



УДК 629 783 (09):525:527

**Н. А. Тестоедов, В. Е. Косенко, С. В. Сторожев,
В. Д. Звонарь, В. И. Ермоленко, В. Е. Чеботарев**

*ОАО «Информационные спутниковые системы» им. акад. М. Ф. Решетнёва,
г. Железногорск, Красноярский край, Россия*

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ В РОССИИ

Отмечаются основные моменты на пути создания глобальных космических навигационных систем первого и второго поколений: объем и содержание работ, этапы и сроки проведения работ, основные характеристики спутников этих систем.

Приводятся основные результаты модернизации космического сегмента отечественной глобальной космической навигационной системы второго поколения, полученные в процессе реализации федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система».

Раскрываются основные направления развития и модернизации космического сегмента отечественной глобальной космической навигационной системы, определенные в федеральной целевой программе «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы».

Ключевые слова: навигационный спутник, метод навигации, точность навигации.

**N. A. Testoedov, V. E. Kosenko, S. V. Storozhev,
V. D. Zvonar, V. I. Ermolenko, V. E. Chebotarev**

*JSC «Academician M. F. Reshetnev» Information Satellite Systems»,
Zheleznogorsk, Russia*

THE HISTORY OF CREATION AND DEVELOPMENT PROSPECTS FOR SPACE NAVIGATION IN RUSSIA

The Report describes creation milestones for the first and second generations of global navigation systems: the scope of work, phases and time periods, and the main satellite characteristics of these systems.

The basic results for modernization of the GLONASS 2nd generation space segment obtained during the ‘Global Navigation System’ Federal Program fulfillment are given as well.

The Report represents the principal directions of the space segment development and modernization defined in the ‘Maintenance, development, and exploitation of the GLONASS system in 2012–2020’ Federal Program.

Key words: navigation satellite, method of navigation, navigation accuracy.

Возможность использования искусственных спутников Земли в качестве подвижных радиориентиров для определения местополо-

жения привлекла внимание специалистов уже после их первых успешных запусков.

Спутниковая радионавигация обладает рядом существенных преимуществ в сравнении с традиционными методами, используемыми в качестве ориентиров небесные

светила или радиомаяки наземного базирования.

Следует отметить, прежде всего, глобальность обслуживания, независимость навигационного обеспечения от времени года, суток, метеоусловий, оперативность и точность определения пользователями своего местоположения, скорости и времени [1; 6].

Исторически с начала разработок отечественных спутниковых навигационных систем ОАО «Информационные спутниковые системы» имени академика М.Ф. Решетнёва» (ранее ОКБ-10, КБ ПМ, НПО прикладной механики) на правительственном уровне было определено головным в кооперации разработчиков, ответственным не только за космические сегменты этих систем, но и за системы в целом, в том числе и за их основные характеристики: точность, доступность, целостность и т.п. Начиная с середины 1960-х годов, кооперацией при головной роли ОАО ИСС разработаны и созданы спутниковые радионавигационные системы двух поколений, отличающиеся принципами построения, методами, оперативностью и точностью навигационных определений, орбитальным построением, зоной обслуживания и пр. [2; 3].

Спутниковые радионавигационные системы первого поколения

Необходимость создания навигационной спутниковой системы была, в первую очередь, обусловлена требованием достижения паритета в морской составляющей триады ядерных вооружений СССР и США. К тому времени (в 1962 году) в США уже была развернута и в 1964 году сдана на вооружение ВМС спутниковая навигационная система, получившая название NNSS (Navy Navigational Satellite System), в составе четырех спутников «Транзит» на низких (1000 км) полярных орбитах, наземной системы контроля и управления и корабельного приемоиндикаторного оборудования. NNSS была разработана Лабораторией прикладной физики университета Дж. Гопкинса по заказу ВМС США для подводных лодок, вооружённых баллистическими ракетами Polaris в рамках единой с созданием ракет и строительством подводных ракетноносцев программы. Но уже в 1967 году на международном уровне было объявлено о предоставлении возможности использования NNSS также гражданскими судами, и не толь-

ко принадлежащими США, но и другим странам (кроме социалистических стран).

С каждого спутника Transit излучались по два когерентных фазоманипулированных навигационных сигнала с несущими частотами 150 и 400 МГц, содержащих в своём составе навигационную (эфемериды соответствующего спутника), временную (оцифрованные метки времени) и телеметрическую (о состоянии бортовых систем) информацию.

Проведенные научные исследования и имевшиеся в ОКБ-10 в начале 1960-х годов отрывочные сведения об американских спутниках Transit свидетельствовали об актуальности создания аналогичной отечественной спутниковой навигационной системы для обеспечения паритета с США в обеспечении точной доставки боеголовок к целям. Поэтому в 1963 году ОКБ-10, создавшее к тому времени ракету космического назначения (РКН «Космос-3М») и первые отечественные спутники связи «Стрела-1» и «Стрела-2», выводимые этим носителем на круговые орбиты высотой до 1500 км [2], вышло с инициативой разработки такой системы, которая руководством Госкомитета по оборонной технике, в структуру которого входило тогда предприятие, была воспринята без особого энтузиазма. Признавая ее актуальность, требовалось одновременно признать, что в действующих директивных документах по ракетно-космической тематике задачи спутниковой радионавигации были упущены.

Чтобы обойти бюрократические препоны, руководство ОКБ-10 вынуждено было искать решение в рамках уже запланированных директивными документами космических программ. Одной из таких космических программ было создание в интересах ВМФ спутниковой системы радиосвязи с использованием КА под условным наименованием «Молния-2» на круговых орбитах высотой ~ 800 км. Прошло четыре года, но ответственное за разработку спутника «Молния-2» ОКБ-1 (С. П. Королев) так к ней и не приступило.

