

# КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 621.396.67; 621.396.93

## СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

Е. В. Овчинникова, П. А. Шмачилин, С. Г. Кондратьева,  
Э. В. Гаджиев, А. Ю. Михайлов

Рассматривается состояние развития глобальных навигационных спутниковых систем, ставших неотъемлемой частью современной деятельности человека. Показаны и рассмотрены применяемые в настоящее время глобальные навигационные спутниковые системы. Проводится их сравнительный анализ. Приведены составы орбитальных группировок, наклона орбитальных плоскостей, параметры навигационных сигналов. Показаны применяемые (действующие) космические аппараты и их характеристики: срок активного существования, масса, габариты. Отмечается тенденция изменения веса и габаритов космических аппаратов в составе навигационных систем, а также увеличение срока службы космических аппаратов. Дается оценка перспектив развития отечественной глобальной навигационной спутниковой системы и выдвигается главное требование к навигационным системам нового поколения – это увеличение точности передаваемой информации. Отмечается также актуальность развития данного направления с учетом геополитической обстановки в мире.

**Ключевые слова:** космический аппарат, глобальная навигационная спутниковая система, Глобальная позиционирующая система, ГЛОНАСС, «Галилео», «Бэйдоу».

### Введение

В настоящее время существуют два основных класса радиолиний:

- наземные;
- спутниковые.

Наземные радиолинии предназначены для передачи информации на дальние расстояния при использовании диапазона коротких волн (КВ). Если используется диапазон выше (при длине волны меньше 1 м), то используются радиорелейные системы, где реле выступает в роли повторителя.

Спутниковые радиолинии представляют собой систему, состоящую из наземной станции и космических аппаратов (КА). Данная система покрывает гораздо больший участок поверхности Земли и позволяет передавать информацию на большие расстояния, чем наземные радиолинии.

Одним из главных направлений использования спутниковых радиолиний является навигация.

Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС) – это система, предназначенная для определения местоположения наземных, водных и воздушных объектов, а также низкоорбитальных КА. Спутниковые системы навигации также позволяют получить скорость и направление приема сигнала. Кроме того, они могут использоваться для получения точного времени распространяемого сигнала.

Подобные системы позволяют определять координаты пользователя в любой точке земной или околоземной поверхности.

Для определения местоположения пользователя необходима прямая видимость с четырьмя и более спутниками.

Целью работы является сравнительный анализ существующей ГНСС в части определения текуще-

го состояния и перспектив дальнейшего развития данной отрасли.

### Обзор навигационных систем

В настоящее время существуют следующие ГНСС:

- Глобальная позиционирующая система (*Global Positioning System – GPS*; США);
- Глобальная навигационная спутниковая система (ГЛОНАСС; СССР, РФ);
- «Галилео» (*Galileo*; Европейское космическое агентство);
- «Бэйдоу» (*Beidou*; КНР).

**ГНСС GPS.** Создание глобальной навигационной системы *GPS* ведет свое начало с 1973 года, когда Министерство обороны США дало указание разработать и развернуть навигационную систему космического базирования [1]. В результате была разработана система, которая получила название «НАВСТАР» (*NAVigation System with Time And Ranging – NAVSTAR*), позже *GPS*. В 1974 году фирма «Роквелл» (*Rockwell*) получила заказ на изготовление первых восьми КА *GPS* серии блока И (*Block I*). Разработка концепции построения и архитектуры новой навигационной системы составила 5 лет, и уже 22 февраля 1978 года был запущен первый спутник.

На текущий момент группировка *GPS* является одной из основных навигационных систем мира.

Орбитальная группировка (ОГ) системы *GPS* состоит из 32-х основных КА, расположенных на 6-ти орбитах [2]. Данные орбиты обозначаются буквами от *A* до *F*. Наклонение орбитальных плоскостей составляет 55°, долготы восходящих узлов различаются на 60°. Период обращения КА составляет 11 ч 58 мин. Таким образом, орбиты *GPS* являются синхронными.

Взаимоположение орбит группировки *GPS* представлены на рис. 1.

Система *GPS* имеет несколько типов действующих КА, параметры которых приведены в табл. 1.

Полные параметры навигационных сигналов представлены в табл. 2.

Для услуг открытого доступа используются радиосигналы L1C/A, L1C, L2C и L5.

Для услуг селективного доступа (санкционированного) используются – L1P, L1M, L2P и L2M.

Приведенная информация соответствует данным интерфейсного контрольного документа (ИКД) *GPS* 2013 года. Новый ИКД *GPS* был выпущен в мае 2018 года и в настоящее время информации о текущих радиосигналах нет.

В системе *GPS* используется Всемирная геодезическая система – 1984 (*World Geodetic System 1984 – WGS-84*). Данная система имеет хорошее совпадение рельефа геоида с его эллипсоидной аппроксимацией в области Северной Америки.

