

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
«МЭИ»**

**ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ**

**КАФЕДРА РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

**КУРСОВАЯ РАБОТА**

**по дисциплине**

**«АППАРАТУРА ПОТРЕБИТЕЛЕЙ СПУТНИКОВЫХ РАДИОНАВИГАЦИОННЫХ  
СИСТЕМ»**

**ФИО СТУДЕНТА: ТАСКАНОВ В.Е.**

**Группа: ЭР-15-16**

**ВАРИАНТ №: 13**

**Дата: \_\_\_\_\_**

**Подпись: \_\_\_\_\_**

**ФИО ПРЕПОДАВАТЕЛЯ: КОРОГОДИН И.В.**

**Оценка: \_\_\_\_\_**

**МОСКВА, 2021**

# СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ .....</b>	<b>3</b>
<b>ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОРОННИХ СРЕДСТВ .....</b>	<b>4</b>
1.1. Описание задания.....	4
1.2. Определение формы орбиты и положения спутника на ней с помощью сервиса CelesTrak.....	6
1.3. Расчет графика угла места собственного спутника от времени по данным Trimble GNSS Planning Online .....	7
1.4. Расчет диаграммы угла места и азимута спутника (SkyView, он же SkyPlot) по данным Trimble GNSS Planning Online .....	9
1.5. Формирование списка и описание параметров, входящих в состав эфемерид .....	12
1.6. Формирование таблицы эфемерид собственного спутника ....	13
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>15</b>

## ВВЕДЕНИЕ

Спутниковые радионавигационные системы (СРНС) являются самыми точными системами по определению координат потребителя. Они стали важной частью в различных сферах нашей жизни. Наиболее распространенными являются системы ГЛОНАСС (Россия), GPS (США), Galileo (Евросоюз), Beidou (Китай).

**Цель проекта** - добавление в программное обеспечение приемника функции расчета положения спутника Beidou на заданное время по данным его эфемерид.

Требования к разрабатываемому программному модулю:

- требования назначения;
- отсутствие утечек памяти;
- малое время выполнения;
- низкий расход памяти;
- корректное выполнение при аномальных входных данных.

Для достижения цели выполняется ряд задач, соответствующих этапам проекта и контрольным мероприятиям:

- обработка данных от приемника, работа со сторонними сервисами для подготовки входных и проверочных данных для разрабатываемого модуля;
- моделирование модуля в Matlab/Python;
- реализация программного модуля на C/C++, включая юнит-тестирование в Check.

Конечная цель всего курсового проекта - получить библиотеку функций на «C++», позволяющую рассчитывать положение спутника Beidou по его эфемеридам.

# ГЛАВА 1. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СТОРОННИХ СРЕДСТВ

## 1.1. Описание задания

В задание дан номер спутника BEIDOU, в моем варианте – C24, а также бинарный и текстовый файл со значениями эфемерид для различных спутников, полученный от трехдиапазонной антенны Harxon HX-CSX601A, установленной на крыше корпуса Е МЭИ. Она через 50-метровый кабель, сплиттер, bias-tee и усилитель подключена к трем навигационным приемникам:

- Javad Lexon LGDD,
- SwiftNavigation Piksi Multi,
- Clonicus разработки ЛИС МЭИ.

Эти приемники осуществляют первичную обработку сигналов Beidou B1I, выдавая по интерфейсам соответствующие потоки данных - наблюдения псевдодальностей и эфемериды спутников. Данные от приемника Clonicus, записанные вечером 16 февраля 2021 года.

Определим с помощью «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения» [1] номер НОРАД<sup>1</sup> и сравним его с номером из «Википедии» [2]:

---

<sup>1</sup> НОРАД(SCN) - номер по спутниковому каталогу представляет собой уникальный пятизначный идентификационный номер искусственных спутников Земли.

PRN	НОРАД	Тип КА	Тип системы	Дата запуска	Факт. сущ. (дней)	Примечание
C01	44231	GEO-8	BDS-2	17.05.19	653	Используется по ЦН
C02	38953	GEO-6	BDS-2	25.10.12	3048	Используется по ЦН
C03	41586	GEO-7	BDS-2	12.06.16	1722	Используется по ЦН
C04	37210	GEO-4	BDS-2	01.11.10	3772	Используется по ЦН
C05	38091	GEO-5	BDS-2	25.02.12	3291	Используется по ЦН
C06	36828	IGSO-1	BDS-2	01.08.10	3864	Используется по ЦН
C07	37256	IGSO-2	BDS-2	18.12.10	3725	Используется по ЦН
C08	37384	IGSO-3	BDS-2	10.04.11	3612	Используется по ЦН
C09	37763	IGSO-4	BDS-2	27.07.11	3504	Используется по ЦН
C10	37948	IGSO-5	BDS-2	02.12.11	3376	Используется по ЦН
C11	38250	MEO-3	BDS-2	30.04.12	3226	Используется по ЦН
C12	38251	MEO-4	BDS-2	30.04.12	3226	Используется по ЦН
C13	41434	IGSO-6	BDS-2	30.03.16	1796	Используется по ЦН
C14	38775	MEO-6	BDS-2	19.09.12	3084	Используется по ЦН
C16	43539	IGSO-7	BDS-2	10.07.18	964	Используется по ЦН
C19	43001	MEO-1	BDS-3	05.11.17	1211	Используется по ЦН
C20	43002	MEO-2	BDS-3	05.11.17	1211	Используется по ЦН
C21	43208	MEO-3	BDS-3	12.02.18	1112	Используется по ЦН
C22	43207	MEO-4	BDS-3	12.02.18	1112	Используется по ЦН
C23	43581	MEO-5	BDS-3	29.07.18	945	Используется по ЦН
C24	43582	MEO-6	BDS-3	29.07.18	945	Используется по ЦН

Рисунок 1 – Состав и состояние системы BEIDOU с «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения»

