5-.5*EXP((XM-X)/(.5*U)))
2 CONTINUE
RETURN
END

```

```

FUNCTIONCONL(X)
COMMONAV,ZV
Z1=ASIN(6371./(6371.+X))*SIN(ZV))
CONL=CON(X)/COS(Z1)
RETURN
END

```

```

FUNCTIONF(R)
COMMONFB,ZI
F=B1SEC(R,8)*CONL(R)*COS(Z1)
RETURN
END

```

Геометрия продольной проекции геомагнитного поля вдоль луча зрения (пример использования библиотеки подпрограмм)

Для примера получим зависимость изменения проекции магнитного поля на луч зрения с высотой для трёх пунктов наблюдения: Ашхабад, Горький и Мурманск.

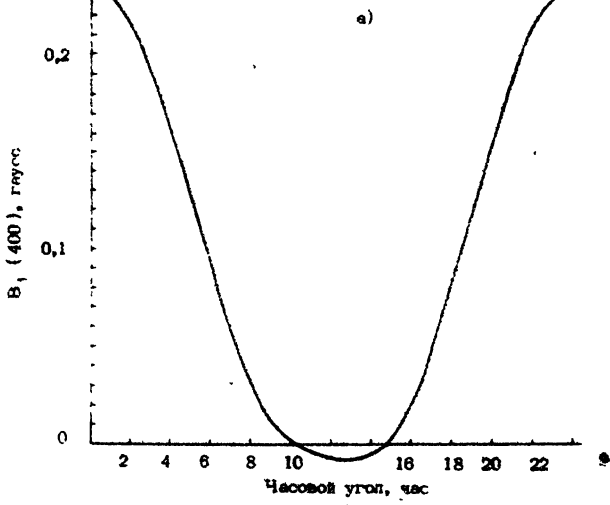
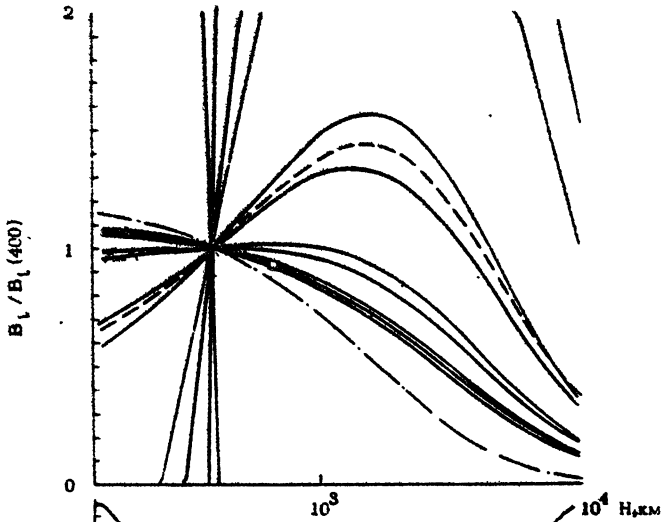
В качестве источников линейно-поляризованного излучения будем брать:

1. геостационарный спутник в меридиальной плоскости,
2. полярную область,
3. область с координатами $\delta = 61^\circ$, $\alpha = 4^h 30^m$, которая имеет высокую температуру линейно-поляризованного радиоизлучения. Первые два источника неподвижны относительно наблюдателя, а положение области $\delta = 61^\circ$, $\alpha = 4^h 30^m$ меняется с изменением часового угла радиотелескопа. Результаты счета приведены на рис. 1 - 3. Они иллюстрируют изменение геометрии задачи, рассмотренной в [1], в зависимости от горизонтальных координат источника и