

Спутниковая радионавигационная система ГЛОНАСС

Октябрь 1982 г. - запущен первый навигационный спутник «Космос-1413»

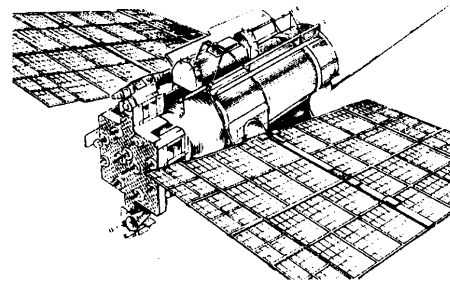
1995 г - завершено развертывание системы запуском 24-го спутника – навигационного космического аппарата (НКА).

Параметры орбит

Три орбитальные плоскости, разнесенные на 120°. Высота круговых орбит -19100 км.
Наклонение орбит – 64.8°. Узлы положения НКА в каждой плоскости разнесены на 45°. Номинальный период обращения НКА – 11 ч. 15 мин. 44 с.

Состояние орбитальной группировки ГЛОНАСС на 5 сентября 2016 г.

№ точки	№ пл.	№ лит.	НКУ	Дата запуска	Дата ввода в систему	Дата вывода из системы	Факт. суц. (мес.)	Пригодность КА по сообщениям		Примечание
								альманаха	эфемерид (UTC)	
1	1	01	730	14.12.09	30.01.10		80.8	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
2	1	-4	747	26.04.13	04.07.13		40.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
3	1	05	744	04.11.11	08.12.11		58.1	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
4	1	06	742	02.10.11	25.10.11		59.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
5	1	01	734	14.12.09	10.01.10		80.8	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
6	1	-4	733	14.12.09	24.01.10		80.8	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
7	1	05	745	04.11.11	18.12.11		58.1	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
8	1	06	743	04.11.11	20.09.12		58.1	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
9	2	-6	702	01.12.14	15.02.16		21.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
10	2	-7	717	25.12.06	03.04.07		116.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
11	2	00	753	29.05.16	27.06.16		3.3	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
12	2	-1	737	02.09.10	12.10.10		72.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
13	2	-2	721	25.12.07	08.02.08		104.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
14	2	-7	715	25.12.06	03.04.07		116.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
15	2	00	716	25.12.06	12.10.07		116.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
16	2	-1	736	02.09.10	04.10.10		72.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
17	3	04	751	07.02.16	28.02.16		6.9	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
18	3	-3	754	24.03.14	14.04.14		29.5	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
19	3	03	720	26.10.07	25.11.07		106.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
20	3	02	719	26.10.07	27.11.07		106.4	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
21	3	04	755	14.06.14	03.08.14		26.8	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
22	3	-3	731	02.03.10	28.03.10		78.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
23	3	03	732	02.03.10	28.03.10		78.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
24	3	02	735	02.03.10	28.03.10		78.2	+	+ 21:28 05.09.16	Использ. по ЦН
20	3	-5	701	26.02.11			66.3			На этапе ЛИ
11	2		723	25.12.07	22.01.08	24.06.16	104.4			Резерв
17	3		714	25.12.05	31.08.06	24.02.16	128.4			Резерв