№	Спутник	PRN	Дата (UTC)	Ракета	NSSDC ID	SCN	Орбита	Статус	Система
33	Бэйдоу-3 M9	C23	29.07.2018 01:48	CZ-3B/YZ-1	2018-062A	43581	COO, ~21 500 км	действующий	Бэйдоу-3
34	Бэйдоу-3 M10	C24			2018-062B	43582	COO, ~21 500 км	действующий	
35	Бэйдоу-3 M11	C26	24.08.2018, 23:37	CZ-3B/YZ-1	2018-067A	43602	COO, ~21 500 км	действующий	
36	Бэйдоу-3 M12	C25			2018-067B	43603	COO, ~21 500 км	действующий	
37	Бэйдоу-3 M13	C32	19.09.2018, 14:07	CZ-3B/YZ-1	2018-072A	43622	COO, ~21 500 км	действующий	
38	Бэйдоу-3 M14	C33			2018-072B	43623	COO, ~21 500 км	действующий	
39	Бэйдоу-3 M15	C35	15.10.2018, 04:23	CZ-3B/YZ-1	2018-078A	43647	COO, ~21 500 км	действующий	
40	Бэйдоу-3 M16	C34			2018-078B	43648	COO, ~21 500 км	действующий	
41	Бэйдоу-3 G1Q	C59	01.11.2018, 15:57	CZ-3B/E	2018-085A	43683	ГСО, 144.5° в. д.	действующий	
42	Бэйдоу-3 M17	C36	18.11.2018, 17:49	CZ-3B/YZ-1	2018-093A	43706	COO, ~21 500 км	действующий	
43	Бэйдоу-3 M18	C37			2018-093B	43707	COO, ~21 500 км	действующий	
44	Бэйдоу-3 IGSO-1	C38	20.04.2019, 14:41	CZ-3B/G2	2019-023A	44204	Геосинхронная, накл. 55°;	действующий	

Рисунок 2 – Состав и состояние системы BEIDOU с сайта Википедия

Из рисунков 1-2 видно, что номер спутника совпадает и равен 43582, название спутника - «BEIDOU-3 M10»

## 1.2. Определение формы орбиты и положения спутника на ней с помощью сервиса CelesTrak

Зайдем на официальный сайт CelesTrak [3] и настроим данный сервис для определения формы орбита и положения 24-го спутника на ней

Введем наше название спутника и сверим его по номеру NSSDC ID<sup>2</sup> и НОРАД (SCN).

Значения совпадают, значит это действительно нужный нам спутник, проведем моделирование на момент времени 15:00, 16 февраля 2021, так как на данном сервисе отсчет времени происходит по UTC(0):

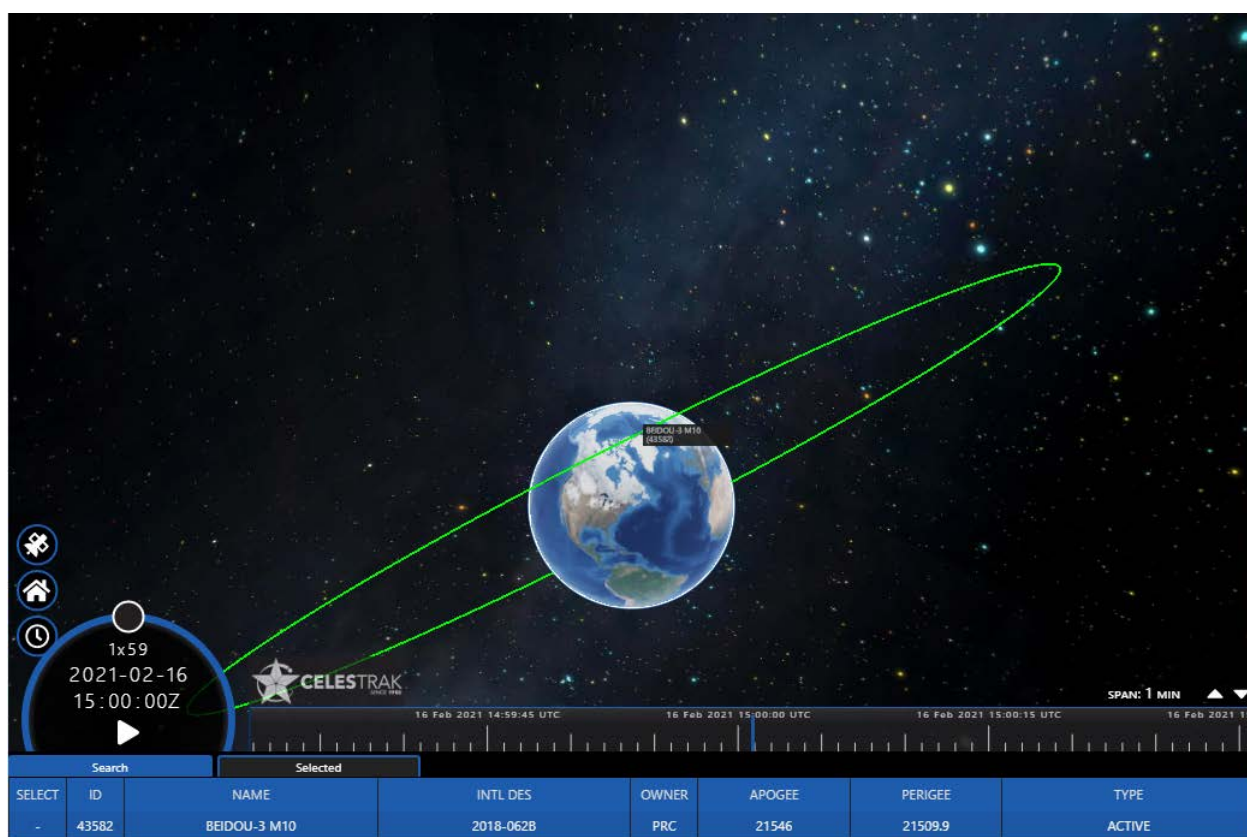


Рисунок 3 – Моделирование с помощью сервиса CelesTrak

<sup>2</sup> NSSDC ID - номер полёта представляет собой каталожный номер каждого летающего космического объекта, находящегося на орбите и зарегистрированного в COSPAR (Комитет по космическим исследованиям)

### 1.3. Расчет графика угла места собственного спутника от времени по данным Trimble GNSS Planning Online

Настроим для моделирования GNSS Planning Online [4], координаты установим в соответствии с расположением антенны – и они будут соответствовать значению корпуса Е МЭИ, также начальное время будет соответствовать 18:00, временной пояс будет равен +3 (UTC +3) на всем этапе моделирования в сервисе GNSS Planning Online, высота выбирается из суммы высоты над уровнем моря (146 м) и примерной высотой здания (25 м) и округляется до сотен:

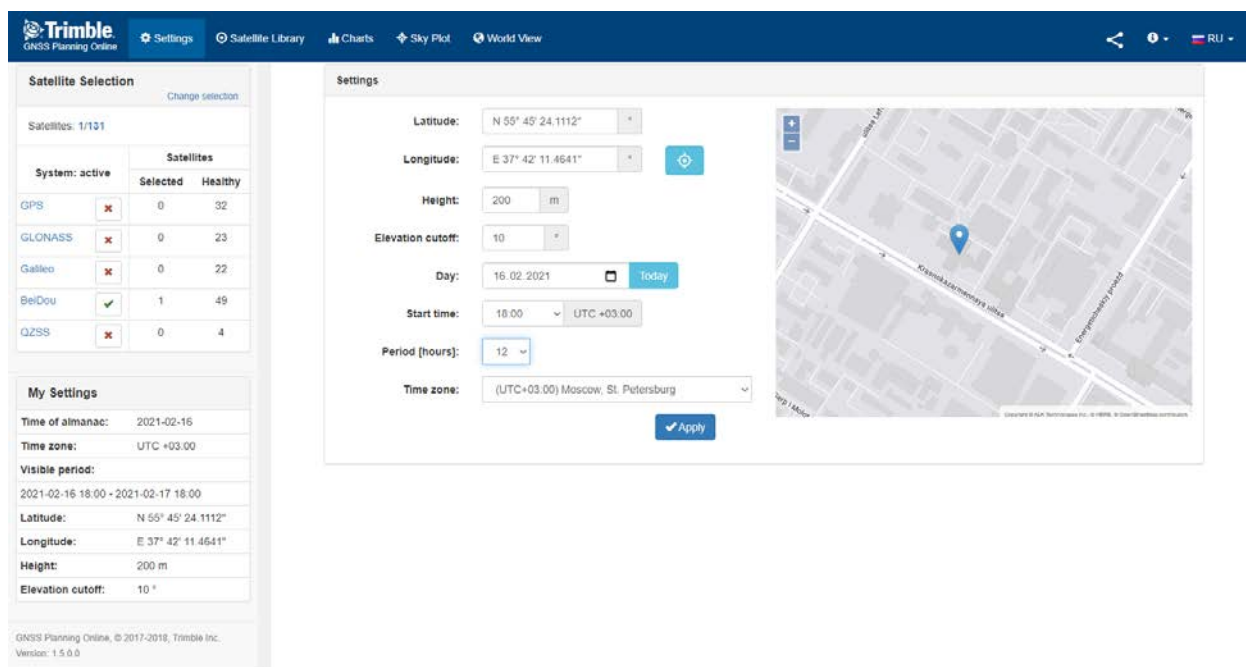


Рисунок 4 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

Далее ограничим количество отображаемых спутников и оставим в моделирование только нужны нам спутник – C24:

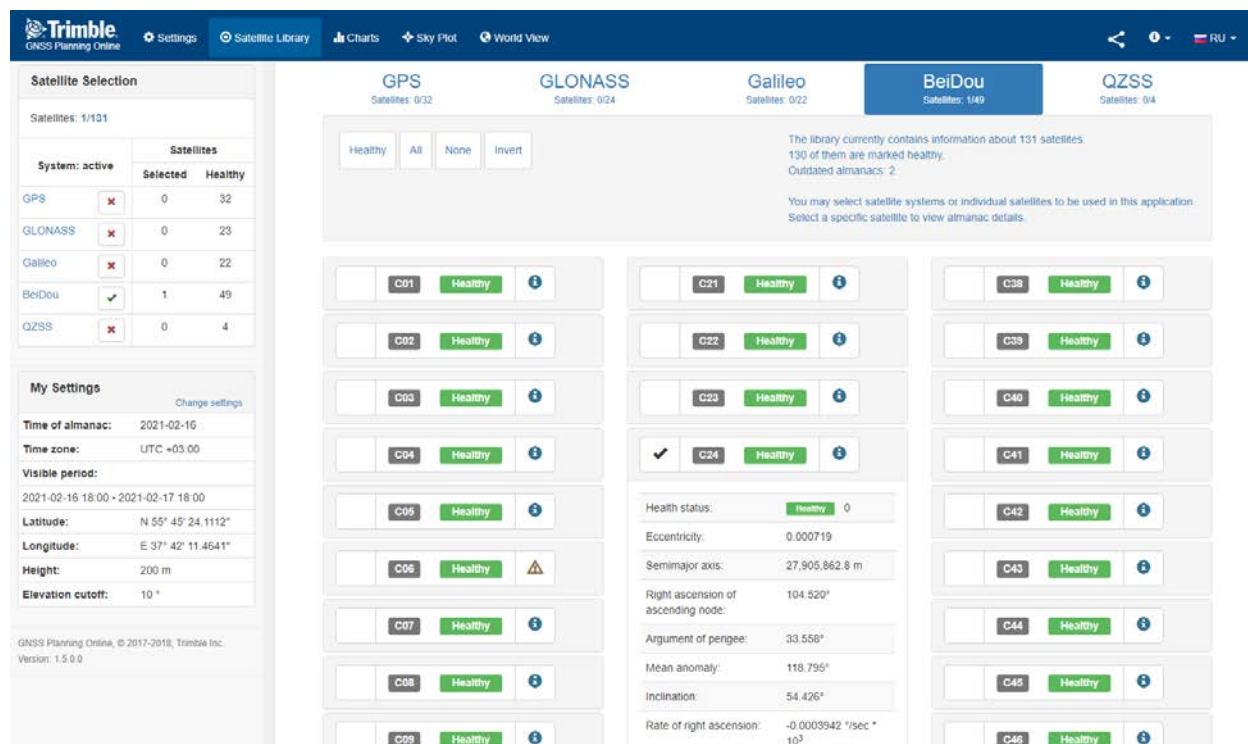


Рисунок 5 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

Получим график расчета угла места собственного спутника от времени:

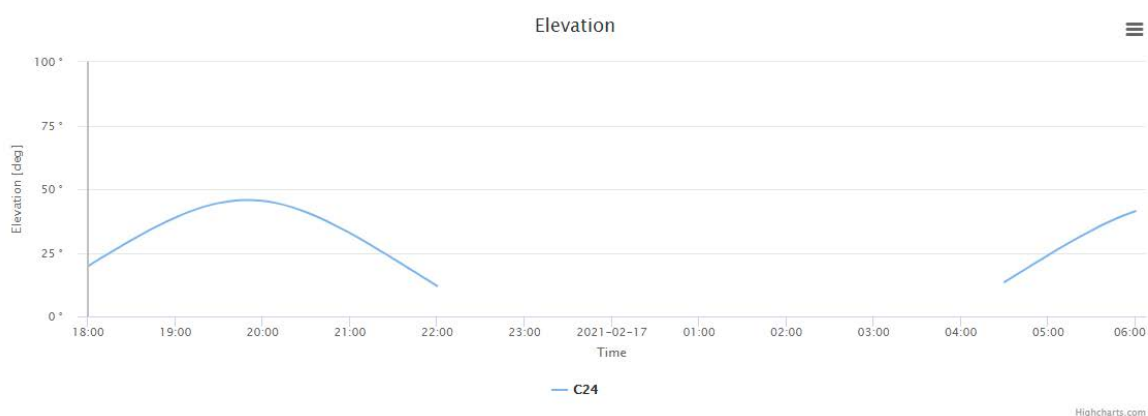


Рисунок 6 – График угла места собственного спутника от времени

По графику видно, что на указанном в задание интервале с 18:00 – 06:00, спутник был в области видимости 2 раза - с 18:00 до 22:00 и с 4:30 до 6:00.