положения наблюдателя. На рис. 1а-3а изображены зависимости нормированной проекции геомагнитного поля от высоты для геостационарного спутника - штрих-пунктирной кривой, для Полярной области - пунктирной и для области $\delta = 61^\circ$, $\alpha = 4^h 30^m$ для различных значений часового угла - сплошной кривой. Нормировка проводилась по значению проекции геомагнитного поля на луч зрения для высоты 400 км. Для области $\delta = 61^\circ$, $\alpha = 4^h 30^m$ зависимости проекций напряженности геомагнитного поля в гауссах на луч зрения на высоте 400 км от часового угла представлены на рис. 1б, 2б, 3б. Соответствующие значения для спутника и Полярной области даны в табл. 3 (также в гауссах).

Т а б л и ц а 3

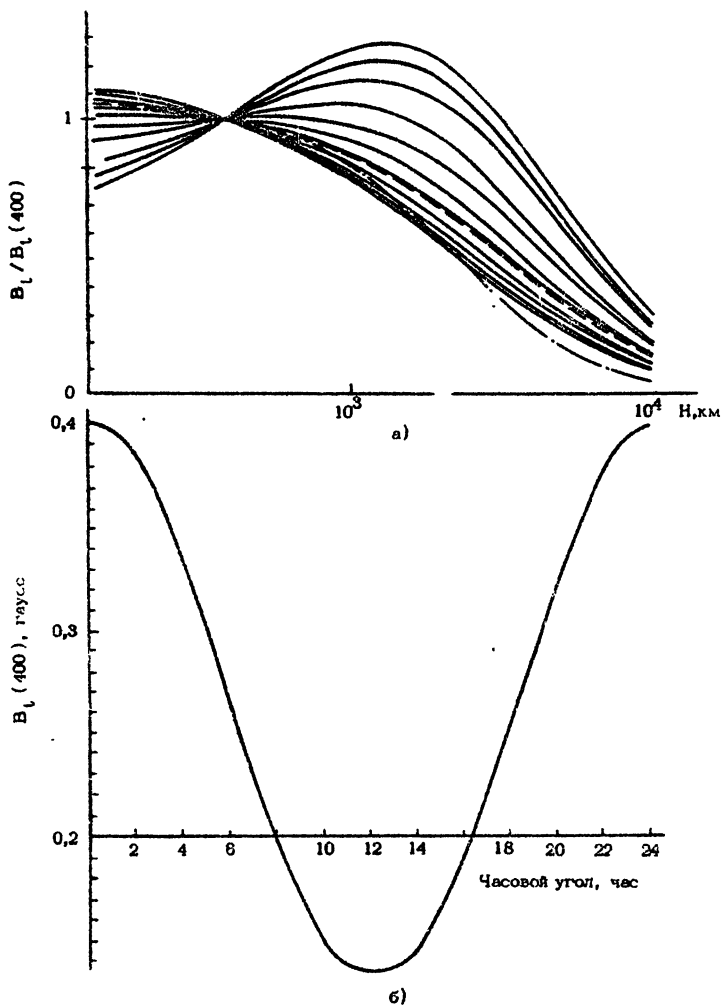
	Ашхабад	Горький	Мурманск
спутник	0,39	0,36	0,29
Полярная	0,09	0,29	0,39

Эти результаты были получены с помощью двух программ (PROGRAM ГМП и SUBROUTINE H1), которые приведены ниже. Из приведённой выше библиотеки подпрограмм в расчётах использовались подпрограммы TAZ, BLOC DATA, ГОДМП, ИЗМР и ВЛЕС.



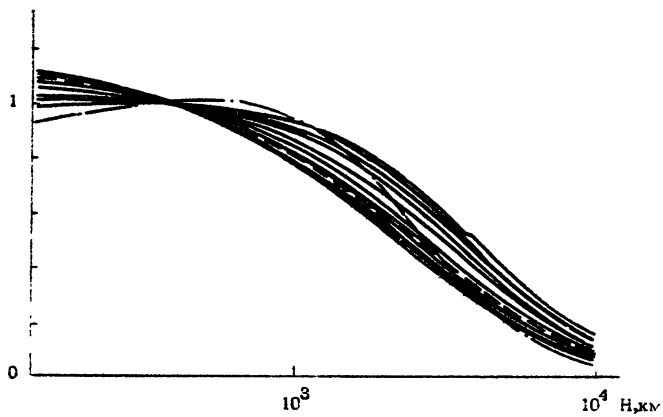
а)

62
Рис. I

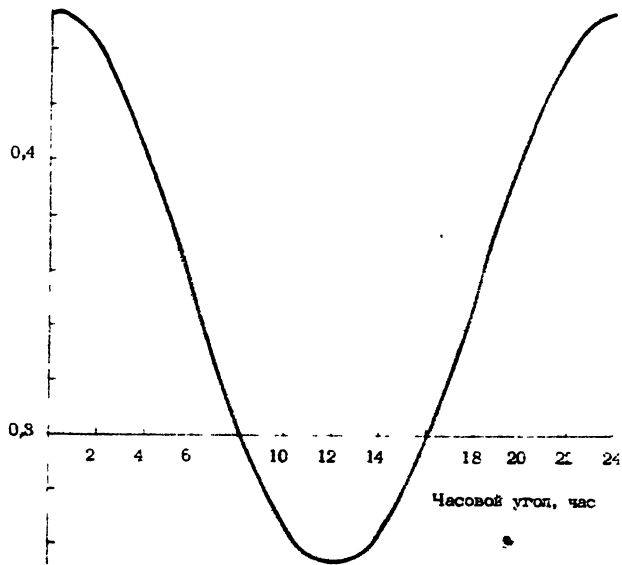


Р и с. 2

МУРМАНСК



а)



б)

Р и с. 3