НКА ГЛОНАСС

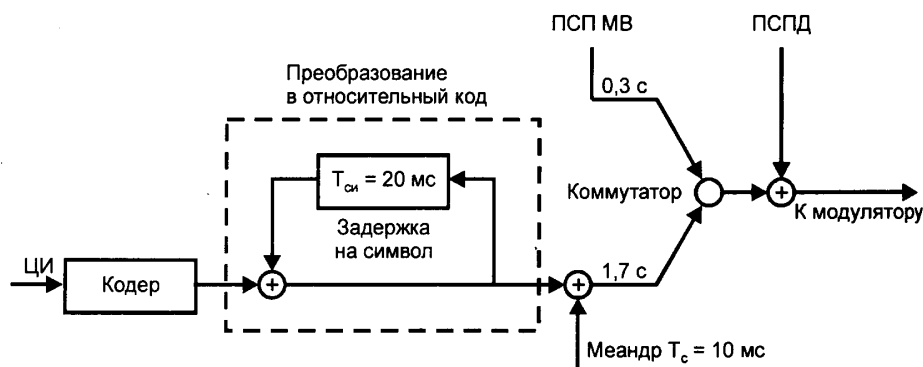
Навигационные сигналы

Диапазон L1. $f_{1,k} = f_{1,0} + k \cdot \Delta f_1$; $f_{1,0} = 1602$ МГц, $\Delta f_1 = 0.5625$ МГц, $k = 1, 2, \dots, 12$

Диапазон L2. $f_{2,k} = f_{2,0} + k \cdot \Delta f_1$; $f_{2,0} = 1246$ МГц, $\Delta f_1 = 0.4375$ МГц, $f_{1,k}/f_{2,k} = 9/7$.

Сигнал L1 – двухкомпонентный: синфазная компонента – узкополосный ($\Delta F = 1.022$ МГц), квадратурная компонента – широкополосный ($\Delta F = 10.22$ МГц).

Сигнал L2 – однокомпонентный: только широкополосная компонента (в НКА второй модификации будет добавлена узкополосная компонента).



Формирование модулирующей последовательности

Узкополосный радиосигнал L1 есть сумма по модулю 2 трех сигналов:

- 1) псевдослучайная M-последовательность дальномерного кода длиной 511 дискрет, соответствующая характеристическому полиному $G_d(x) = 1 + x^5 + x^9$, передаваемая со скоростью 511 кбит/с (период дискретизации – 1 мс) - код низкой точности
- 2) цифровая информация (ЦИ) – навигационное сообщение, передаваемая со скоростью 50 бит/с, состоящее из 85 двоичных символов общей продолжительностью 1.7 с
- 3) меандр, используемый для символьной синхронизации, с частотой 100 бит/с.

Метки времени (МВ) – M-последовательности длиной 30 дискрет длительностью 10 мс с характеристическим полиномом $G_d(x) = 1 + x^3 + x^5$. Длительность МВ – $10 \text{ мс} \times 30 = 0.3 \text{ с}$. С помощью МВ осуществляется строчная и символьная синхронизация ЦИ.

Широкополосный радиосигнал L1 – сумма по модулю 2 M-последовательности с очень большим периодом и частотой следования дискрет 5.11 МГц – дальномерный код высокой точности – и цифровой навигационной информации.

Широкополосный радиосигнал L2 – сигнал, промодулированный такой же M-последовательностью без добавления ЦИ.

Узкополосный сигнал – открытый и предназначен для гражданских потребителей.

Широкополосный сигнал предназначен для санкционированных потребителей. Параметры его кодирования являются закрытой информацией

Диаграмма направленности передатчика НКА направлена вертикально вниз, имеет ширину 38° и захватывает всю поверхность полушария Земли и приземное пространство высотой до 2000 км. Номинальная мощность навигационного радиосигнала, принимаемого наземным потребителем на всенаправленную антенну составляет от - 57 до - 161 дБВт.

Навигационное сообщение

ЦИ формируется на основе данных, передаваемых на борт НКА наземным комплексом управления (НКУ), и состоит из строк, кадров и суперкадров.