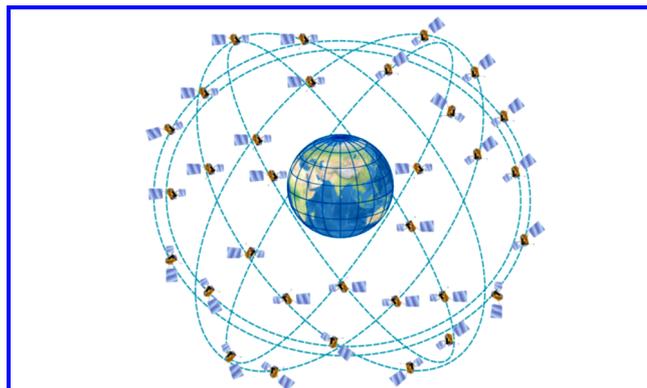


Рис. 1. Орбитальная группировка системы *GPS*

Параметры земного эллипсоида системы *WGS-84* представлены в табл. 3.

Отсчет времени ведется в неделях *GPS* и секундах в рамках текущей недели, начало отсчета – 00 ч 00 мин 06.01.1980.

На рис. 2 – 4 показаны космические аппараты ГНСС *GPS* различных поколений соответственно.

Таблица 1

Параметры действующих космических аппаратов системы *GPS*

	<i>GPS Block IIR</i>	<i>GPS Block IIR-M</i>	<i>GPS Block IIF</i>	<i>GPS Block III</i>
Срок активного существования, лет	10	10	12	15
Масса на орбите, кг	1126,7	1126,7	1465,1	2161
Габариты, м	–	1,58 × 1,96 × 2,21	2,49 × 2,03 × 2,24	2,46 × 1,78 × 3,40
Сигналы	L1 C/A; L1/2 P(Y)	L1 C/A; L1/2 P(Y); L2C; L1/2 M-Code	L1 C/A; L1/2 P(Y); L5I; L5Q; L1M; L2M; L2C	L1 C/A; L1 P(Y); L1C; L2C; L2M; L5; L1/2 M-Code

Таблица 2

Параметры навигационных сигналов системы *GPS*

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Тактовая частота, МГц
L1	1575,42	C/A	1,023
		P(Y)	10,23
		M	5,115
		L1C <sub>D</sub>	1,023
		L1C <sub>P(Y)</sub>	1,023
L2	1227,6	P(Y)	10,23
		L2C	1,023
		M	5,115
L5	1176,45	L5I	10,23
		L5Q	10,23

Таблица 3

Параметры земного эллипсоида системы *WGS-84*

Параметр	Значение
Большая полуось, м	6 378 137,0
Коэффициент сжатия эллипсоида	1/298,257223563
Угловая скорость вращения Земли, рад/с	7 292 115 · 10 <sup>-11</sup>
Гравитационная постоянная Земли, м <sup>3</sup> /с <sup>2</sup>	2 986 004,418 · 10 <sup>-8</sup>



Рис. 2. Внешний вид космического аппарата GPS серии блока IIR



Рис. 3. Внешний вид космического аппарата GPS серии блока IIF



Рис. 4. Внешний вид космического аппарата GPS серии блока III

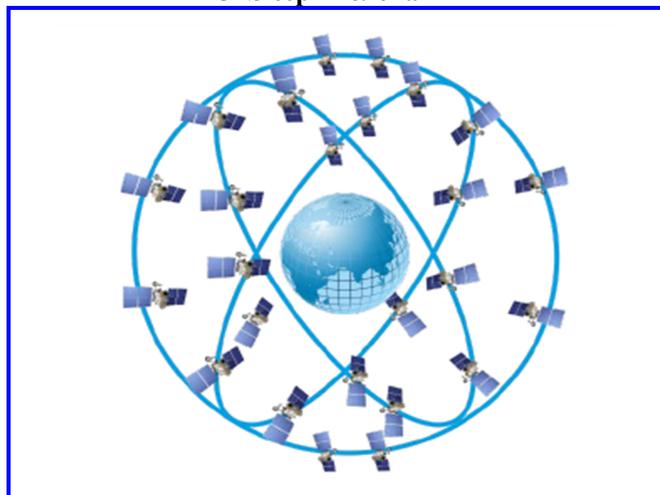


Рис. 5. Орбитальная группировка системы ГЛОНАСС

**ГНСС ГЛОНАСС.** История развития спутниковых систем навигации начинается с предложения в 1957 году В.С. Шебшаевича использовать КА для навигации. Его исследования были использованы в 1963 году при опытно-конструкторских работах над первой отечественной низкоорбитальной системой «Цикада». Позже, в 1979 году система «Цикада» была сдана в эксплуатацию в составе четырех спутников. Летные испытания высокоорбитальной отечественной навигационной системы ГЛОНАСС были начаты в октябре 1982 года запуском спутника «Космос-1413» [3].