В поисках решения родилась идея повышения эффективности боевого применения кораблей ВМФ, в первую очередь подводных ракетноносцев, совмещением в рамках единого спутника типа «Молния-2» функций связного ретранслятора и навигационного радиомаяка. С тем, чтобы за одно подвсплытие в перископное положение подводные лодки имели бы возможность осуществить одновременно

как сеанс двусторонней радиотелеграфной связи с береговыми пунктами управления, так и определение своего местоположения курса как азимута фиксированного направления для прицеливания ракет. Это предложение руководства ОКБ-10 было поддержано С. П. Королевым, предприятие которого было перегружено реализацией пилотируемых и межпланетных программ, а затем и заказчиком системы спутниковой связи для ВМФ в лице начальника Управления связи ГШ ВМФ вице-адмирала Г. Г. Толстолуцкого и Главным конструктором систем спутниковой связи М. Р. Каплановым.

В результате разработка отечественной спутниковой навигационно-связной системы в интересах военных морских потребителей была поручена ОКБ-10 и проводилась на основании постановления ЦК КПСС и СМ СССР от 11 сентября 1964 года № 0762-319. После выхода директивных документов ОКБ-10 приступило к созданию первого в мировой практике совмещённого навигационно-связного спутникового комплекса «Циклон».

Спутниковая навигация с помощью космических систем первого поколения использовала радиально-скоростной (доплеровский) метод навигационных определений морскими потребителями вне зависимости от ведомственной принадлежности, а для специальных потребителей – дополнительно и угломерно-дальномерный. Проведение в одном сеансе радиально-скоростных и дальномерных измерений, кроме определения азимута, существенно повышало точность, надежность и, главное, помехозащищенность обсерваций КА, так как угломерно-дальномерный сигнал принимался узконаправленной антенной с углом раствора сканирующей диаграммы направленности 1,2 град.

По навигационным сигналам низкоорбитного спутника потребитель мог определить только две своих горизонтальных координаты и только на поверхности Земли, что приемлемо в основном только для морских пользователей, со сравнительно низкой, особенно на начальных этапах, точностью определения местоположения (до 1000...1500 м) и с периодичностью 1,5...2,0 часа в приэкваториальных и средних широтах. Такая периодичность возможных обсерваций спутников и глобальность образуемого ими навигационного поля определяются высотой и наклоном орбит (круговые, приполярные с высо-

той ~ 1000 км) и количеством спутников в орбитальной структуре (4–6). Причем высота орбиты – это результат компромисса между диаметром зоны радиообзора, минимально необходимой продолжительностью сеанса обсервации, а также энергетикой радиолиний. Запуск первого экспериментального навигационно-связного спутника «Циклон» был осуществлен 23 ноября 1967 года с космодрома «Плесецк» ракетой-носителем «Космос-3М». После успешных летных испытаний экспериментальная система из четырех спутников «Циклон» с шифром «Залив» в 1971 году была принята в опытную эксплуатацию, в ходе которой Военно-Морским флотом отрабатывались принципы её применения и набиралась статистика по точности навигационных определений и оперативности двусторонней радиосвязи.

Затем на основании правительственных директивных документов (постановление ЦК КПСС и СМ СССР от 21 июля 1967 года № 715-240 и от 30 декабря 1971 года № 940-319) с учетом результатов летных испытаний и опытной эксплуатации была проведена глубокая модернизация спутника «Циклон» и системы «Залив» в целом и на их основе была создана и в 1976 году принята в эксплуатацию навигационно-связная спутниковая система «Парус» в составе шести модернизированных навигационно-связных спутников «Циклон-Б». Гарантированный срок активного существования (САС) спутника был увеличен вдвое, повышена также продолжительность излучения навигационных сигналов на витке (см. табл. 1). Модернизации подверглись не только сами спутники, но и практически все элементы системы: командно-измерительная радиолиния переведена из метрового в дециметровый диапазон, разработаны новые комплектации корабельной навигационной аппаратуры, завершено аппаратно-программное оснащение командного пункта системы.

На момент сдачи в эксплуатацию система «Парус» обеспечивала определение двух плановых координат со среднеквадратической погрешностью 250...300 м, которая почти в четыре раза была меньше заданной. Такое улучшение точности стало возможным благодаря ряду мероприятий по повышению точности определения и прогнозирования параметров орбит, предложенных методически проработанных нашим предприятием (выбор оптимальной схемы проведения сеансов ра-

диоконтроля орбиты, определение требуемой для достижения наивысшей точности суточного прогнозирования параметров орбит, продолжительности мерного интервала, применение оригинальных численно-аналитических методов интегрирования параметров движения навигационных КА, уточнение для этих спутников значения так называемого баллистического коэффициента, учитывающего их атмосферное торможение). Эти мероприятия были внедрены под руководством полковника В. Д. Ястребова в практику баллистико-эфемеридного обеспечения в баллистическом центре системы (в/ч 32103).

Дальнейшее развитие низкоорбитальной отечественной навигации шло в направлении создания на базе системы «Парус» моноцелевой навигационной системы «Цикада», а в дальнейшем на её основе – отечественной части космического сегмента международной спутниковой системы обнаружения и определения географических координат терпящих бедствие судов и самолетов (КОСПАС-SARSAT).