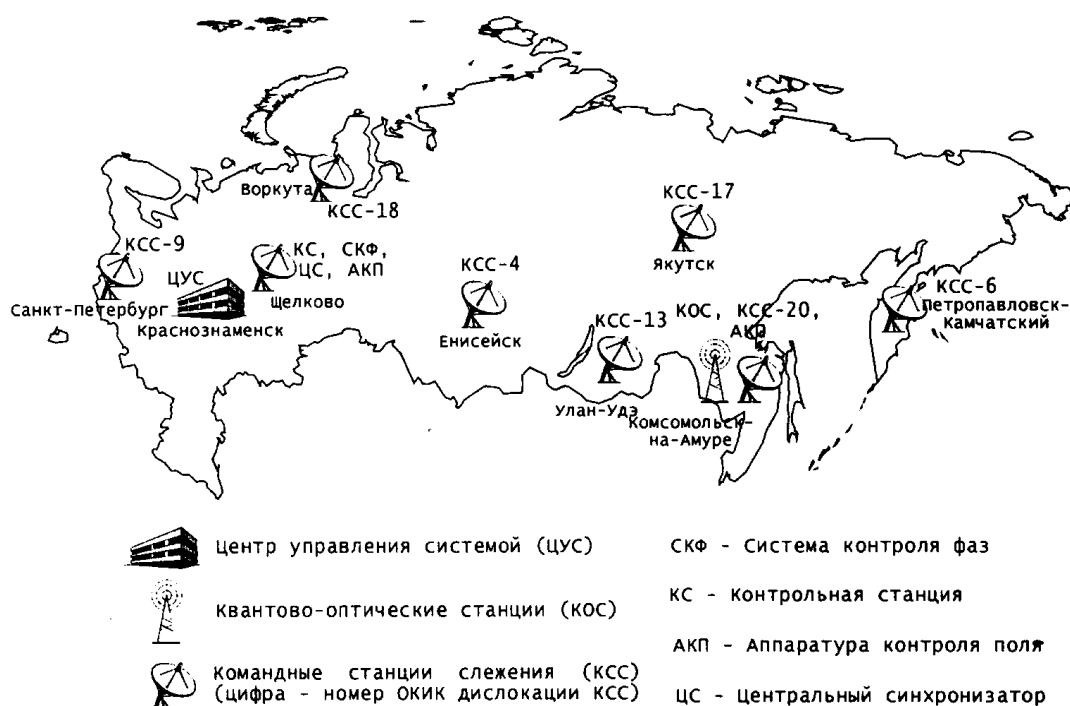
Строка ЦИ состоит из 85 символов общей длительностью 2 с, передаваемых в относительном двоичном коде. Последние 8 символов – проверочные, позволяющие исправить одиночный ошибочный символ и обнаружить две ошибки в строке. Кадр состоит из 15 строк (30 с), суперкадр – 5 кадров (2.5 мин).

В составе каждого кадра передается полный объем оперативной информации и часть альманаха. Полный альманах передается в пределах суперкадра.

Оперативная информация содержит: 1) признаки достоверности ЦИ в кадре, 2) время начала кадра t_k , 3) эфемеридную информацию (ЭИ) – координаты и производные координат НКА в прямоугольной геоцентрической системе координат на момент времени t_0 , 4) частотно-временные поправки на момент времени t_0 (поправки к несущей частоте радиосигнала и бортовой шкале времени – БШВ). Время t_0 привязки ЭИ и БШВ кратно 30 мин с начала суток.

Альманах системы содержит информацию о всех штатных НКА орбитальной группировки: 1) время последнего обновления альманаха, 2) параметры орбит каждого НКА, 3) номер пары несущих частот и поправки к несущей частоте, 4) поправки к БШВ каждого НКА. Альманах необходим для планирования сеанса навигации (выбора наиболее подходящего созвездия НКА и определения доплеровских поправок к несущей частоте для ускорения поиска и захвата сигнала).

Наземный комплекс управления



Наземный комплекс управления ГЛОНАСС

НКУ обеспечивает: 1) эфемеридное и частотно-временное обеспечение НКА, 2) мониторинг радионавигационного поля, 3) радиотелеметрический мониторинг НКА, 4) командное и программное управление функционированием НКА.