На текущий момент группировка ГЛОНАСС состоит из 24-х спутников, которые находятся на трех средневысотных околокруговых орбитах с номинальным значением высоты в 19 100 км, наклонением в  $64,8^\circ$  и периодом обращения в 11 ч 15 мин 44 с.

Номинальное наклонение обеспечивает 100%-ю доступность навигации на территории Российской Федерации.

Взаиморасположение орбит системы ГЛОНАСС представлены на рис. 5.

Система ГЛОНАСС имеет несколько действующих типов КА, параметры которых представлены в табл. 4.

Сигналы, используемые в системе ГЛОНАСС, представлены в табл. 5.

Система координат представлена в виде геоцентрической системы координат версии ПЗ-90.11. Данная система хорошо описывает параметры рельефа геоида на территории Российской Федерации.

Параметры эллипсоида представлены в табл. 6.

На рис. 6 – 9 показаны КА ГНСС ГЛОНАСС различных поколений соответственно.

Таблица 4

**Параметры космических аппаратов системы ГЛОНАСС**

	«Глонасс-М»	«Глонасс-К»	«Глонасс-К2»
Срок существования, лет	7	10	10
Масса, кг	1415	935	1600
Габариты, м	2,71 × 3,05 × 2,71	2,53 × 3,01 × 1,43	2,53 × 6,01 × 1,43
Сигналы	L1OF L2OF L3OC L1SF L2SF	L1OF L2OF L3OC L2OC L1SF L2SF	L1OF L2OF L1OC L2OC L3OC L1SF L2SF L1SC L2SC

Таблица 5

**Параметры сигналов системы ГЛОНАСС**

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Тактовая частота, МГц
L1	1 600,995	L1OCd	1,023
		L1OCp	1,023
L2	1 248,06	L2 КСИ	1,023
		L2OCp	1,023
L3	1 202,025	L3OCd	10,23
		L3OCp	10,23

Таблица 6

**Параметры эллипсоида системы ГЛОНАСС**

Параметр	Значение
Большая полуось эллипсоида, м	6 378 136,0
Коэффициент сжатия эллипсоида	1/298,257839303
Угловая скорость вращения Земли, рад/с	$7\,292\,115 \cdot 10^{-11}$



Рис. 6. Внешний вид космического аппарата «Глонасс» первого поколения



Рис. 7. Внешний вид космического аппарата «Глонасс-М»



Рис. 8. Внешний вид космического аппарата «Глонасс-К»

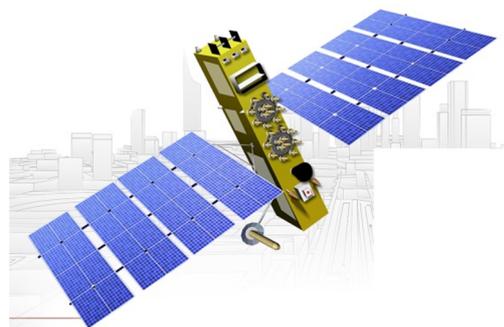


Рис. 9. Внешний вид космического аппарата «Глонасс-К2»

**ГНСС Galileo.** Европейская программа по созданию навигационной системы официально была утверждена в 1994 году, а в 1999 году европейский проект получил условное название *Galileo* в честь итальянского астронома Галилео Галилея. Экспериментальные спутники *GIOVE-A* и *GIOVE-B* были запущены на орбиту 28 декабря 2005 года и 27 апреля 2008 года [4, 5].

Орбитальная группировка *Galileo* предполагает, что на трех круговых орбитах высотой 23 222 км, периодом обращения 14 ч, наклонением 56° будет 30 КА. По целевому назначению используются 24 КА.

Взаиморасположение орбит группировки представлено на рис. 10.

Система *Galileo* имеет несколько действующих типов КА, которые представлены в табл. 7.

Параметры радиосигналов системы *Galileo* представлены в табл. 8.

На рис. 11 показан КА ГНСС *Galileo*.

**ГНСС Beidou.** Создание китайской навигационной глобальной системы было предложено в 1983 году, позже, в 1989 году, прошла экспериментальная проверка двух геостационарных КА. 15 декабря 2003 года китайская система первого поколения была сдана в эксплуатацию. Развитие системы *Beidou* второго поколения началось в 2004 году, уже к 2012 году было запущено еще 14 спутников, 5 из которых геостационарных, 5 геосинхронных и 4 КА на средних орбитах. В 2009 году был начат третий этап системы *Beidou*, основной задачей которого было предоставление услуг для пользователей, находящихся в акватории обоих Шелковых путей, и завершение развертывания 35-ти КА для обеспечения глобальных услуг пользователей [6, 7].

Система *Beidou* представляет собой орбитальную группировку смешанного типа, состоящую из более 30-ти КА. Параметры орбит группировки представлены в табл. 9.