#### 1.4. Расчет диаграммы угла места и азимута спутника (SkyView, он же SkyPlot) по данным Trimble GNSS Planning Online

Так как сервис для определения Sky Plot используется тот же - Trimble GNSS Planning Online, то настройки оставим прежние, и проведем моделирование Sky Plot во временном интервале 18:00-06:00 и зафиксируем положение спутника на небосводе в критических точках, то есть когда он находился в области видимости - в 18:00, 22:00, 4:30 и 6:00.

Тогда получим 4-е графика моделирования:

- 16 февраля 2021 в 18:00:

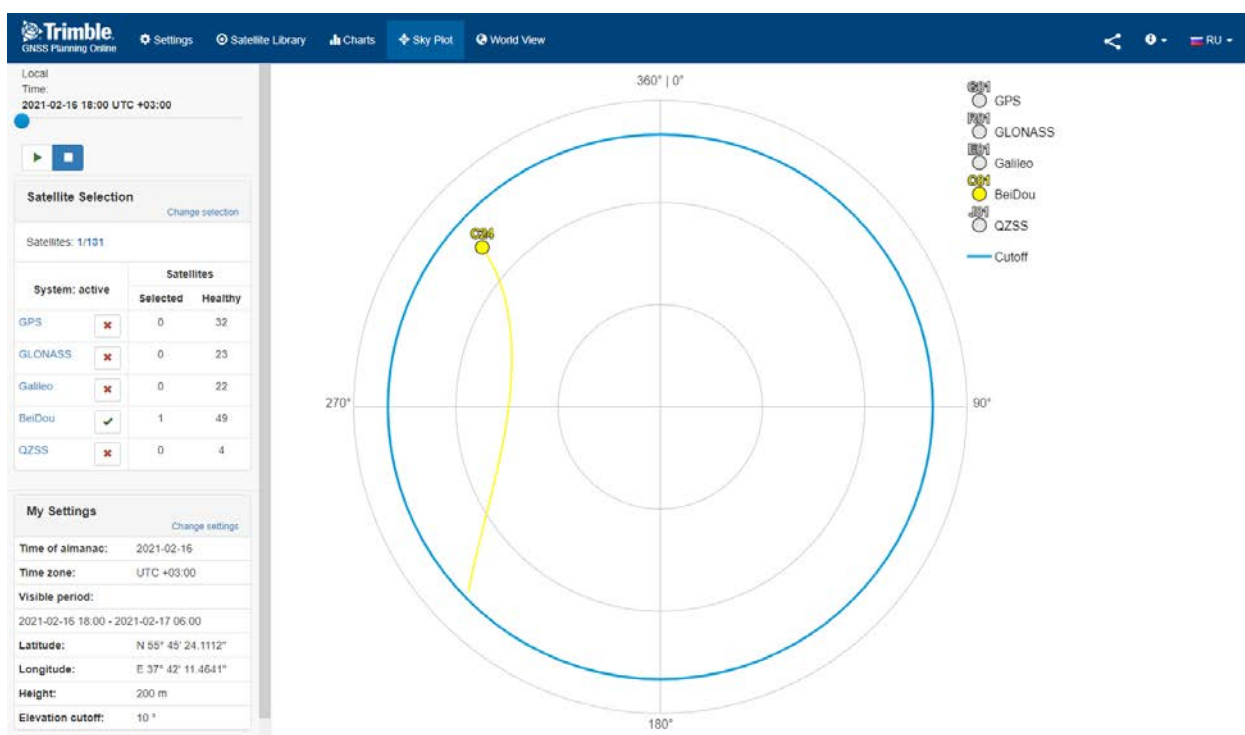


Рисунок 7 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

- 16 февраля 2021 в 22:00:

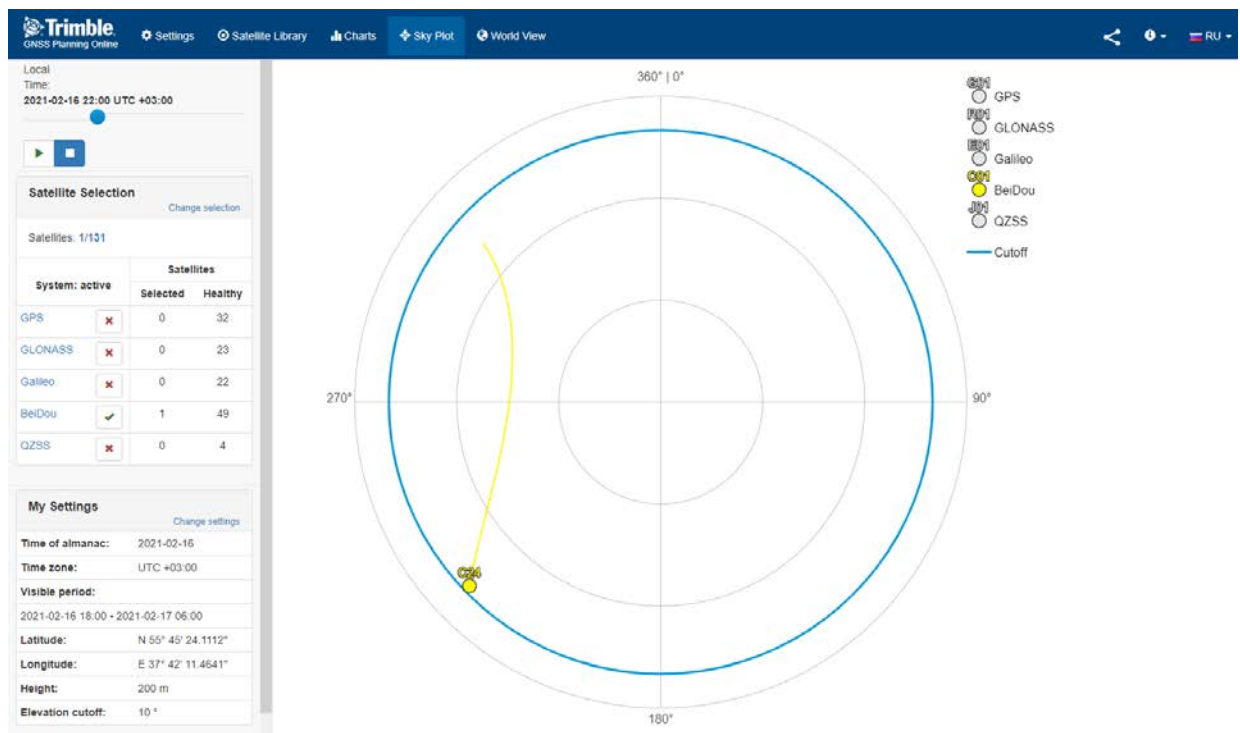


Рисунок 8 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

- 17 февраля 2021 в 4:30:

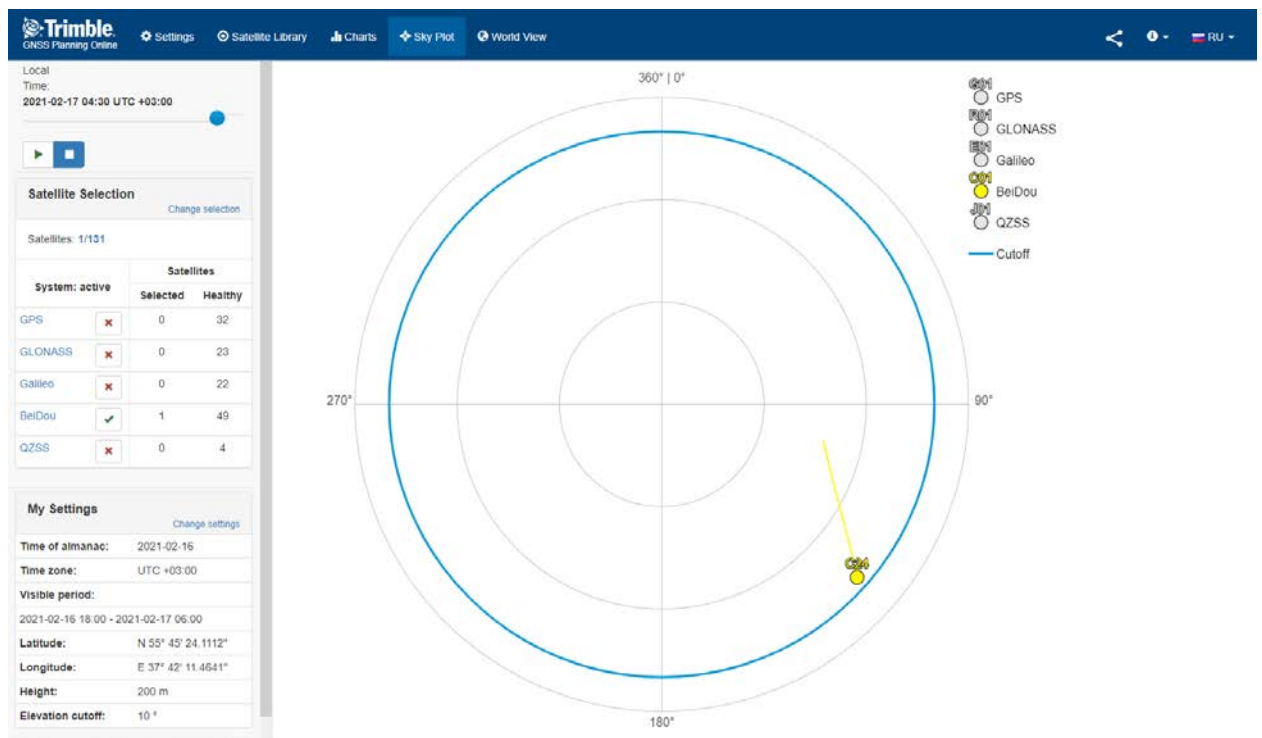


Рисунок 9 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

- 17 февраля 2021 в 6:00:

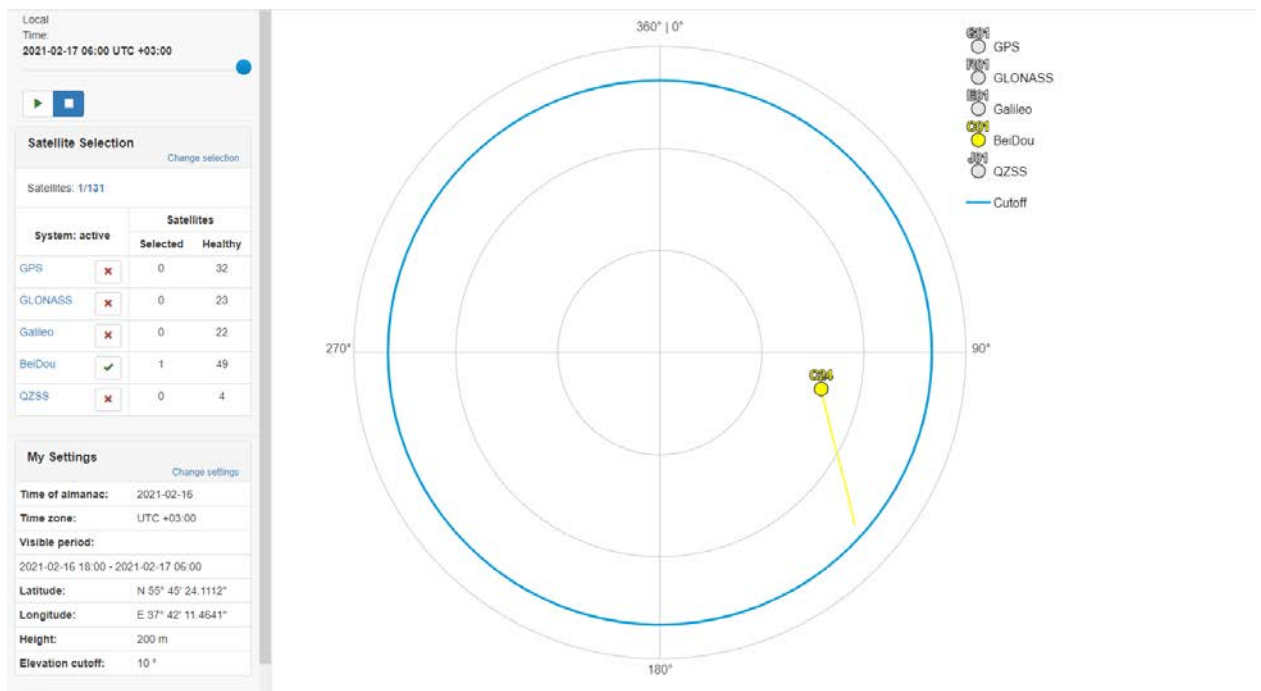


Рисунок 10 – Моделирование с помощью сервиса Trimble GNSS Planning

Для удобства наложим друг на друга полученные 4 графика - рисунок 7-10 и получим карту небосвода:

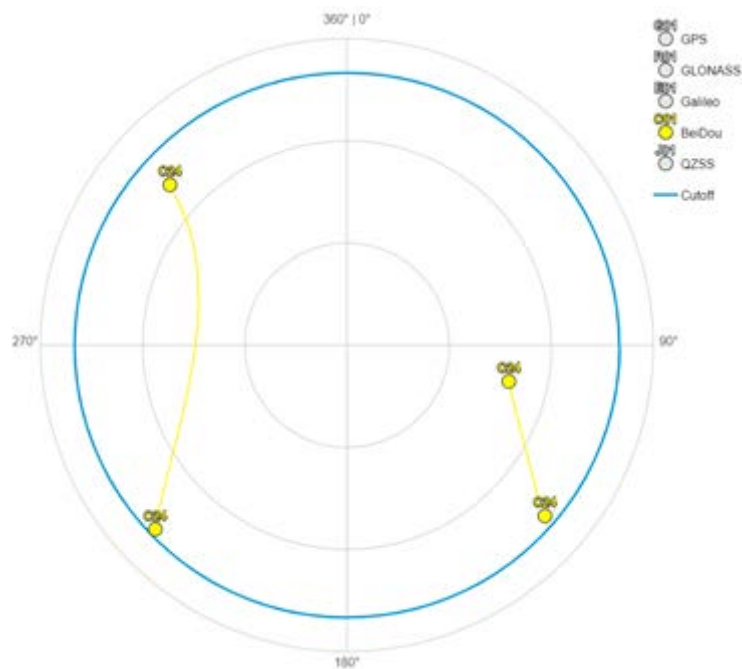


Рисунок 11 – Карта небосвода

# 1.5. Формирование списка и описание параметров, входящих в состав эфемерид

Таблица 1 – Описание параметров, входящих в состав эфемерид

Параметры	Определение
$t_{oe}$	Отсчет времени эфемерид
$\sqrt{A}$	Квадратный корень из большой полуоси орбиты
$e$	Эксцентриситет
$\omega$	Аргумент перигея
$\Delta n$	Среднее отклонение движения от расчетного значения
$M_0$	Средняя аномалия в исходное время
$\Omega_0$	Долгота восходящего узла орбитальной плоскости, вычисленная по опорному времени
$\dot{\Omega}$	Скорость прямого восхождения
$i_0$	Угол наклона в исходное время
$IDOT$	Скорость угла наклона
$C_{uc}$	Амплитуда косинусной поправки к аргументу широты
$C_{us}$	Амплитуда синусной поправки к аргументу широты
$C_{rc}$	Амплитуда косинусной поправки к радиусу орбиты
$C_{rs}$	Амплитуда синусной поправки к радиусу орбиты
$C_{ic}$	Амплитуда косинусной поправки к углу наклона
$C_{is}$	Амплитуда синусной поправки к углу наклона

## 1.6. Формирование таблицы эфемерид собственного спутника

Данные спутника берутся из текстового файла, полученного из дампа бинарного потока данных от приемника в формате NVS BINR.

Таблица 2 – Значения эфемерид спутника C24

Параметры	Значение	Размерность
SatNum	24	-
toe, $t_{oe}$	223200000.000	мс
Crs, $C_{rs}$	6.560937500000000000e+01	м
Dn, $\Delta n$	4.35125286496473862e-12	рад/мс
M0, $M_0$	1.40953592060026917e-01	рад
Cuc, $C_{uc}$	3.36393713951110840e-06	рад
e	7.20643904060125351e-04	-
Cus, $C_{us}$	5.78071922063827515e-06	рад
sqrtA, $\sqrt{A}$	5.28261434555053711e+03	м <sup>1/2</sup>
Cic, $C_{ic}$	2.32830643653869629e-09	рад
Omega0, $\Omega_0$	1.82433512285772315e+00	рад
Cis, $C_{is}$	-6.56582415103912354e-08	рад
i0, $i_0$	9.49918991207442720e-01	рад
Crc, $C_{rs}$	2.343906250000000000e+02	м
omega, $\omega$	5.72152208390331540e-01	рад
OmegaDot, $\dot{\Omega}$	-7.16708425211283236e-12	рад/мс
iDot, $\dot{I}$	1.51077721564943834e-13	рад/мс
Tgd, $T_{GD}$	7.00000000000000000e+04	мс
toc, $t_{oc}$	2.23200000000000000e+08	мс
af2, $a_{f2}$	0.00000000000000000e+00	мс/мс <sup>2</sup>

af1, $a_{f1}$	-8.33733082572507556e-12	MC/MC
af0, $a_{f0}$	-7.61786103248596191e-01	MC
URA	0	-
IODE	257	-
IODC	1	-
codeL2	0	-
L2P	0	-
WN	789	-

## ГЛАВА 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Моделирование проводится в программе Matlab. Код программы приведет в приложение 1.

Построим траектории движения спутника:

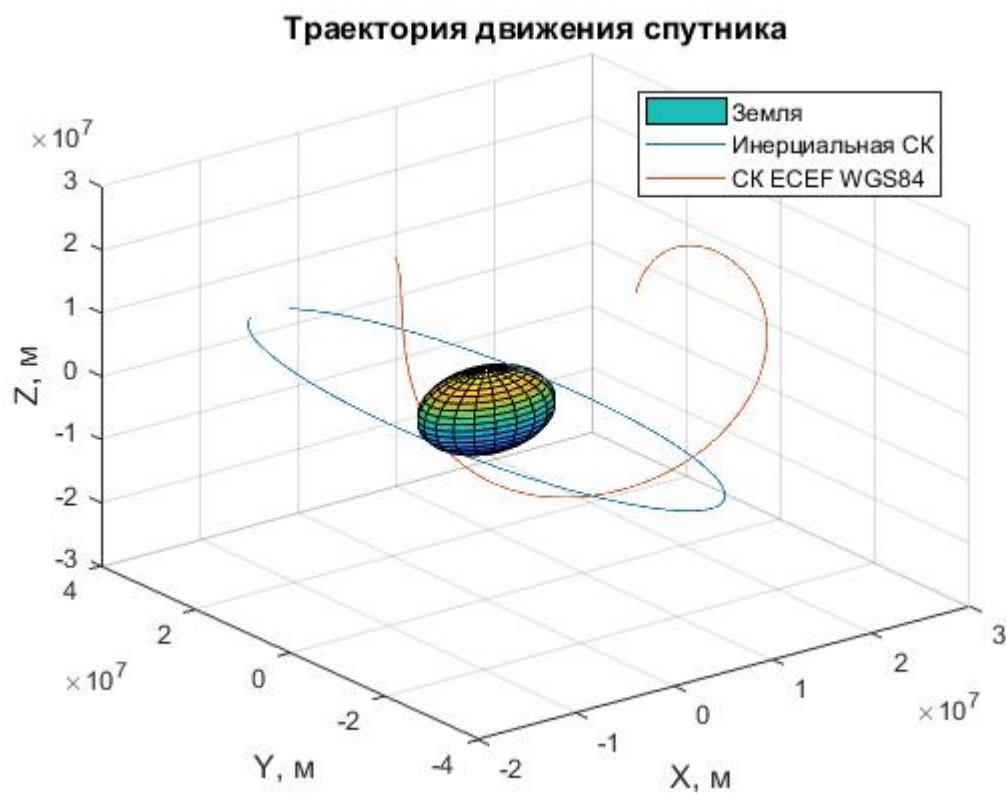


Рисунок 12 – Траектории движения спутника

Расчет графиков SkyView:

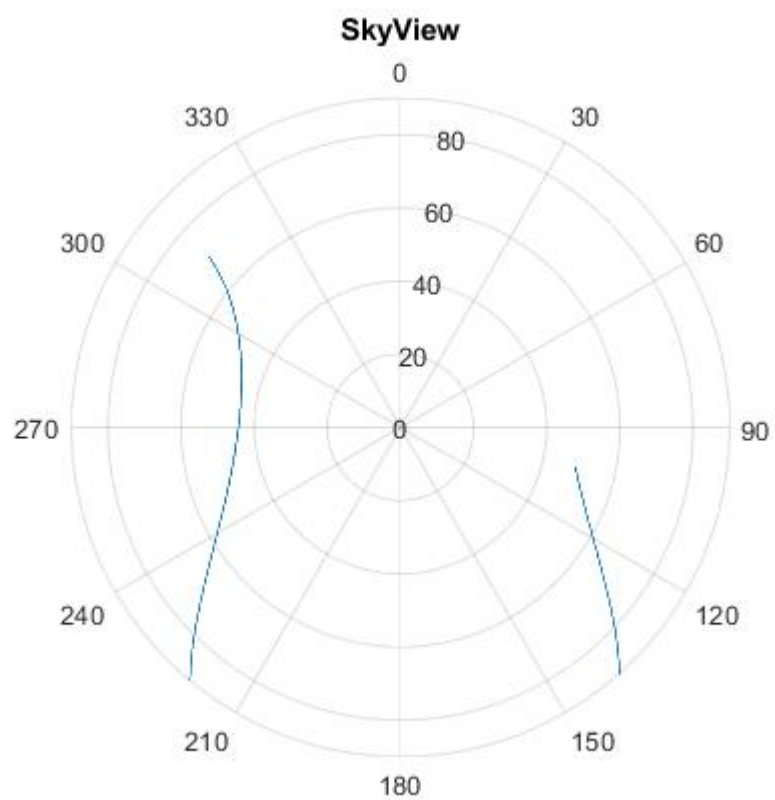


Рисунок 13 – SkyView



График угла места:

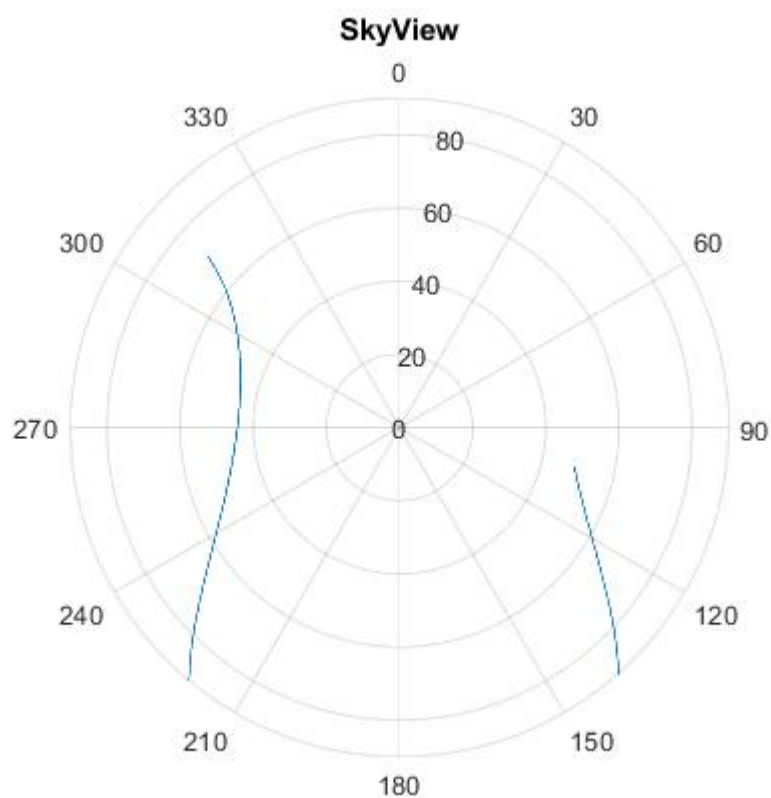


Рисунок 14 – График угла места

По рисункам 13-14 можно убедиться, что графики совпали с рассчитанными ранее на сайте «Trimble GNSS Planning Online», а значит моделирование выполнено верно.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- [1]. Электронный ресурс: «Информационно-аналитического центра координатно-временного и навигационного обеспечения «[www.glonass-iac.ru](http://www.glonass-iac.ru)»»
- [2]. Электронный ресурс: «Википедия. Свободная энциклопедия «<https://ru.wikipedia.org/wiki/Бэйдоу>»»
- [3]. Электронный ресурс: «<https://www.celstrak.com>»
- [4]. Электронный ресурс: «<https://www.gnssplanningonline.com/>»
- [5]. Электронный ресурс:  
«[https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS\\_and\\_Galileo\\_Satellite\\_Coordinates\\_Computation](https://gssc.esa.int/navipedia/index.php/GPS_and_Galileo_Satellite_Coordinates_Computation)»