Принципы определения координат потребителя

По временным задержкам дальномерных псевдошумовых сигналов T_i определяется время распространения радиосигнала от i -го НКА до потребителя и рассчитываются псевдодальности (ПД) $D_i = cT_i$. Предварительно проводится компенсация тропосферных и ионосферных ошибок. Тропосферная поправка находится по формуле:

$$\Delta D_{Ti} = 8.8 \operatorname{cosec}(\beta_i), \text{ где } \beta_i - \text{угол возвышения (угол места) } i\text{-го НКА.}$$

Компенсация ионосферной ошибки в двухчастотной (L1 и L2) дальномерной аппаратуре осуществляется на основе зависимости этой ошибки от квадрата несущей частоты:

$$\Delta D_{Ii} = k/f^2, \text{ где } k - \text{коэффициент пропорциональности.}$$

Тогда уточненное значение псевдодальности

$$D = \frac{D_1 - \gamma D_2}{1 - \gamma},$$

где $\gamma = (f_2 / f_1)^2 = (7/9)^2$, f_1, f_2 – частоты диапазонов L1 и L2, D_1 и D_2 – ПД, измеренные на этих частотах.

Определенные таким образом псевдодальности могут быть записаны в виде

$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT + \delta D_i,$$

где (X, Y, Z) – прямоугольные координаты определяемого объекта в геоцентрической системе координат, (X_i, Y_i, Z_i) – такие же координаты i -го НКА (определяются из навигационного сообщения);

T – расхождение шкал времени НКА и потребителя (одинаковое для всех НКА),

δD_i – погрешности определения псевдодальностей.

Для определения X, Y, Z и T решается система как минимум из 4-х уравнений

$$D_i = \sqrt{(X - X_i)^2 + (Y - Y_i)^2 + (Z - Z_i)^2} + cT + \delta D_i, \quad i = 1, 2, \dots, N$$

N – количество НКА, участвующих в измерениях.

Обычно в поле видимости потребителя находится от 5 до 8 НКА. При решении системы из $N > 4$ уравнений с 4-я неизвестными используется итеративный метод взвешенных наименьших квадратов

$$\eta_k = \eta_{k-1} + (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} (D_{\text{изм}} - D_{k-1}),$$

где $\eta_k = (X, Y, Z, T)$, $D_{\text{изм}} = (D_1, \dots, D_N)$ – вектор измеренных псевдодальностей,

H – матрица составленная из частных производных $\frac{\partial D}{\partial \eta}$, R – ковариационная матрица

ошибок измерения, учитывающая неравноточность некоторых измерений.

Для перехода от прямоугольных геоцентрических координат X, Y, Z к геодезическим координатам B – широта, L – долгота, h – высота над поверхностью эллипсоида Земли необходимо решить нелинейную систему уравнений

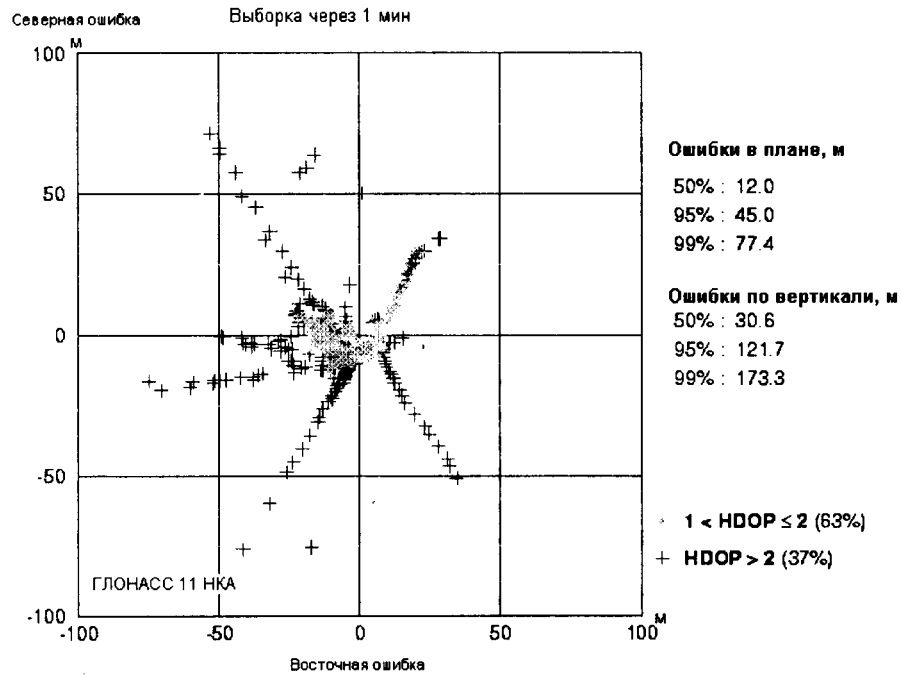
$$\begin{cases} X = (N + h) \cos B \cos L, \\ Y = (N + h) \cos B \sin L, \\ Z = [(1 - \varepsilon^2) N + h] \sin B, \end{cases}$$