Взаиморасположение орбит группировки представлено на рис. 12.

Параметры КА системы *Beidou* представлены в табл. 10.

Параметры сигналов системы *Beidou* представлены в табл. 11.

Геодезические параметры эллипсоида в китайской геодезической системе координат 2000 года (*China Geodetic Coordinate System 2000 – CGCS2000*) представлены в табл. 12.

### Бортовые антенные системы КА ГНСС

Развитие бортовых антенных систем КА ГНСС тесно связано с развитием самих КА ГНСС.

Как известно [8], бортовые антенные системы обладают спецификой, которую необходимо учитывать при их проектировании. Например, при формировании диаграммы направленности (ДН) участвует не только собственно антенна, но и часть проводящей поверхности КА. Особенность работы бортовых антенных систем КА также заключается в том, что им приходится работать с электронными приборами, рассчитанными на выполнение определенных функций в условиях резких перепадов давления и температуры, перегрузок, вибрации, наличия ионизации и т.д. Все это усложняет работу антенн, может привести к нежелательным явлениям, искажающим характеристики антенн, и, безусловно, создает дополнительные требования в отношении конструкции и параметров антенн КА.

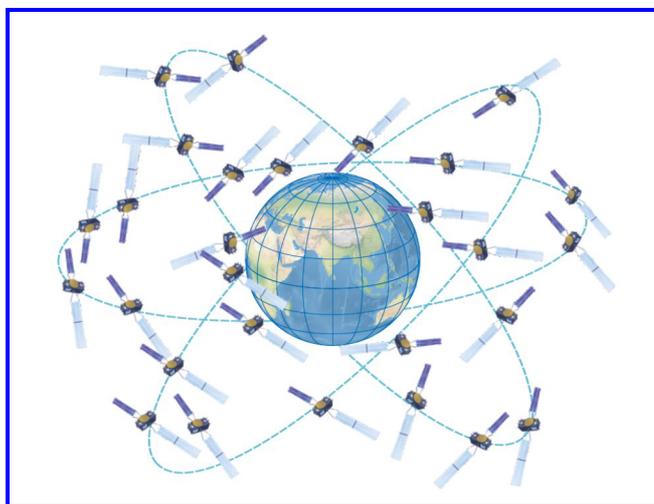


Рис. 10. Орбитальная группировка *Galileo*



Рис. 11. Внешний вид космического аппарата *Galileo*

Таблица 7

Параметры космических аппаратов системы *Galileo*

Характеристики	<i>Galileo IOV</i>	<i>Galileo FOC</i>
Срок службы	12 лет	более 12 лет
Масса, кг	700	730
Габариты, м	3,02 × 1,58 × 1,59	2,74 × 1,58 × 1,59
Сигналы	L1 E5 E6	L1 E5 E6

Таблица 8

Параметры сигналов системы *Galileo*

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Тактовая частота, МГц
E1	1 575,42	E2-B	1,023
		E1-C	1,023
E6	1 278,75	E6B	5,115
		E6C	5,115
E5	1 191,79	E5a-I	10,23
		E5a-Q	10,23
		E5b-I	10,23
		E5b-Q	10,23

Таблица 9

Параметры орбит системы *Beidou*

3 космических аппарата на геостационарной орбите	Точки	80 в.д., 110,5 в.д., 140 в.д.
	Высота	35 786 км
24 космических аппарата на средних круговых орбитах	Количество плоскостей	3
	Наклонение	55°
	Высота	21 528 км
	Период	12 ч 53 мин 24 с
3 космических аппарата на наклонной геосинхронной орбите	Пересечение экватора подспутниковой трассы в точке 118 в.д.	
	Наклонение	55°
	Высота	35 786 км

Таблица 10

Параметры космических аппаратов системы *Beidou*

Характеристики	Космический аппарат на геостационарной орбите	Космический аппарат на средней круговой орбите
Срок службы	~ 15 лет	~ 10 лет
Масса, кг	828	850
Габариты, м	н/д	н/д
Сигналы	L1 (B1) L2 (B3) L3/L5 (B2)	L1 (B1) L2 (B3) L3/L5 (B2)

Таблица 11

Параметры сигналов системы *Beidou*

Диапазон	Несущая частота, МГц	Сигнал	Тактовая частота, МГц
B1 (L1)	1 575,42	B1C	1,023
	1 575,42	B1C-SBAS	1,023
	1 561,098	B1I	2,046
B2 (L3)	1 176,45	B2a	10,23
	1 207,14	B2b	10,23
	1 207,14	B2b-PPP	10,23
B3 (L2)	1 268,52	B3I	10,23