Необходимость разработки и создания в СССР моноцелевой, только навигационной спутниковой системы по аналогии с американской NNSS со спутниками «Транзит», стала очевидной ещё до конца 1960-х годов, поскольку навигационно-связные спутники «Циклон-Б» («Парус»), как уже упоминалось выше, из-за комплексирования в рамках единого спутника навигационных и радиосвязных задач, имели ограничения по ежесекундной продолжительности излучения навигационных радиосигналов. Безусловно, такое комплексирование существенно повышало эффективность боевого применения системы, особенно подводными атомными ракетносцами, но именно оно и стало причиной этих ограничений из-за нехватки на спутниках энергоресурсов. В то же время для массового беззаявочного свободного использования навигационного сигнала неограниченным количеством гражданских (да и военных тоже) судов в любом районе Мирового океана требовалось обеспечить в спутниковой системе непрерывное излучение каждым спутником навигационных сигналов на каждом витке и в течение всего времени активного существования.

Поэтому по инициативе НПО ПМ были подписаны правительственные директивные документы (постановление ЦК КПСС и СМ

СССР от 12 мая 1974 года № 353-126) о разработке специального моноцелевого навигационного спутника «Цикада», излучающего непрерывно на витке только один двухчастотный навигационный радиосигнал в диапазонах 150 и 400 МГц, и развертывании на его основе низкоорбитальной навигационной системы одноименного названия. Спутник «Цикада» разрабатывался на базе навигационно-связного спутника «Циклон-Б» с исключением из его состава связного ретранслятора и угломерно-дальномерного передатчика. Появившиеся при этом резервы массы и энергопотребления были использованы для обеспечения непрерывной на каждом витке в течение всего САС работы доплеровского навигационного передатчика и увеличения срока службы самого спутника до двух лет путем избыточного резервирования бортовой аппаратуры.

В ходе разработки навигационной системы «Цикада» по инициативе и с участием НПО ПМ также были проведены работы по определению согласующей модели движения спутников по «навигационным» (1000 км, 83°) орбитам за счет исследования движения специально запущенных на «навигационные» орбиты двух геодезических спутников «Сфера» (Космос-842 и Космос-911). Набор измерительной информации производился сетью специальных пунктов наблюдения ВТУ ГШ и пятью океанографическими судами ВМФ, оборудованными радиогеодезической измерительной аппаратурой. Внедрение такой согласующей модели в баллистико-эфемеридное обеспечение навигационных спутников первого поколения повысило точность определения местоположения по их радиосигналам в три раза – с 250...300 м (1976 г.) до 80...100 м (1979 г.).

Постановлением ЦК КПСС и СМ СССР от 20.11.79 г. № 1029-305 навигационная система «Цикада» в составе четырех одноименных космических аппаратов (КА), наземного комплекса управления (общего с НКУ системы «Парус») и корабельного (судового) навигационного оборудования была принята в эксплуатацию для навигационного обеспечения кораблей ВМФ, других силовых ведомств, а также и гражданских судов.

Использование навигационных спутников в системе своевременного оповещения о факте и координатах бедствия имеет исключительно важное значение в деле спасания человеческих жизней и аварийных объектов

(судов, самолетов и др.). Начало международного сотрудничества по созданию спутниковой системы обнаружения и определения местоположения судов и самолетов, потерпевших аварию, было заложено на двусторонней (СССР и США) встрече, состоявшейся в Вашингтоне в марте 1977 года. В ноябре 1979 года в Ленинграде представителями СССР, США, Франции и Канады был подписан меморандум, подтвердивший желание сторон сотрудничать в совместном проекте создания спутниковой системы поиска и спасания «КОСПАС-САРСАТ», состоящей из двух взаимодополняющих и технически совместимых по эксплуатационным характеристикам радиотехнических подсистем: КОСПАС (создается Советским Союзом) и SARSAТ (создается США, Францией и Канадой) [4; 5].

Для решения задачи спасания транспортное средство (морское, воздушное...) снабжается аварийным буюм, который автоматически или принудительно включается в момент аварии и непрерывно (до двух суток) передает сигналы на одной из двух частот: 121,5 МГц и 406 МГц или на обеих одновременно. Эти сигналы на частоте 1544,5 МГц ретранслируются через спутник на наземный навигационный центр, который выделяет доплеровское приращение частоты и определяет координаты аварийного бую. В России наземные навигационные центры размещены в Москве, Архангельске, Новосибирске, Владивостоке, а центр управления системой находится в Москве. На спутнике также предусмотрен режим обработки и запоминания принятого от бую сигнала на частоте 406 МГц с последующей его ретрансляцией в наземный навигационный центр при входе спутника в зону радиовидимости центра. Это расширяет область действия системы до глобальной. Полученная информация передается в Центр международной системы «КОСПАС-САРСАТ», который через соответствующие службы поиска и спасания организует работы по выходу спасательных средств в район бедствия и оказания помощи.

Благодаря предусмотренным при разработке возможностям модернизации некоторые навигационные спутники «Цикада» в порядке создания космического сегмента международной системы стали дооснащаться ретрансляторами аварийных сигналов, выполняя при этом функции по излучению двухчастотных навигационных сигналов в со-

ставе системы «Цикада». Такие спутники назывались «Цикада-Н» или просто «Надежда». Первый КА «Надежда», изготовленный в ПО «Полёт», был выведен на навигационную орбиту с космодрома Плесецк ракетой-носителем «Космос-3М» 30 июня 1982 года, а уже 10 сентября 1982 года с этого спутника (единственного тогда в системе КОСПАС-САРСАТ) были ретранслированы сигналы аварийного радиомаяка канадского самолета, потерпевшего аварию в горах Британской Колумбии, что обеспечило оперативное обнаружение и спасание трех человек.