```

PROGRAM ГМП I
COMMON/ГЕОГР/U,DO
COMMON/H/ X1(128),XO
X(I)=10.** (2.17609+(I-1)*.01424)
CALL ГОДМП(1983)
DO 6 K=1,128
6 X1(K)=X(K)
CALL PAGE(68.,36.,' ',0,0)
DO 1 I=1,3
CALL LIMITS(150.,10000.,0.,2.)
XO=2.+20.*(I-1); AO=XO+1.
CALL REGION(XO,20.,15.,15.,' ',0,0)
IF(I-2) 2,3,4
2 CALL SYMBOL(AO,35.,5,' АШХАБАД',7,0)
U=.6623;DO=1.0167
PRINT(' ' АШХАБАД ' ' )
CALL H1
GO TO 1
3 CALL SYMBOL(AO,35.,5,' ГОРЬКИЙ',7,0)
U=.9714;DO=.7615
PRINT('/ ' ГОРЬКИЙ ' ')
CALL H1
GO TO 1
4 CALL SYMBOL(AO,35.,5,' МУРМАНСК',8,0)
U=1.1973;DO=.5908
PRINT('/ ' МУРМАНСК ' ')
CALL H1
I CONTINUE
CALL ENDPG('ГМП I')
END

```

```

SUBROUTINE H1
COMMON AV,ZV
COMMON/FB/Z1
COMMON/CTAZ/CK
COMMON/CTAZ1/T
COMMON/ГЕОГР/ U,DO
COMMON/H/ X1(128),XO
DIMENSION Y1(128),BL*00(13)
PI=3.14159265
CK=1.065
ZV=U+ATAN(6371.*SIN(U)/(35800.+6371.*(1.-COS(U))))
AV=0.
CALL COLOR(1)
BLT=BLSEC(400.,8)
BLT=BLT*COS(Z1)
DO 1 T=1,128
Y=BLSEC(X1(I),8)
I Y1(I)=Y*COS(Z1)/BLT
PRINT(' ' СЛУТНИК BL(400)= ' ',F6,0)',BLT
CALL IGLINE(X1,Y1,128,1,0,128,0)
CALL COLOR(2)
ZV=PI/2.-U
AV=PI
BLT=BLSEC(400.,8)
BLT=BLT*COS(Z1)

```