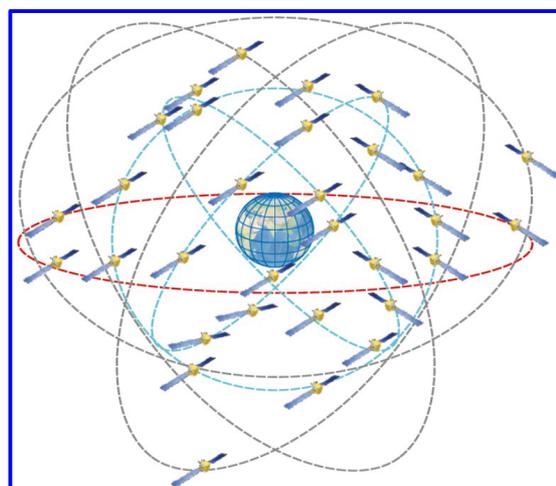
Рис. 12. Орбитальная группировка *Beidou*

Таблица 12  
**Параметры эллипсоида системы CGCS2000**

Параметр	Значение
Большая полуось, м	6 378 137,0
Коэффициент сжатия эллипсоида	1/298,257222101
Угловая скорость вращения Земли, рад/с	$7\,292\,115 \cdot 10^{-11}$
Гравитационная постоянная Земли, $\text{м}^3/\text{с}^2$	$3\,986\,004,418 \cdot 10^{-8}$

В строгой электродинамической постановке задача нахождения поля излучения рассматриваемой антенны формулируется следующим образом: для заданного стороннего электрического или магнитного тока с объемными плотностями  $J^{\text{э.ст}}$  и  $J^{\text{м.ст}}$  на замкнутой поверхности  $S$  (поверхности КА) требуется найти решение уравнений Максвелла, удовлетворяющее условиям излучения и граничным условиям на  $S$  [9].

Так как заданные сторонние токи проходят по вибраторам или щелям, размеры которых соизмеримы с длиной волны  $\lambda$ , для расчета полного поля излучения в соответствии с общими методами теории антенн необходимо предварительно знать поле излучения отдельного элемента такой антенны (элементарного источника) для заданных граничных условий на поверхности  $S$ . Другими словами, нужно предварительно решить задачу об излучении элемента тока в виде трехмерной  $\delta$ -функции. Математически эта задача сводится к решению неоднородного волнового уравнения (уравнение Гельмгольца) вида:

$$\Delta A + k^2 A = -J^{\text{э.ст}} \delta(r - r_0),$$

где  $A$  – некоторый вспомогательный вектор, однозначно определяющий поле  $E$  (или  $H$ );  $J^{\text{э.ст}}$  – заданный сторонний электрический или магнитный ток в точке  $r_0$ .

Решение этого уравнения для заданных граничных условий в математике называется функцией Грина  $G(r/r_0)$ . Функция Грина (векторная величина) является функцией точки расположения элементарного источника  $r_0$  на поверхности  $S$  или около нее, а также точки наблюдения  $r$  (точки определения поля). В настоящее время функции Грина известны (строгое решение) для ряда форм идеально проводящей поверхности  $S$ : плоская поверхность, сфера, полубесконечный конус, бесконечный цилиндр и др. Зная функцию Грина (то есть поле элементарного источника для заданных граничных условий на  $S$ ) и инте-

грируя ее по области заданных сторонних токов, находим поле излучения реальной антенны КА.

Следует отметить, что даже для простейших форм поверхности выражения функции Грина в большинстве случаев получаются довольно сложными, что затрудняет их использование для инженерных расчетов антенн КА. Поэтому при решении уравнений электродинамики часто используют вспомогательные скалярные или векторные величины, с помощью которых удается упростить решение той или иной задачи. К таким величинам относятся скалярный потенциал  $\phi$ , векторный потенциал  $A$ , вектор Герца, вспомогательные скалярные функции  $\psi$ ,  $U$ ,  $V$ , потенциалы Дебая и др. Поэтому в решении используют функции Грина и для нахождения указанных выше вспомогательных величин. Поле излучения (искомое решение) получают дифференцированием найденных вспомогательных величин.

Для ряда практических задач в теории антенн летательных аппаратов строгое решение для определения функции Грина необязательно, если известны приближенные значения этих функций [10].

Более подробно данный вопрос рассмотрен в [11].

Таким образом, при разработке бортовых антенно-фидерных устройств разработчику необходимо уделить внимание таким вопросам как:

- конструкция самого КА (тип корпуса, форма корпуса (геометрия), наличие выносных элементов конструкции, тип и размещение батарей солнечных и т.д.) [12];

- параметры целевой орбиты;
- рабочий диапазон частот;
- срок активного существования и др.

### Сравнение видов ГНСС

В ходе анализа было выявлено, что большинство систем глобальной навигации имеют много общего, а именно:

- наличие средней круговой орбиты;
- работа в диапазонах частот 1 – 2 ГГц;
- схожесть периода обращения на орбите;
- срок службы от 10-ти до 15-ти лет;
- наклонение орбит порядка 55 градусов (исключение ГЛОНАСС).