При заданном сроке службы два года реально этот спутник проработал до марта 1988 года (почти 6 лет). Полностью система «КОСПАС-САРСАТ» (два отечественных и два американских спутника) была развернута к концу 1984 года, и с 1985 года началась её полномасштабная эксплуатация.

По экспертным оценкам, спутниковая система «КОСПАС-САРСАТ» позволяет на порядок (в 10 раз и более) сократить время поиска того терпящего бедствие подвижного объекта (транспортного средства), который оснащён аварийным радиобуюм. Это особенно важно для тех, кто перемещается в малонаселённых и экстремальных по климатическим условиям районах (к ним как раз относятся наша северная тундра, тайга, акватория Северного Ледовитого океана, пустыни), где каждый лишний час пребывания без помощи для тяжелораненых или переохлаждающихся людей чреват гибелью. В целом на счету этой системы десятки тысяч спасённых человеческих жизней.

Международная система одобрена международными организациями ИМО (морской) и ИКАО (гражданской авиации), которые приняли решения об обязательном её использовании морскими судами (с 1995 г.) и самолетами (с 2005 г.).

Спутниковые навигационные системы первого поколения («Парус» и «Цикада») к концу 1970-х годов обеспечивали получение данных о двух плановых координатах местонахождения объекта с точностями в пределах ста метров (табл. 1).

В процессе создания спутниковых навигационных систем первого поколения была разработана базовая конфигурация спутника, положенная в основу унифицированного ряда КАУР-1, со следующими техническими характеристиками (рис. 1).

Таблица 1

Характеристики навигационных спутников первого поколения

№	Наименование	«Циклон»	«Циклон-Б»	«Цикада»	«Надежда»
1	Решаемые задачи (% на витке)				
	– навигация (доплеровская)	25	50	100	100
	– навигация (угл.-дальном.)	10	15	–	–
	– связь	100	100	–	–
	– обнаружение аварийных объектов	–	–	–	100
2	Точность определения местоположения, м				
	– по навигационному сигналу	500–600	250	80–100	80–100
	– по сигналу АРБ	–	–	–	1000–2000
3	Ресурс, лет	0,5	1,0	2,0	2,0
4	Масса, кг	850	850	850	850
5	Энергопотребление, Вт	100	100	100	100
6	Дата первого запуска	23.11.1967	26.12.1974	15.12.1976	30.06.1982
7	Количество запусков КА	25	97	20	10

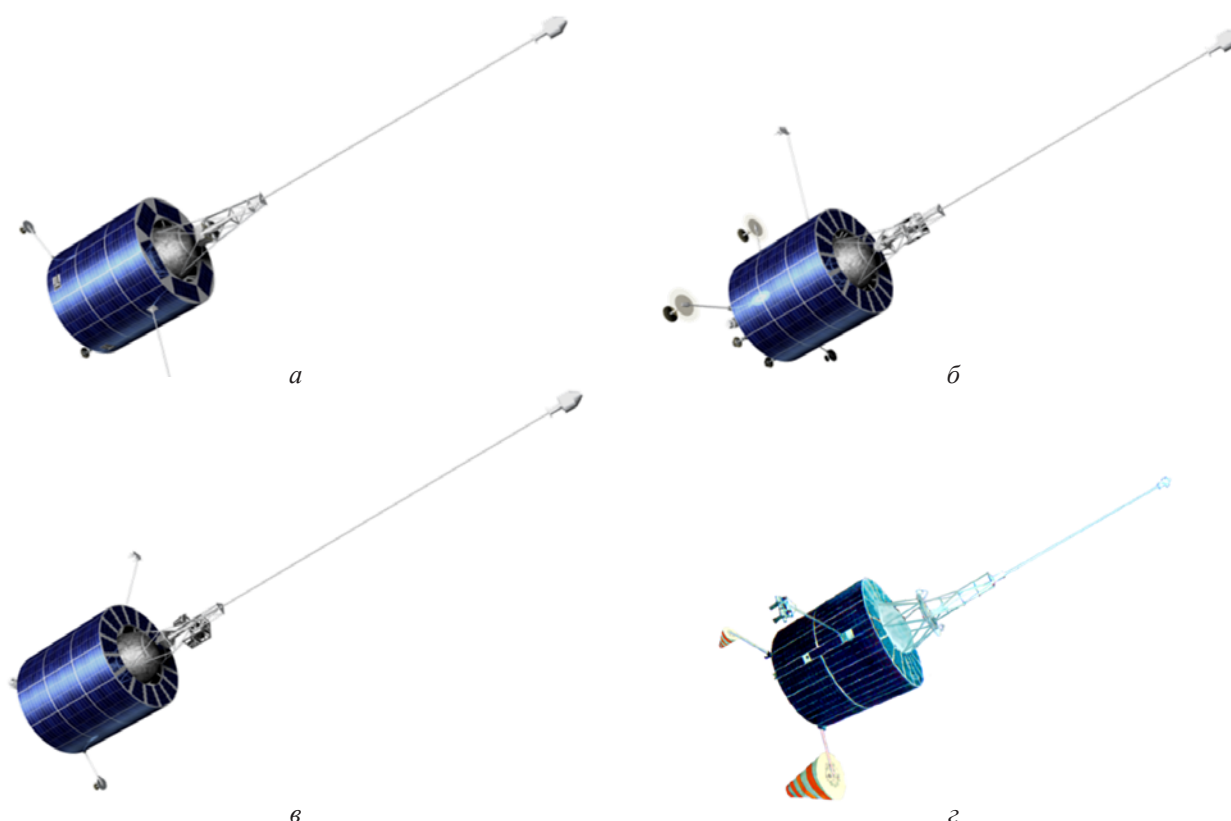


Рис. 1. Космические аппараты навигационных систем первого поколения: а – КА «Циклон»; б – КА «Циклон-Б»; в – КА «Цикада»; г – КА «Надежда»