где $N = a (1 - \varepsilon^2 \sin^2 B)^{-1/2}$, $\varepsilon^2 = 2\alpha - \alpha^2$,

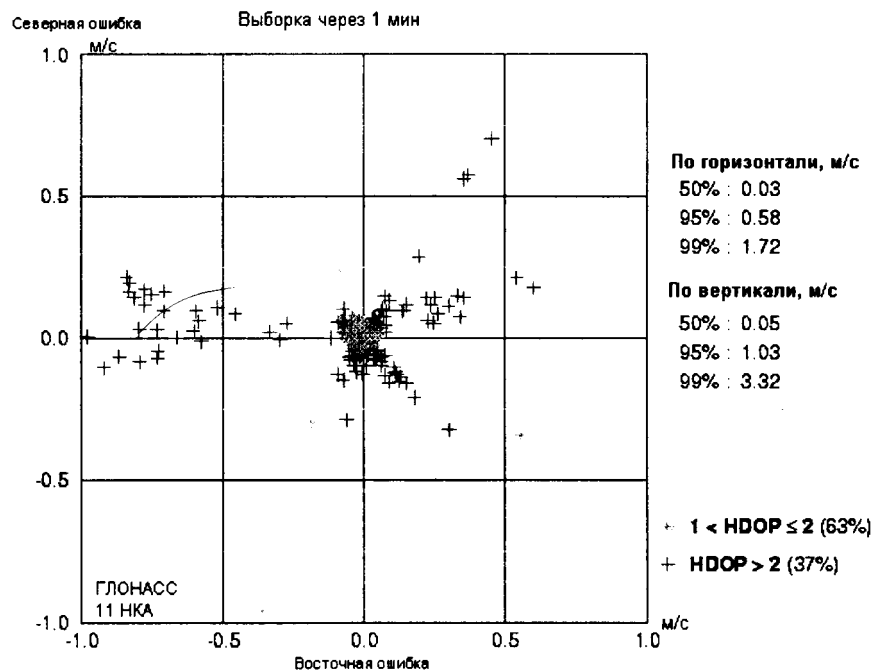
$a = 6378245$ м – большая ось эллипсоида,

$\alpha = 1/298.3$ – относительное сжатие Земли.

Точностные характеристики ГЛОНАСС



Ошибки местоопределения по системе ГЛОНАСС



Ошибки определения скорости по системе ГЛОНАСС

Спутниковая радионавигационная система GPS

Первые 4 НКА Блок-I запущены в 1978 г. К 1995 г. система полностью развернута. В настоящее время в системе 29-30 НКА Блок II-A, Блок II-R и Блок II-M

Параметры орбит

Шесть орбитальных плоскостей А, В,... F, разнесенных на 60°. Высота круговых орбит - 20180 км. Наклонение орбит – 55°. Номинальный период обращения НКА – 12 ч.

Состояние орбитальной группировки GPS на 5 сентября 2016 г.