```

DO 2 I=1,128
Y=BLSEC(X1(I),8)
2 Y1(I)=Y*COS(Z1)/BLF
PRINT(' ' ПОЛЯРНАЯ BL(400)=' ',F6.0)',BLF
CALL LGLINE(X1,Y1,128,1,0,128,0)
CALL COLOR(3)
DO 3 J=1,12
T=2.*(J-1)*PI/12.
CALL TAZ
BLT=BLSEC(400.,8)
BLT=BLT*COS(Z1)
BL400(J)=BLT/1.E5
DO 4 I=1,128
Y=BLSEC(X1(I),8)
4 Y1(I)=Y*COS(Z1)/BLF
CALL LGLINE(X1,Y1,128,1,0,128,0)
3 CONTINUE
CALL XLGAX(20., 'H KM',4,1,1,0)
CALL YAXIS(X0,'BL(400)',10,1,10,0,3)
BL400(13)=BL400(1)
CALL MINMAX(BL400,13,XMN,XXM )
CALL LIMITS(0.,24.,XMN,XXM)
CALL REGION(X0,2.15,15.,'0',0,0)
CALL SINCL(0.,2.,BL400,13)
CALL AXES('ЧАС.УГ.' ,7,1.,6,'BL(400)',7.,1.,10,0,0)
RETURN
END

```

Головные программы, использовавшиеся в [I] для анализа связи между ψ и $\int_0^{h_{эфф}} N dh'$

Приведённая выше библиотека подпрограмм представляет возможности для моделирования процесса распространения линейно-поляризованной электромагнитной волны в ионосфере. Реализация этих возможностей для конкретных задач осуществляется при помощи головных программ. В [I] рассматривалась задача установления связи между фарадеевским вращением и электронным содержанием ионосферы по наблюдениям области сильной поляризации с координатами $\alpha = 4^{\circ}30'$, $\delta = 61^{\circ}$ в г. Горьком. Использование нескольких головных программ в [I] было вызвано ограниченной ёмкостью буферной памяти графопостроителя. Основной из проводимых программ является NFIОH. Именно в этой программе происходит вызов подпрограмм библиотеки, а результаты счёта записываются на магнитную ленту. В результате работы программы NFIОH строятся семейства коэффициентов пропорциональности между ψ и $\int_0^{h_{эфф}} N dh$ как функции $h_{эфф}$ для различных моделей профиля высотного распределения электронной концентрации в ионосфере (рис. 10 из [I]). Там же вычисляется и записывается среднее значение коэффициента пропорциональности ($\bar{K}(h_{эфф})$) и среднеквадратичное отклонение значений коэффициента пропорциональности на базисном множестве моделей профиля электронной концентрации в зависимости от $h_{эфф}$ ($sig_K(h_{эфф})$) для различных значений часового угла, а также вычисляются и записываются на магнитную ленту величины проекции геомагнитного поля на луч зрения (в гауссах) и целое число i , такое, что выбор $h_{эфф} = X(i)$ (где X - функция-оператор из NFIОH) обеспечивает наименьшую ошибку в определении электронного содержания до высоты $h_{эфф}$.

Программа SGM строит графики среднего квадратичного отклонения коэффициентов пропорциональности между ψ и $\int_0^{h_{эфф}} N dh$ в зависимости от $h_{эфф}$ для различных значений часового угла. Результаты работы этой программы также приведены на рис. 10в [I].

Программа ALFA вместе с подпрограммой H2 строит графики зависимости $K(t)$ и $sig_K(t)$ для $h_{эфф} = h_{эфф}^*$ и для $h_{эфф} = 2000$ км (рис. 11, 12, 13, 14 из [I]). Результаты работы этой программы можно непосредственно использовать для обработки наблюдений фарадеевского вращения плоскости поляризации. Ниже приводится текст программы PROGRAM NECH, программы PROGRAM ALFA с подпрограммой SUBROUTINE H2, а также программы PROGRAM SGM.

PROGRAMHEION

ВЫЧИСЛЯЕТ ЗАВИС. ОТ МОДЕЛИ ЧАСТЬ КОЭФ. ПРОПОР. МЕЖДУ ЭИ
СОДЕРЖ. ДО ВЫСОТЫ Н И УГЛОМ ПОВОРОТА (К(Н)), А ТАКЖЕ
СР. КВ. ОТКЛОНЕНИЕ ЭТОГО КОЭФФ. ЗНАЧЕНИЯ
ЧАС. УГЛА БЕРУТСЯ КАЖДЫЕ 2 ЧАСА.
ЗАПИСЬ НА МЛ 222 (50) С 0 ЗОНЫ