Спутниковые радионавигационные системы второго поколения

Успешная эксплуатация спутниковых навигационных систем первого поколения привлекла широкое внимание со стороны других потенциальных потребителей. Возникла необходимость создания спутниковой навигационной системы второго поколения, еди-

ной для всех типов потребителей: наземных, морских, воздушных и космических, в интересах как обороны страны, так и народного хозяйства. Спутниковые навигационные системы второго поколения должны обеспечить оперативное (в реальном масштабе времени) высокоточное трехкоординатное (по широте, долготе и высоте) определение местоположения и трех составляющих вектора скорости

пользователя, поправок к местному времени пользователя относительно Госэталопа и относительно Всемирного времени UT-1, связанного с неравномерностью вращения Земли глобально по земной поверхности, в воздушном и околоземном космическом пространстве. Кроме того, система должна также обеспечивать и определение поправки курсоуказания (азимута фиксированного направления) в полярных и приполярных районах Северного полушария.

Выполнить перечисленные требования с помощью низкоорбитальных навигационных систем не представляется возможным в силу принципов, заложенных в основу их построения.

Поэтому в середине 1970-х годов началась разработка единой космической навигационной системы страны. В 1976 году были разработаны технические предложения, в 1977 году – дополнение к ТП в части специальных применений системы, а в 1978 году – эскизный проект навигационной спутниковой системы второго поколения ГЛОНАСС. Дальнейшие работы по созданию системы второго поколения проводились согласно правительственным директивным документам: постановлению ЦК КПСС и СМ СССР от 29 августа 1979 года № 823-247 и четырьмя решениями военно-промышленной комиссии СМ СССР [1; 2; 3].

Исходя из принципа навигационных определений, псевдодальномерным методом (одновременные измерения псевдодальностей до четырех или более спутников) математическим моделированием была выбрана структура спутниковой системы: 24 КА на круговых орбитах высотой 19 140 км наклоном $64,8^\circ$, трехплоскостная с фазовым сдвигом орбитальных позиций КА между плоскостями 0° , 15° , 30° . Для экономичного развертывания многоспутниковой системы ГЛОНАСС была заложена групповая схема выведения спутников носителем «Протон-К» тяжелого класса с разгонным блоком типа ДМ (по 3 КА), что позволяло тремя запусками заполнить одну плоскость (один КА в орбитальном резерве).

Однако из-за отсутствия на тот момент РН среднего класса для одиночного выведения КА, в целях форсирования начала и повышения надежности реализации программы летных испытаний, а также с учетом значительного объема необходимой лётной отрабо-

тки одиночного КА запуски первого навигационного спутника «Глонасс» (11Л) с космодрома «Байконур» 12 октября 1982 года были произведены в блоке с двумя его габаритно-весовыми макетами, а шесть последующих с двумя КА и одним макетом. Это позволило, с одной стороны, отработать штатную систему отделения трех КА одновременно, а с другой – реализовать принцип последовательных доработок КА по результатам летно-конструкторских испытаний предыдущих.

В ходе разработки, летных испытаний и создания навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС разработчики столкнулись с необходимостью решения довольно объемного перечня проблемных вопросов. В основном все они были обусловлены требующимися высокой (единицы метров) точностью определения и прогнозирования орбитальных параметров (эфемерид) и наносекундной точностью синхронизации бортовых (спутниковых) шкал времени с системной шкалой и соответственно между собой, а также обеспечением заданного трехлетнего ресурса работы КА в жестких условиях воздействия факторов космического пространства на этих орбитах. Возникла необходимость проведения поэтапной доработки спутников, учитывающей результаты летных испытаний, что повысило надежность и ресурс работы бортовой аппаратуры. В результате был достигнут, а затем превышен заданный трехлетний срок активного существования спутников «Глонасс» (их средний САС составил 4,3 года).

Для повышения точности определения и прогнозирования параметров движения навигационного спутника (эфемерид) по инициативе НПО ПМ, поддержанной заказчиком (решение комиссии Президиума СМ СССР по ВПВ от 06.06.84 г. № 182), был разработан пассивный (без радиотехнической аппаратуры) геодезический спутник «Эталон» [6; 10]. Спутник «Эталон» представлял собой компактное (диаметр 1294 мм) массивное тело (массой 1345 кг) сферической формы, что позволило точно рассчитать силу воздействующего на него светового давления и отделить её от суммарного воздействия на движение спутника гравитационных полей Земли, Луны и Солнца (рис. 2). Измерения орбиты спутника «Эталон» проводились с помощью квантово-оптических (лазерных) средств, запросные сигналы от которых отражаются спутником в обратном направлении с

помощью угловых отражателей, размещенных на его сферической поверхности (более 2000 шт.). Спутники «Эталон» выводились в составе блока из трех КА вместо одного из КА «Глонасс», запущено два спутника: 10 января 1989 года (Космос-1989) и 31 мая 1989 года (Космос-2024).

По результатам обработки значительно объема квантово-оптических дальномерных измерений по спутникам «Эталон» была создана согласующая модель движения спутника по «навигационным» орбитам «Глонасс», существенно повысившая точность расчета эфемерид КА. Работа со спутниками осуществляется отечественными и зарубежными наземными квантово-оптическими средствами и до настоящего времени в интересах фундаментальной геодезии [10].