# ПРИЛОЖЕНИЕ

## Приложение 1

*Calc.m*

```
clear all;
clc;
close all;
a=(5.28261434555053711e+03)^2;
toe = 223200000.000 * 10^-3; %ms
M0 =1.40953592060026917e-01 ;
dn = (4.35125286496473862e-12)/10^-3; %rad/ms
w= 5.72152208390331540e-01;
Cuc =5.78071922063827515e-06;
Crc =2.34390625000000000e+02;
Crs = 6.56093750000000000e+01;
Cic =2.32830643653869629e-09;
Cis =-6.56582415103912354e-08;
Cus =5.78071922063827515e-06;
i0 = 9.49918991207442720e-01;
IDOT =1.51077721564943834e-13;
Omega0 =1.82433512285772315e+00;
OmegaDot = -7.16708425211283236e-12;
e= 7.20643904060125351e-04;
n = 3.986004418e+14;
OMEGA_e = 7.2921151467*10^-5; %%
omegaE=OMEGA_e;%%
tstart = (24*2 + 18 - 3)*60*60;
tstop = (24*3 + 6 - 3)*60*60;
t_arr = tstart:1:tstop;
%
dt = 12*60*60;
for i = 1:length(t_arr)
coord(:, i) = CoordGPS(t_arr(i),toe, M0,e, n, a, dn,w, Cuc, Cus,
Crc, Crs,Cic, Cis,i0, IDOT, Omega0,OmegaDot, omegaE );
coord_eci_x(i)= coord(i).ECI(1);
coord_eci_y(i)=coord(i).ECI(2);
coord_eci_z(i) = coord(i).ECI(3);
coord_ecef_x(i) = coord(i).ECEF(1);
coord_ecef_y(i) = coord(i).ECEF(2);
coord_ecef_z(i) = coord(i).ECEF(3);
coord_eci(1,i) = coord(i).ECI(1);
coord_eci(2,i) = coord(i).ECI(2);
coord_eci(3,i) = coord(i).ECI(3);
coord_ecef(1,i) = coord(i).ECEF(1);
coord_ecef(2,i) = coord(i).ECEF(2);
coord_ecef(3,i) = coord(i).ECEF(3);
end
%
ppb = 1e-9;
mas = 1e-3/206264.8; % [pad]
MATRIX_WGS_84 = [-3*ppb -353*mas -4*mas;
353*mas -3*ppb 19*mas;
4*mas -19*mas -3*ppb];
crd_WGS_84 = [coord_ecef_x; coord_ecef_y; coord_ecef_z];
for i = 1:length(crd_WGS_84(1,:))
crd_WGS_84(:,i) = crd_WGS_84(:,i) + MATRIX_WGS_84 *
crd_WGS_84(:,i) + [0.07; -0; -0.77];
end
crd_WGS_84 = crd_WGS_84.'
```

```

figure (1)
E = wgs84Ellipsoid;
ellipsoid(0,0,0,E.SemimajorAxis, E.SemimajorAxis,
E.SemiminorAxis);
hold on;
plot3(coord_eci_x, coord_eci_y,coord_eci_z);
hold on;
plot3(crd_WGS_84(:,1), crd_WGS_84(:,2), crd_WGS_84(:,3))
title('Траектория движения спутника', 'FontSize',12)
xlabel('X, м', 'FontSize',12)
ylabel('Y, м', 'FontSize',12)
zlabel('Z, м', 'FontSize',12)
lgd = legend('Земля','Инерциальная СК','СК ECEF WGS84');
% Географические координаты корпуса Е и их перевод в систему
WGS-84
% Lantitude
N_gr = 55;
N_min = 45;
N_sec = 23.8178;
N = N_gr*pi/180 + N_min/3437.747 + N_sec/206264.8; % широта
[рад]
% Longitude
E_gr = 37;
E_min = 42;
E_sec = 12.2608;
E = E_gr*pi/180 + E_min/3437.747 + E_sec/206264.8; % долгота
[рад]
H = 200; % высота [м]
llh = [N E H];
crd_PRM = llh2xyz(llh)';
% Построение SkyPlot
for i = 1:length(crd_WGS_84(:,1))
    [X(i) Y(i) Z(i)] =
ecf2enu(crd_WGS_84(i,1),crd_WGS_84(i,2),crd_WGS_84(i,3),N,E,H,w
gs84Ellipsoid,'radians');
    if Z(i) > 0
        r(i) = sqrt(X(i)^2 + Y(i)^2 + Z(i)^2);
        teta(i) = acos(Z(i)/r(i));
        if X(i) > 0
            phi(i) = -atan(Y(i)/X(i))+pi/2;
        elseif (X(i)<0)&&(Y(i)>0)
            phi(i) = -atan(Y(i)/X(i))+3*pi/2;
        elseif (X(i)<0)&&(Y(i)<0)
            phi(i) = -atan(Y(i)/X(i))-pi/2;
        end
    else teta(i) = NaN;
        r(i) = NaN;
        phi(i) = NaN;
    end
end
% Skyplot
figure (2)
ax = polaraxes;
polarplot(ax,phi,teta*180/pi)
ax.ThetaDir = 'clockwise';
ax.ThetaZeroLocation = 'top';
title('SkyView')
% Угол места
th = hours(t_arr/60/60 - 2*24+3); % Перевод временной оси в
формат hh:mm:ss
figure (3)
grid on
hold on

```

```

plot(th,(-teta)*180/pi+90,'DurationTickFormat','hh:mm:ss')
xlim([th(1) th(end)])
title('Угол места', 'FontSize',12)
xlabel('Время в UTC', 'FontSize',12)
ylabel('Угол места, град', 'FontSize',12)

```

## *CoordGPS.m*

```

function coord = CoordGPS(t,toe, M0,e, n, a, dn,w, Cuc, Cus,
Crc, Crs,Cic, Cis,i0, IDOT, Omega0,OmegaDot, omegaE )
tk = t-toe;
if tk>302400
    tk = tk-604800;
else if tk < -302400
    tk = tk + 604800;
end
end
Mk = M0+( (sqrt(n/(a^3))) + dn)*tk;
Ekold =0;
Ek = e*sin(0)+Mk;
while (abs(Ek-Ekold)> 10^-9)
    Ekold = Ek;
    Ek = Mk+e*sin(Ek);
end
vk = atan2( (sqrt(1-e^2))*sin(Ek) , cos(Ek)-e );
uk = w+ vk + Cuc*cos(2*(w+vk))+Cus*sin(2*(w+vk));
rk = (a*(1-e*cos(Ek))+Crc*cos(2*(w+vk))+Crs*sin(2*(w+vk)));
ik = i0 + IDOT*tk+ Cic*cos(2*(w+vk))+Cis*sin(2*(w+vk));
lymbdak_ECEF = Omega0 + (OmegaDot - omegaE)*tk-omegaE*toe;
%%%
lymbdak_ECI = Omega0 + OmegaDot*tk ;
%
R1 = [1 0 0;
      0 cos(-ik) sin(-ik);
      0 -sin(-ik) cos(-ik)];
R3l_ECEF = [cos(-lymbdak_ECEF) sin(-lymbdak_ECEF) 0;
            -sin(-lymbdak_ECEF) cos(-lymbdak_ECEF) 0;
            0 0 1];

R3uk = [cos(-uk) sin(-uk) 0;
        -sin(-uk) cos(-uk) 0;
        0 0 1];

coord.ECEF = R3l_ECEF*R1*R3uk* [rk;0;0];
%
R3l_ECEF = [cos(-lymbdak_ECI) sin(-lymbdak_ECI) 0;
            -sin(-lymbdak_ECI) cos(-lymbdak_ECI) 0;
            0 0 1];

coord.ECI = R3l_ECEF*R1*R3uk* [rk;0;0];
end

```