```

COMMON AV,ZV
COMMON/CTAZ1/ T
COMMON/CTAZ/ CK
COMMON/ГЕОГР/ U,DO
COMMON/SCCH/ XM,JJJ,NNN,DDKT,ТМ
DIMENSION XO(12),YO(12),IN(128),YF(128),X1(128)
DIMENSION YY(128,12),SIGMA(128,13)
DIMENSION C(11),TT(13)
DIMENSION CFM(13)
DIMENSION SUMM(128,12),CFM400(13),SIG(128),
* SMAX(128)
DIMENSION SA(640)
EQUIVALENCE(SIGMA(1,9),SA)
X(I)=10.**((2.17609+(I-1)*.01424)
PI=3.1415926
CK=1.065;U=.97127;DO=0.7615;ГОД=1985.
CALL ГОДМ(1983)
DO 11 II=1,128
II X1(II)=X(II)

```

НЕИЗМЕНЯЕМЫЕ ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ.

XM=300.

JJJ=1

NNN=2

CALL PAGE(55.,36.,'X',0,0)

CALL BEGW(50,0)

DO 1 I=1,12

CALL LIMITS(0.,6000.,0.,3.)

T=PI*(I-1)/6

CALL TAZ

BLT=BLSEC(400.,8)

CFM400(I)=BLT

XO(I)={{(I-1)/3}*13.+2.

YO(I)={{(I-1)-((I-1)/3)*3}*11.5+1.5

AX=XO(I)+75

AY=YO(I)+8.

FNUM=2.*(I-1)

CALL REGION(XO(I),YO(I),10.,10.,'X',0,0)

CALL SYMBOL(AX,AY,.5,'ЧАС.',4,0.)

CALL NUMBER(XO(I),AY,.5,FNUM,0,0.)

CALL AXES('KM',2,1000.,10,'TRES(H)/TRES',13,.,.,.,.)

В ЦИКЛЕ I7 ИЗМЕНЯЮТСЯ ПАРАМЕТРЫ ТМ,DDKT

DO 17 M=1,3

ТМ=700

IF(M.NE.1) ТМ=1000.+500.*(M-2)

```

DO 17 N=1,4
L=(N-1)*4+N
DDXT=100.*(N-1)
S1=0.;C1=0.
ZP=ZV
ZV=.01
b=BLSEC(X1(1),8)
S2=CON(X1(1))
ZV=ZP
C2=F(X1(1))
YN(1)=0.
YF(1)=0.
DO 2 II=2,128
II=X1(II)
S1=S2
C1=C2
ZP=ZV
ZV=.01
b=BLSEC(II,8)
S2=CON(II)
ZV=ZP
C2=F(II)
DX=X1(II)-X1(II-1)
YN(II)=YN(II-1)+(S2+S1)*DX/2.
YF(II)=YF(II-1)+(C2+C1)*DX/(2.*BLT)
2 CONTINUE
A=YF(128)
DO 18 K=1,128
YN(K)=YN(K)/A
YY(K,L)=YN(K)
I8 CONTINUE
CALL COLOR(M)
CALL LINEO(X1,YN,118)
CALL COLOR(3)
I7 CONTINUE
DO 3 K1=29,128
SUM=0.
DO 4 LL=1,12
SUM=SUM+YY(K1,LL)/12.
SG=0.
DO 5 LM=1,12
SG=SG+(YY(K1,LM)-SUM)**2/12.
SIG(K1)=SQRT(SG)/SUM
SUMM(K1,I)=SUM
3 CONTINUE
DO 99 K=1,28
99 SIG(K)=0.
DO 98 K=1,128
98 SIGMA(K,I)=SIG(K)
C
C ЗАПИСЬ СР. КВ. ОТКЛ. (SIG(H))-128 ТОЧЕК
CALL WRTPR(SIG,128)
DO 12 K=1,128
I2 SIG(K)=SUMM(K,I)
C
C ЗАПИСЬ K(H)

```

```

I CALL WRAPR(SIG,128)
CONTINUE
CFM400(13)=CFM400(1)
C
C ЗАПИСЬ ПРОЕКЦ. МАГ. ПОЛЯ В ЗАВИС. ОТ ЧАС. УГЛА
CALL WRAPR(CFM400,13)
CALL ENDFG('CK61')
DO 6 I=29,118
SM=SIGMA(I,1)
DO 7 K=2,12
IF(SM-SIGMA(I,K).LE.0.) SM=SIGMA(I,K)
7 CONTINUE
SMAK(I)=SM
6 CONTINUE
SM=SMAK(29)
NI=29
DO 8 I=30,118
IF(SM-SMAK(I).LT.0.) GO TO 8
NI=I
SM=SMAK(I)
8 CONTINUE
HM=X(NI)
C ЗАПИСЬ ЦЕЛОГО ЧИСЛА, СООТВ. НАИЛУЧШЕЙ ЭФФ. ВЫСОТЕ