Одновременно с этим на навигационных спутниках были реализованы мероприятия по снижению уровня немоделируемых сил негравитационной природы за счет:

- исключения применения реактивных систем управления ориентацией КА и использования магнитных систем разгрузки маховиков системы ориентации;
- обеспечения высокоточной (± 1 угл. град.) ориентации солнечных батарей на Солнце и разработки специальных алгоритмов управления при прохождении малых и больших углов «Солнце-спутник-Земля» на теневых орбитах;
- уменьшения утечек вещества из замкнутых полостей КА (гермоконтейнер, привода, баки двигательной установки);
- уменьшения потерь вещества с поверхности космического аппарата за счет выбора мало газящих материалов;
- экранирования от Солнца подвижных механизмов КА, непрогнозируемо меняющих площадь его «солнечного миделя» (жалюзи СТР).

В результате этих работ уровень немоделируемых ускорений снизился до $5 \cdot 10^{-10}$ м/с².

В процессе летных испытаний системы ГЛОНАСС были подтверждены принципы навигационных определений, эфемеридного и частотно-временного обеспечения, создана служба высокоточного эфемеридно-временного обеспечения и соответствующее математическое обеспечение. Подтверждены новые технические решения по построению КА и его бортовых систем: высокостабильного стандарта частоты, магнитной системы раз-

грузки, гидразиновой двигательной установки, маховичной системы ориентации, одноконтурной (газовой) системы терморегулирования с жалюзи, аварийной закрутки КА для обеспечения живучести.

После завершения в августе 1991 года летных испытаний и последующего увеличения до 12 функционирующих на орбитах спутников система ГЛОНАСС в сентябре 1993 года распоряжением Президента РФ от 24.09.93 г. № 658-рпс была принята в эксплуатацию. Последующими ежегодными запусками по 9 КА в 1994 году и к концу 1995 года система ГЛОНАСС была развернута до полного состава (24 КА) [2; 3; 6; 7]. В марте 1995 года решением Правительства РФ система ГЛОНАСС была представлена для гражданского использования в международные организации (ИКАО, ИМО) на длительный период.

В целях снижения ежегодного количества запускаемых КА (9 КА) началась его модернизация в части увеличения ресурса до 5 лет и улучшения технических характеристик. Спутник «Глонасс-5» разрабатывался на основании решения Комиссии Президиума СМ СССР по ВПВ от 09.10.89 г. № 350. Однако в период с 1995 года по 2002 год в связи с недостаточным финансированием работы по поддержанию количественного состава орбитальной структуры и модернизации системы практически были приостановлены, прекращены изготовление и запуски КА для замены выработавших ресурс. В результате произошла деградация системы ГЛОНАСС (количество КА в орбитальной группировке уменьшилось до 7), исключившая возможность ее использования по целевому назначению.

Всего по программе создания системы ГЛОНАСС было изготовлено 88 КА «Глонасс» (87 запущено, 1 передан в качестве учебного пособия в Военно-космическую академию имени А.Ф. Можайского), 1 КА «Глонасс-5» и 2 пассивных КА «Эталон». При этом осуществлено 34 запуска по групповой схеме (3 КА) с космодрома «Байконур», из них 2 аварийных.

Признавая, что система ГЛОНАСС является национальным достоянием России, НПО ПМ совместно с кооперацией предприняло колоссальные усилия по восстановлению и развитию системы ГЛОНАСС, предложив кардинально модернизировать КА на базе задела по связным спутникам и перевести его изготовление из ПО «Полет» в НПО ПМ:

- установить бортовой процессор и аппаратуру межспутниковых измерений;
- повысить стабильность квантовых стандартов частоты до $1 \cdot 10^{-13}$ о.е.;
- сузить температурный диапазон в гермоконтейнере в районе размещения квантовых стандартов частоты до ± 1 °С с целью обеспечения стабильности бортовых стандартов частоты в условиях орбитального полета КА;
- расширить номенклатуру применяемых зарубежных ЭРИ, позволивших увеличить срок службы КА на орбите до 7 лет.

Предложения НПО ПМ, сформулированные в 1996 году в материалах дополнения к эскизному проекту, были одобрены и поддержаны заказчиком и использованы при принятии важных директивных документов, направленных на обеспечение функционирования системы ГЛОНАСС, ее модернизацию.

Конечным итогом этих работ стала разработка и утверждение федеральной целевой программы «Глобальная навигационная система» (утверждена постановлением Правительства РФ от 20.08.2001 г. № 587). Срок реализации программы – 2002–2011 годы [2; 3].

ФЦП «ГЛОНАСС» предусматривает два этапа в развитии космического сегмента:

- 1) на основе спутников «Глонасс-М» с 7-летним САС;
- 2) на основе спутников «Глонасс-К» с 10-летним САС.

Возрождение системы ГЛОНАСС началось с декабря 2003 года запусками КА «Глонасс-М» со сроком службы 7 лет и улучшенными ТТХ в составе блока вместе с двумя КА «Глонасс». Использование комбинированного запуска позволило начать летные испытания КА «Глонасс-М» с одновременным вводом в эксплуатацию КА «Глонасс», что приостановило деградацию космического сегмента. Для ускоренного развертывания ОГ

предложено летные образцы КА после испытаний в течение 0,5–1,0 года переводить в опытную эксплуатацию, а темп запусков довести до двух в год с ежегодным изготовлением 6 КА на двух рабочих местах одновременно. Это обеспечило в начале 2012 года возможность развернуть орбитальную структуру ГЛОНАСС навигационными КА «Глонасс-М» до штатного состава и создать орбитальный резерв [8].