№ пл.	№ точки	ПСП	Номер NORAD	Тип КА	Дата запуска	Дата ввода в систему	Дата вывода из системы	Факт. суц. (мес)	Примечания
А	2	31	29486	II-R-M	25.09.06	13.10.06		118.8	
	4	7	32711	II-R-M	15.03.08	24.03.08		101.5	
	5	24	38833	II-F	04.10.12	14.11.12		45.7	
	6	30	39533	II-F	21.02.14	30.05.14		27.3	
	1	16	27663	II-R	29.01.03	18.02.03		162.7	
В	2	25	36585	II-F	28.05.10	27.08.10		72.4	
	3	28	26407	II-R	16.07.00	17.08.00		192.8	
	4	12	29601	II-R-M	17.11.06	13.12.06		116.8	
	5	26	40534	II-F	25.03.15	20.04.15		16.6	
	6		34661	II-R-M	24.03.09				
С	1	29	32384	II-R-M	20.12.07	02.01.08		104.2	
	2	27	39166	II-F	15.05.13	21.06.13		38.5	
	3	19	28190	II-R	20.03.04	05.04.04		149.1	
	4	17	28874	II-R-M	26.09.05	13.11.05		129.8	
	5	8	40730	II-F	15.07.15	12.08.15		12.8	
D	1	2	28474	II-R	06.11.04	22.11.04		141.5	
	2	1	37753	II-F	16.07.11	14.10.11		58.8	
	3	21	27704	II-R	31.03.03	12.04.03		160.9	
	5	11	25933	II-R	07.10.99	03.01.00		200.2	
	6	6	39741	II-F	17.05.14	10.06.14		26.9	
E	1	20	26360	II-R	11.05.00	01.06.00		195.3	
	2	22	28129	II-R	21.12.03	12.01.04		151.9	
	3	5	35752	II-R-M	17.08.09	27.08.09		84.4	
	4	18	26690	II-R	30.01.01	15.02.01		186.8	
	6	10	41019	II-F	30.10.15	09.12.15		8.9	
F	1	3	40294	II-F	29.10.14	12.12.14		20.8	
	1	14	26605	II-R	10.11.00	10.12.00		189.0	
	2	15	32260	II-R-M	17.10.07	31.10.07		106.3	
	3	13	24876	II-R	23.07.97	31.01.98		223.3	
	4	23	28361	II-R	23.06.04	09.07.04		146.0	
	5	32	41328	II-F	05.02.16	09.03.16		5.9	
6	9	40105	II-F	02.08.14	17.09.14		23.6		

Навигационные сигналы

Сигнал L1 - двухкомпонентный (две квадратурных фазоманипулированных составляющих) на несущей 1575.42 МГц. Первая компонента – дальномерный P-код, сложенный по модулю 2 с информационным сигналом. Вторая – сумма по модулю 2 дальномерного C/A-кода и информационного сигнала.

Сигнал L2 - однокомпонентный на несущей 1227.6 МГц, промодулирован суммой P-кода или C/A-кода с информационной последовательностью

C/A-код (Clear или Coarse/Acquisition) – легкий (грубый) захват – ПСП длиной 1023 дискрета, частота передачи – 1.023 МГц, период 1 мс.

P-код - Precise code – дальномерный код высокой точности, куски длиной 7 суток из ПСП с периодом 267 суток, частота передачи 10.23 МГц.

P(Y) – закрытый код для военного применения, будет использоваться вместо P-кода в особых ситуациях.

Для сигнала C/A предусмотрен режим селективного доступа Selective Availability (S/A), в котором для гражданских потребителей вводятся случайные ошибки, снижающие точность местоопределения до 100 м.

Все НКА излучают сигналы на одной и той же паре несущих частот, но используют свой собственный код модуляции, обеспечивающий надежное разделение сигналов разных НКА.