Отличиями спутниковых систем являются:

- вес спутников;
- геодезические параметры эллипсоида вращения для определения координат;
- различие в сигналах спутниковой передачи и сообщений с ними.

В табл. 13 представлена сводная информация по конструктивным особенностям всех КА действующих систем ГНСС.

Из табл. 13 видно, что в большинстве систем идет тенденция на увеличение срока службы КА в условиях воздействия агрессивных внешних факторов при эксплуатации, увеличение веса КА с каждым поколением спутников в рамках одной системы, связанное с созданием резервных систем в

КА, а также, соответственно, увеличение габаритов КА.

Более подробные графики по тенденции изменения веса представлены на рис. 13.

В табл. 14 представлена сводная информация по среднекруговым орбитам всех действующих систем ГНСС.

Таблица 13

Сводная таблица параметров космических аппаратов различных систем

Группировка	Действующие космические аппараты	Срок активного существования, лет	Масса на орбите, кг	Габариты, м
GPS	GPS Block IIR	10	1126,7	–
	GPS Block IIR-M	10	1126,7	1,58 × 1,96 × 2,21
	GPS Block IIF	12	1465,1	2,49 × 2,03 × 2,24
	GPS Block III	15	2161	2,46 × 1,78 × 3,40
ГЛОНАСС	«Глонасс-М»	7	1415	2,71 × 3,05 × 2,71
	«Глонасс-К»	10	935	2,53 × 3,01 × 1,43
	«Глонасс-К2»	10	1600	2,53 × 6,01 × 1,43
Galileo	Galileo IOV	12	700	3,02 × 1,58 × 1,59
	Galileo FOC	более 12	730	2,74 × 1,58 × 1,59
Beidou	Космический аппарат на геостационарной орбите	~15	828	–
	Космический аппарат на средней круговой орбите	~10	850	–

Таблица 14

Сводная таблица параметров средних круговых орбит ГНСС

ГНСС	Количество спутников	Высота орбиты, км	Количество плоскостей	Период	Наклонение
GPS	24+	20200	6	11 ч 58 мин	55°
ГЛОНАСС	24	19100	3	11 ч 15 мин 44 с	64,8°
Galileo	27	23222	3	14 ч 4 мин 45 с	56°
Beidou	24	21528	3	12 ч 53 мин 24 с	55°

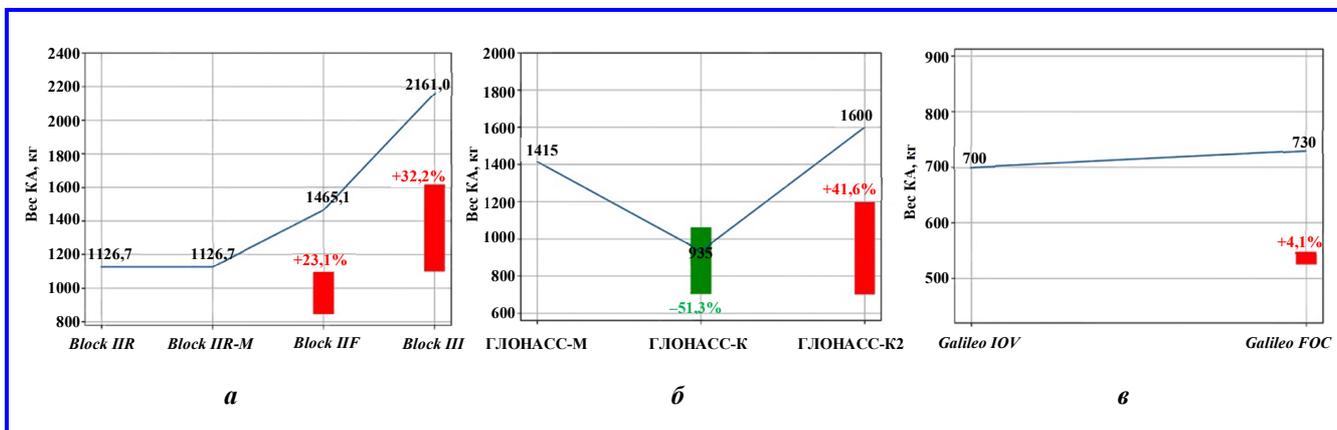


Рис. 13. Тенденция изменения веса систем: а – GPS; б – ГЛОНАСС; в – Galileo

### Заключение

По итогам анализа данной работы можно сказать, что в рамках построения системы глобальной навигации страны разработчики действовали практически одинаково. Исключением является российская система ГЛОНАСС: ввиду географического расположения страны наклон орбиты был изменен, чтобы иметь большой период прямой видимости спутника с поверхности земли на территории Российской Федерации. Данное изменение повлияло и на общее число орбит, которых в системе ГЛОНАСС всего 3.