CALL WRAPR(NI,1)
CALL WREND
DO 9 I=1,12
CFM(I)=CFM400(I)/SUMM(NI,I)
9 CONTINUE
PRINT('HM=',F9.0)',HM
PRINT('CP.KB.OTKL.= ',F7.5)',SM
PRINT('BLSEC CPEД.= ',13F10.4)',CFM
DO 10 I=1,12
CFM(I)=CFM400(I)/SUMM(80,I)
PRINT('/','ДЛЯ HM=2000KM. '),
PRINT('BLSEC CPEД.: *25FB.0)',CFM
PRINT('CP.KB. OTKL. ДЛЯ 2000= *F8.4)',SMAK
(80)
END

PROGRAM ALBA
C ИСПОЛБЗУЕТ ЗАПИС. НА МЛ222 РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА НЕИОН
C
C СТРОИТ K(T) И SIG(T)
C СЧИТЫВАЕТ С 0 ЗОНН МЛ 222 (50)
COMMON AV,ZV
COMMON/CTAZ1/ T
COMMON/CTAZ/ CK
COMMON/TEOFP/ U,DO
COMMON/SCCH/ XM,JJJ,KNN,DDXT,FM
COMMON/HH/IK,X0,SIGMA(128,13),SUMM(128,12
),CFM400(13)
DIMENSION X1(128)
DIMENSION SIG(128)
CALL BEGR(50,0)
DO 1 I=1,12

```

```

CALL RDTAPE(SIG,128)
CALL RDTAPE(X1,128)
DO 1 K=1,128
SIGMA(K,I)=SIG(K)
SUMM(K,I)=X1(K)
I CONTINUE
CALL RDTAPE(CFM400,13)
PRINT('CFM400',13F8.0),CFM400
CALL RDTAPE(NI,1)
CALL PAGE(40.,36.,'X',0,0)
DO 20 I=1,2
IK=NI
IF(I.EQ.2) IK=80
PRINT('IK=',I4),IK
XD=2.+20.*(I-1.)
CALL H2
20 CONTINUE
CALL ENDPG('ALFA')
END

SUBROUTINE H2
C ЕСЛИКОМПЬЮТЕРНАЯ П/П ДЛЯ ALFA
C СЛУЖИТ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ГРАФИКОВ
COMMON/HH/IK,X0,SIGMA(13,13),SUMM6128,12)
,CFM400(13)
DIMENSION SIG(13),ALFA(13)
DO 1 T=1,12
SIG(I)=SIGMA(IK,I)
I ALFA(I)=1.E5*(SUMM(IK,I)/CFM400(I))
SIG(13)=SIG(1);ALFA(13)=ALFA(1)
PRINT('K:',13F5.2/'SIG',13F5.3),ALFA
,SIG
CALL LIMITS(0.,24.,0.,15)
CALL REGION(X0,20.,15.,15.,'X',0,0)
CALL SINCL(0.,2.,SIG,13)
PRINT('WW')
CALL AXES('ЧАС.УГ.',7,I.,6,'SIGMA'.5,.1,10,0)
CALL MINMAX(ALFA,13,AMN,AMX)
D=(AMN+AMX)/20.
A1=AMN-D;A2=AMX+D
CALL LIMITS(0.,24.,A1,A2)
CALL REGION(X0,2.,15.,15.,'X',0,0)
CALL SINCL(0.,2.,ALFA,13)
CALL AXES('ЧАС.УГ.',7,I.,6,'ALFA',4,.1,10,0)
D=2.9*2.9
A1=A1*D;A2=A2*D
CALL LIMITS(0.,24.,A1,A2)
CALL REGION(X0,2.,15.,15.,'X',0,0)
CALL YAXIS(24.,1,'R10/CM*CM*ГРАД',16,I.,10,0,3)
RETURN
END

PROGRAM SGM
C ИСПОЛЬЗУЕТ РЕЗУЛЬТАТЫ СЧЕТА НЕЙМОН
C СЧИТЫВАЕТ С МЛ 222 (50) С 0-ОЙ ЗОНЫ.
C СТРОИТ SIG(N) ДЛЯ РАЗЛ. ЗНАЧ. ЧАС. УГЛА.

```