Таблица Содержание блоков (форматов) данных

Номер блока (формата)	Содержание	Номер субкадра в кадре	Номер страницы в суперкадре
1	Временные поправки, поправки для двухчастотной ионосферной коррекции	1	-
2	Эфемериды	2	-
3	Эфемериды	3	-
4	Альманах	5	1-24
5	Признаки работоспособности НКА	5	25
6	Резервное сообщение	4	1, 6,11 ,16 &21
7	Резервное сообщение	4	12, 19, 20, 22, 23&24
8	Параметры UTC ионосферной модели	4	18
9	Признаки A/S и работоспособности НКА	4	25
10	Службное сообщение	4	13
11	Резервное сообщение	4	14, 15&17

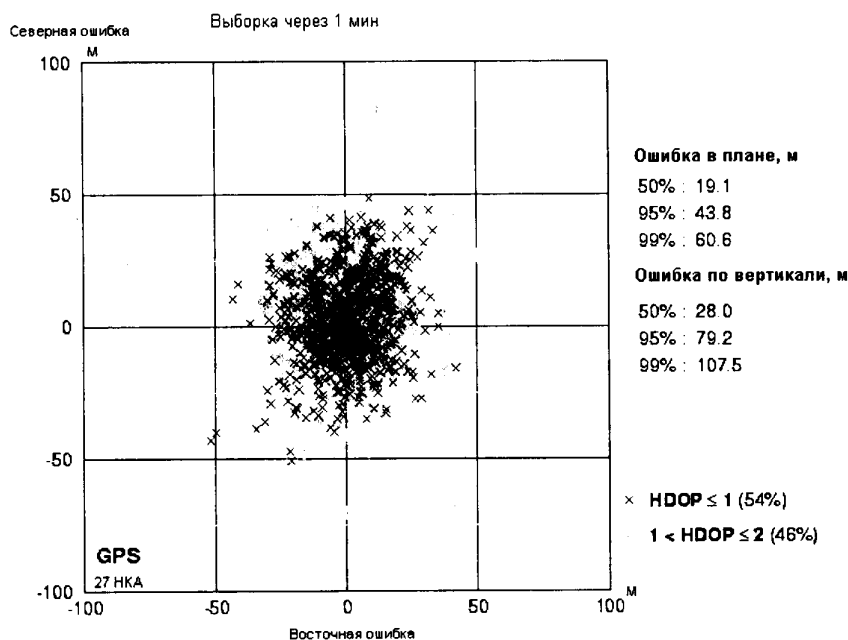
Таблица SKO источников ошибок определения псевдодальности, м

Источники ошибок	C/A-код	P-код
Селективного доступа	24	0/0
Ионосфера	7	0,01*/2,25**
Тропосфера	0,7	0,7/1,95
Многолучевость	1,2	1,8/1,2
Шумы приемника	1,5	0,6/1,45
Погрешности координатно-временного обеспечения НКА	3,6	3,6/5,4
Общая	25,3/8,1 (без СД)	4,1/6,5

*) и **) – представляют данные из разных источников

Таблица Характеристики ошибок определения параметров

Параметр	Р-код,	С/А-код,	Р-код,	С/А-код,	Р-код,	С/А-код,
	50%	50%	65...68%	65...68%	95%	95%
Местоопределение, м в плане по вертикали в пространстве	8	40	10,5	50	21	100
	9	47	14	70	28	140
	16	76	18	86	36	172
Составляющие скорости, м/с	0,07		0,1		0,2	
Время GPS, нс	17	95	26	140	52	280
Время UTC, нс	68	115	100	170	200	340



Ошибки местоопределения по системе GPS

Таблица Точностные показатели после модернизации GPS

Источник ошибок	Ошибка (СКО) определения псевдодлины, м	
	Одна частота	Две и более частоты
Ионосфера	7,0	0,01
Тропосфера	0,2	0,2
Эфемеридное обеспечение и синхронизация	2,3	2,3
Шумы приемника	0,6	0,6
Многолучевость	1,5	1,5
Общая ошибка	7,5	2,8
Типичный HDOP	1,5	1,5
Ошибка определения координат в горизонтальной плоскости, 95%	22,5	8,5

GDOP - Geometric Dilution Of Precision - геометрический фактор снижения точности

HDOP - Horizontal Dilution Of Precision – горизонтальный (геометрический) фактор снижения точности