Одновременно была разработана и частично реализована программа упреждающей летной квалификации новых космических технологий, предполагаемых для реализации на перспективных КА [9]. Для этого в процессе проектирования КА «Глонасс-М» был разработан унифицированный интерфейс, обеспечивающий установку в качестве дополнительной полезной нагрузки экспериментальной бортовой аппаратуры различного характера и целевого назначения с минимальными доработками КА. Программа упреждающей летной квалификации новых космических технологий уже частично реализована (табл. 2).

Космический эксперимент с излучением навигационных радиосигналов в диапазоне частот L3 на 5 лет раньше (запуск КА «Глонасс-К» в 2011 году) позволил России получить приоритет на его использование в системе ГЛОНАСС. Космический эксперимент с межспутниковой лазерной линией подтвердил возможность взаимного прецизионного наведения, измерения и информационного обмена.

Космические эксперименты с рубидиевыми стандартами частоты, бортовой ЦВМ, литийионными аккумуляторами подтвердили их работоспособность в реальных условиях космического пространства, что создало предпосылки их надежной эксплуатации в составе перспективного навигационного КА «Глонасс-К» негерметичного конструктивно-

Таблица 2

Номенклатура реализованных космических экспериментов

№	Наименование	Номер изделия	Дата запуска
1	Излучение новых радиосигналов в диапазоне L3	№ 14	25.12.05
2	Эксперимент с литий-ионными аккумуляторами	№ 27	26.12.08
3	Эксперимент с межспутниковой лазерной линией	№ 28, 29	26.12.08
4	Эксперимент с бортовой ЦВМ	№ 23	25.12.07
5	Эксперимент с рубидиевым стандартом частоты	№ 33	14.12.09
		№ 32	16.02.10

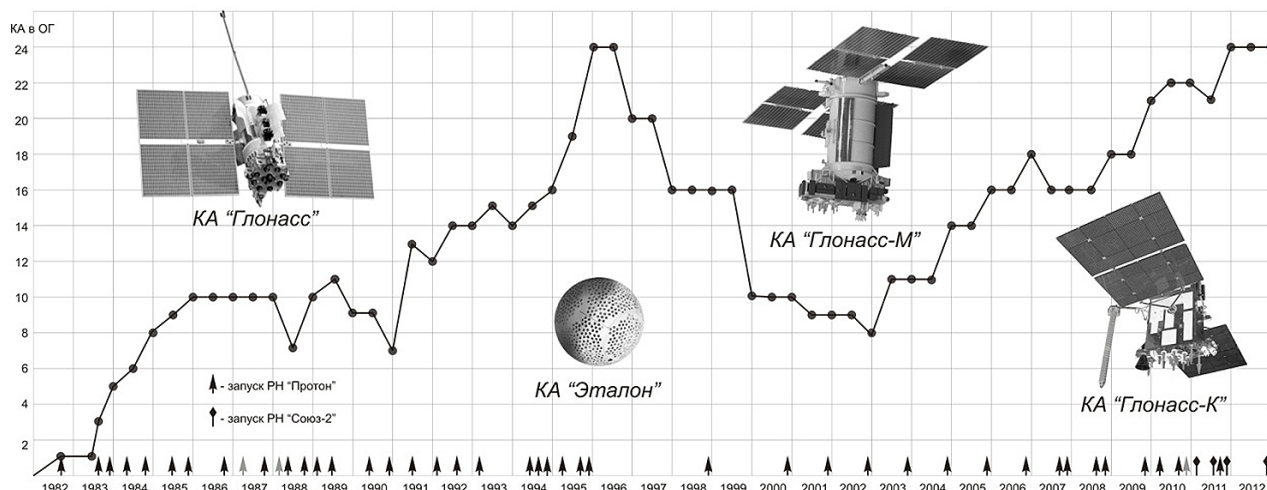


Рис. 2. Диаграмма развертывания орбитальной группировки системы ГЛОНАСС

го исполнения. В перспективе предусмотрено проведение экспериментов с датчиками системы ориентации, с системой прецизионной термостабилизации на базе плоских тепловых труб (гипертеплопроводящих пластин), с приемом запросного лазерного сигнала на КА, повторение экспериментов с межспутниковой лазерной линией.

На спутниках «Глонасс-М» также реализуется по заявкам программа размещения информационных пластинок (табличек). Всего на 15 спутниках «Глонасс-М» отправлены в космос 69 табличек со сведениями, увековечивающими память о более 600 создателях космической техники, важных вехам в истории страны, событиях планетарного масштаба (сайт www.glonass-post.narod.ru).

Всего в рамках ФЦП «Глобальная навигационная система» было изготовлено 36 КА «Глонасс-М». Первые 4 летных КА «Глонасс-М» запущены в составе комбинированного блока совместно с КА «Глонасс». При этом осуществлено 10 запусков по групповой схеме (3 КА) с космодрома «Байконур» (1 аварийный запуск) и 2 запуска по одиночной схеме (1 КА) с космодрома «Плесецк».

Следующей модификацией навигационных спутников в соответствии с ФЦП «Глобальная навигационная система» является КА «Глонасс-К» с 10-летним сроком службы и с негерметичным приборным блоком [6; 7].