```

DIMENSION XO(12),YO(12)
DIMENSION SIGMA(128,12),SIG(128),X1(128),X7(128)
X(I)=10.*(2.17609+(I-1)*.01424)
DO 11 II=1,128
II X1(II)=X(II)
CALL BEGR(50,0)
CALL PAGE(55.,36.,'X',0,0)
DO1 I=1,12
CALL RDTAPE(SIG,128)
CALL LIMITS(0.,6000.,0.,3)
XO(I)=$((I-1)/3)*13.+2.
YO(I)=$((I-1)-((I-1)/3)*3)*11.5+1.5
AX=XO(I)+.75
AY=YO(I)+9.
FNUM=2.*(I-1.)
CALL REGION(XO(I),YO(I),10.,10.,'X',0,0)
CALL SYMBOL(AX,AY,.5,'QAC',4,0.)
CALL NUMBER(XO(I),AY,.5,FNUM,0,Q)
CALL AXES('KM',2,1000.,10,'SIG(H)',6,.1,10,0)
CALL LINEO(X1,SIG,118)
CALL RDTAPE(SIG,128)
I CALL RDTAPE(SIG,13)
CONTINUE
CALL ENDFG('SIGM')
END

```

Заключение

Предложенная в этой работе библиотека подпрограмм позволяет моделировать вращение плоскости поляризации линейно-поляризованной волны в ионосфере, т.е. вычислять продольную проекцию геомагнитного поля и относительную электронную концентрацию вдоль луча зрения. Для вычисления элементов геомагнитного поля нами использовалось международное аналитическое поле на 1975 - 1980 годы. Для расчёта поля для других эпох следует ввести соответствующие изменения в подпрограммы BLOC DATAI ГОДМП(ГОД). С моделированием электронной концентрации дело обстоит сложнее. Определение формы профиля для возмущённых условий требует специального рассмотрения, поэтому мы ограничились моделированием спокойной ионосферы. Статистический подход, применяемый для определения связи между фарадеевским углом поворота плоскости поляризации и электронным содержанием ионосферы, облегчает задачу, так как требует лишь близости формы профиля к реальной "в среднем". Поэтому даже довольно грубые модели позволяют оценить коэффициент пропорциональности между ψ и $\int_0^h N dt'$; естественно, надёжность таких оценок повышается с улучшением моделей электронной концентрации.

Выше максимума F_2 -слоя ионосфера хорошо описывается в используемом в наших моделях приближении диффузионного равновесия. Однако вблизи максимума чепменовская форма профиля может оказаться слишком грубой. Её использование в нашей модели можно оправдать тем, что на высотах ~ 300 км магнитное поле меняется мало и, следовательно, фарадеевское вращение в этой области определяется интегральным электронным содержанием и слабо зависит от деталей формы профиля. Однако более корректным будут описания профиля электронной концентрации вблизи максимума F_2 -слоя с помощью модели IRI-77. Для этого необходимо ввести изменения в подпрограммы SC и CON'.

В [1] отмечалась важность учёта изменений входных параметров модели профиля электронной концентрации с широтой. В наших моделях учтён широтный вход высоты перехода $O^+ - H^+$ (h_T). Эта зависимость $h_T(\varphi)$ была определена для минимума солнечной активности. Частичное моделирование различных уровней солнечной активности производилось путём прибавления к $h_T(\varphi)$ различных значений $\Delta h_T(h_T = h_T(\varphi) + \Delta h_T)$.

Для более полного учёта зависимости $h_T(\varphi)$ для различных уровней солнечной активности, а также, возможно для учёта зависимости других входных параметров от широты, необходимо внести соответствующие изменения в подпрограмму SC.

Л и т е р а т у р а

1. Добрушский Л.А., Попова Л.В., Разин В.А., Теплых А.И. Препринт.: НИРФИ (в печати).
2. Яновский Б.М. Земной магнетизм, Л., 1978.
3. Термина Л.О. и др. Препринт.: ИЗМИРАН, 1980.

Дата поступления статьи
9 декабря 1983 г.

Леонид Александрович ДОБРУШСКИЙ

**ПРОГРАММЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СВЯЗИ
МЕЖДУ ЭЛЕКТРОННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ
И ФАРАДЕЕВСКИМ ВРАЩЕНИЕМ В ИОНОСФЕРЕ
ПУТЕМ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОФИЛЕЙ
ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ (НА ЯЗЫКЕ ФОРТРАН)**

Подписано в печать 06 06 84г. МЦ 01292 Формат 60x84 1/16

Бумага многотельная. Печать офсетная. Объем 1,51 усл. печ. л.

Тираж 120. Заказ 3075. Бесплатно

Отпечатано на ротационной НИРФИ