Основными перспективами развития отрасли глобальной навигации является повышение точности позиционирования объекта на земле или околоземном пространстве. Госкорпорация «Роскосмос» в ближайшее время планирует ввод шести КА «Глонасс-ВКК», которые позиционируются как КА нового поколения, обладающие большей точностью [13, 14]. Аналогичные действия предпринимают и другие разработчики. Не стоит забывать, что американские спутники «Старлинк» (*Starlink*) в теории могут выступать как спутники двойного назначения, с учетом их количества на орбите и огромного количества среди них спутников прямой видимости, точность позиционирования там может быть очень большой, вплоть до нескольких сантиметров.

Другим шагом в развитии навигационной отрасли может быть переход от глобальных систем к региональным. В данном направлении преуспели такие страны как: Индия, Япония, Корея. Данные системы совместимы по частотам и сообщениям с системой *GPS*, что позволяет разработчикам иметь уже готовую массовую аппаратную часть для работы с данными системами.

### Литература

1. GPS: The Global Positioning System : [сайт]. – 2024. – URL : <https://www.gps.gov/> (дата обращения: 14.04.2024).
2. Глобальная навигационная спутниковая система GPS // Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос» : [сайт]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/gps.php>.
3. Глобальная навигационная спутниковая система ГЛОНАСС // Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос» : [сайт]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php>.

4. Глобальная навигационная спутниковая система Galileo // Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос» : [сайт]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/galileo.php>.
5. HOME | European GNSS Service Centre (GSC) : [сайт]. – 2024. – URL : <https://www.gsc-europa.eu/>.
6. Глобальная навигационная спутниковая система Beidou // Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос» : [сайт]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php>.
7. Бэйдоу : [сайт]. – 2024. – URL : <http://www.beidou.gov.cn/>.
8. Бочаров, В. С. Особенности бортовых антенно-фидерных устройств космических аппаратов / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Перспективы развития антенно-фидерных устройств летательных аппаратов: Материалы научно-технического семинара, Истра, 25 сентября 2013 года. – Истра : Научно-исследовательский институт электромеханики, 2013. – С. 55–58.
9. Бочаров, В. С. Исследование влияния корпуса космического аппарата на характеристики направленности бортовых антенн / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Иосифьяновские чтения 2015: Материалы конференции, Истра, 11 ноября 2015 года. – Истра : АО «НИИЭМ», 2015. – С. 61–63.
10. Исследование характеристик направленности бортовых антенн космических аппаратов на ранней стадии разработки / Е. В. Овчинникова, П. А. Шмачилин, С. Г. Кондратьева [и др.] // Электросвязь. – 2016. – № 7. – С. 56–59.
11. Методика приближенного расчета характеристик направленности бортовых микрополосковых антенн малых космических аппаратов / Е. В. Овчинникова, П. А. Шмачилин, С. Г. Кондратьева [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. – 2016. – № 8. – С. 15–27.
12. Гаджиев, Э. В. Конструкции малых космических аппаратов / Э. В. Гаджиев, А. В. Заграева // Международная конференция «Космические системы», Москва, 27 апреля 2021 года. – Москва : Издательство «Перо», 2021. – С. 32–33.
13. Точность определения местоположения с помощью российской глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС планируется улучшить до 10 сантиметров после 2030 года // Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос» : [сайт]. – 2024. – URL : [https://glonass-iac.ru/news/news\\_gnss/3925/?sphrase\\_id=6111213](https://glonass-iac.ru/news/news_gnss/3925/?sphrase_id=6111213).
14. Пути развития на 2021 год: ГЛОНАСС на пороге новой декады // Прикладной потребительский центр Госкорпорации «Роскосмос» : [сайт]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3912/>.

Поступила в редакцию 20.11.2024

**Елена Викторовна Овчинникова**, доктор технических наук, доцент, профессор, т. +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.  
(Московский авиационный институт; МГТУ им. Н. Э. Баумана).

**Павел Александрович Шмачилин**, кандидат технических наук, доцент, т. +7 (916) 586-44-32, e-mail: shmachilin@gmail.com.  
(Московский авиационный институт; РУДН).

**Светлана Геннадьевна Кондратьева**, кандидат технических наук, доцент, т. +7 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru.  
(Московский авиационный институт).

**Эльчин Вахидович Гаджиев**, кандидат технических наук, доцент, ведущий инженер, т. 8 (499) 158-47-40, e-mail: gadzhiev\_elchin@mail.ru.

(Московский авиационный институт; АО «Корпорация «ВНИИЭМ»).

**Артем Юрьевич Михайлов**, студент, т. 8 (499) 158-47-40, e-mail: artem.mihaylov.2024@yandex.ru.  
(Московский авиационный институт).

## STATUS AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS

E. V. Ovchinnikova, P. A. Shmachilin, S. G. Kondratieva,  
E. V. Gadzhiev, A. Yu. Mikhaylov

**Status of development of global navigation satellite systems which have become an integral part of modern human activity is considered. The global navigation satellite systems currently in use are shown and considered. Their comparative analysis is performed. Compositions of satellite constellations, inclinations of orbit planes, parameters of navigation signals are presented. Spacecrafts in use (current) and their characteristics are shown: lifetime, mass and dimensions. Trends for changing of weight and dimensions of spacecrafts within the navigation systems and also the increase of spacecraft lifetime are described. The assessment of development of Russian Global Navigation Satellite System is given and the primary requirement to the navigation systems of new generation is given – increase the accuracy of transmitted data. Relevance of development of the present direction taking into account geopolitical situation in the world is described.**

**Key words:** spacecraft, global navigation satellite system, global positioning system, GLONASS, Galileo, Beidou.

### References

1. GPS : The Global Positioning System: [website]. – 2024. – URL: <https://www.gps.gov/>.
2. Global Navigation Satellite System GPS // Applied Consumer Center of State Space Corporation Roscosmos : [website]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/gps.php>.
3. Global Navigation Satellite System GLONASS // Applied Consumer Center of State Space Corporation Roscosmos : [website]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/glonass.php>.
4. Global Navigation Satellite System Galileo // Applied Consumer Center of State Space Corporation Roscosmos : [website]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/galileo.php>.
5. HOME | European GNSS Service Centre (GSC) : [website]. – 2024. – URL: <https://www.gsc-europa.eu/>.
6. Global Navigation Satellite System Beidou // Applied Consumer Center of State Space Corporation Roscosmos : [website]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php>.
7. Beidou: [website]. – 2024. – URL : <http://www.beidou.gov.cn/>.
8. Bocharov, V. S. Features of on-board antenna-feeder devices for spacecrafts / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Prospects of development of antenna-feeder devices for spacecrafts: proceedings of scientific seminar, Istra, September 25, 2013. – Istra : Research Institute of Electromechanics, 2013. – P. 55–58.
9. Bocharov, V. S. Research of spacecraft body impact on characteristics of on-board antennas directivity / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Iosifian readings 2015 : Abstract of conference papers, Istra, 11 November 2015 – Istra : JSC NIEM, 2015 – P. 61–63.
10. Research of spacecraft on-board antennas directivity at early stage of development / E. V. Ovchinnikova, P. A. Shmachilin, S. G. Kondratieva [et al.] // *Electrosvyaz* magazine. – 2016 – No. 7 – P. 56–59.
11. Procedure of approximate calculation of directivity characteristics of small spacecraft on-board microstrip antennas / E. V. Ovchinnikova, P. A. Shmachilin, S. G. Kondratieva [et al.] // *Achievements of Modern Radioelectronics*. – 2016 – No. 8. – P. 15–27.
12. Gadzhiev, E. V. Design of small spacecrafts / E. V. Gadzhiev, A. V. Zagraev // International Conference «Space Systems», Moscow, 27 April, 2021. – Moscow : Pero Publishing House, 2021. – P. 32–33.
13. Positioning accuracy of the Russian Global Navigation Satellite System GLONASS is planned to improve up to 10 centimeters after 2030 year // Applied Consumer Center of State Space Corporation Roscosmos : [website]. – 2024. – URL : [https://glonass-iac.ru/news/news\\_gnss/3925/?sphrase\\_id=6111213](https://glonass-iac.ru/news/news_gnss/3925/?sphrase_id=6111213).
14. Development trends for 2021 year : GLONASS is on the cusp of new decade // Applied Consumer Center of State Space Corporation Roscosmos : [website]. – 2024. – URL : <https://glonass-iac.ru/news/gnss/3912/>.

*Elena Viktorovna Ovchinnikova, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, t. +7 (915) 323-40-36, e-mail: oea8888@gmail.com.  
(Moscow Aviation Institute, Bauman Moscow State Technical University).*

*Pavel Aleksandrovich Shmachilin, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,  
t. +7 (916) 586-44-32, e-mail: shmachilin@gmail.com.  
(Moscow Aviation Institute; Peoples' Friendship University of Russia).*

*Svetlana Gennad'evna Kondratieva, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, t. +7 (915) 042-94-22, e-mail: kondratieff89@ya.ru.  
(Moscow Aviation Institute).*

*Elchin Vakhidovich Gadzhiev, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Leading Engineer,  
t. 8 (499) 158-47-40, e-mail: gadzhiev\_elchin@mail.ru.  
(Moscow Aviation Institute; VNIEM Corporation JSC).*

*Artem Yurievich Mikhaylov, student, t. 8 (499) 158-47-40, e-mail: artem.mihaylov.2024@yandex.ru.  
(Moscow Aviation Institute).*