На КА этой модификации, кроме наличия на нём аппаратуры межспутниковой радиолонии и аппаратуры обнаружения и засечки импульсных вспышек, возлагались дополнительные функции:

- излучение 2-компонентного навигационного сигнала в частотном диапазоне L3 (1,2 ГГц);
- излучение сигнала в см-диапазоне (~15 ГГц) для определения поправки курсоуказания как азимута фиксированного направления;
- обнаружение и ретрансляция сигналов аварийных радиобуев с объектов, терпящих бедствие, с целью оповещения о бедствии и местоположении терпящего бедствие объекта (функция спасания).

Запуск КА «Глонасс-К» планировался по групповой схеме (2 КА) с космодрома «Плесецк» РН «Союз-2Б» с РБ «Фрегат» (допустимая масса КА «Глонасс-К» 850 кг) или с космодрома «Байконур» РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» (РБ ДМ) в составе комбинированного блока совместно с КА «Глонасс-М» (масса не более 1100 кг).

К сожалению, реальная масса КА «Глонасс-К» выросла до 962 кг, что не обеспечивало групповой запуск (2 КА) РН «Союз-2Б» с РБ «Фрегат». Запуск КА «Глонасс-К» в составе комбинированного блока совместно с КА «Глонасс-М» также был отклонен, поскольку стояла задача ускоренного развертывания штатной орбитальной группировки (24 КА). Поэтому была реализована схема выведения одного КА «Глонасс-К» с космодрома «Плесецк» РН «Союз-2Б» с РБ «Фрегат» (26.02.2011 г). В настоящее время первый летный образец КА «Глонасс-К» проходит летно-конструкторские испытания. В 2013 году запланирован запуск второго летного образца КА «Глонасс-К». Последующие запуски КА «Глонасс-К» пока не планируются.

Перспективы развития космической навигации

Дальнейшие работы по системе ГЛОНАСС запланировано проводить в рамках федеральной целевой программы «Поддержание, развитие и использование системы ГЛОНАСС на 2012–2020 годы» (постановление Правительства РФ от 03.03.12 г. № 189).

Основными задачами программы являются:

1. Поддержание системы ГЛОНАСС с гарантированными характеристиками навигационного поля на конкурентоспособном уровне.
2. Развитие системы ГЛОНАСС в направлении улучшения ее тактико-технических характеристик с целью обеспечения паритета с зарубежными системами и обеспечения лидирующих позиций Российской Федерации в области спутниковой навигации.
3. Обеспечение использования системы ГЛОНАСС как на территории Российской Федерации, так и за рубежом.

В рамках работ по этой программе в части космического комплекса необходимо:

1. Разработать и провести летные испытания космического аппарата нового поколения «Глонасс-К2» с улучшенными тактико-техническими характеристиками и расширенными функциональными возможностями.
2. Провести обновление состава орбитальной группировки системы ГЛОНАСС космическими аппаратами «Глонасс-К2».
3. Завершить модернизацию наземного комплекса управления, комплексов средств формирования эфемеридной информации и синхронизации шкал времени и фундаментального сегмента системы ГЛОНАСС (геодезическое обеспечение, прогнозирование параметров вращения Земли, изучение геопотенциала).

На период разработки и проведения летных испытаний КА «Глонасс-К2» (до 2017 г.) для поддержания штатной орбитальной группировки необходимо изготовить и запустить на орбиту 14 серийных КА. В ФЦП предусмотрены запуски КА «Глонасс-М» по групповой (3) и одиночной (5) схемам. ОАО «ИСС» проработало альтернативную схему поддержания штатной орбитальной группировки запусками комбинированных блоков совместно КА «Глонасс-М» и КА «Глонасс-К» с помощью РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М» (РБ «ДМ»). По этой схеме изготавливаются 7 КА «Глонасс-М» (№ 47–54) и 7 КА «Глонасс-К» (№ 13–19) и запускаются по одиночной и групповой (комбинированный блок) схемам в зависимости от состояния орбитальной группировки. В результате за счет большего ресурса КА «Глонасс-К» получается экономия, эквивалентная по стоимости трем КА «Глонасс-М», а также ускоряется реализация системой новых функций: спасания и уточнения курсоуказания.

На космическом аппарате нового поколения «Глонасс-К2» (рис. 3) должны быть реализованы мероприятия, заданные в утверждённой в 2006 году заказчиками Программе обеспечения и повышения точностных и эксплуатационных характеристик системы ГЛОНАСС, в том числе модернизация излучаемых КА радионавигационных сигналов в направлении расширения номенклатуры и повышения их характеристик, как в интересах санкционированных (специальных), так и гражданских пользователей, а также обеспечения совместимости систем ГЛОНАСС, GPS, GALILEO: по системам координат и единому времени. Согласно этой программе, а также разработанной позже Концепции развития навигационных сигналов глобальной навигационной системы ГЛОНАСС предусматривается излучение сигналов с кодовым и частотным разделением в трех диапазонах L1 (1,6 ГГц), L2 (1,25 ГГц) и L3 (1,2 ГГц) (табл. 3).

Таблица 3

Номенклатура навигационных сигналов

№	Наименование КА	Частотное разделение	Кодовое разделение	Состояние
1	КА «Глонасс»	L1OF, L1SF, L2SF	–	Реализовано
2	КА «Глонасс-М»	L1OF, L1SF, L2OF, L2SF	–	Реализовано
3	КА «Глонасс-К»	L1OF, L1SF, L2OF, L2SF	L3OC	Реализовано
4	КА «Глонасс-К2»	L1OF, L1SF, L2OF, L2SF	L1OC, L1SC, L2SC, L2POC, L3OC,	Реализуется с 2015 г.

Таблица 4

Сравнение характеристик КА систем ГЛОНСС и GPS

Наименование	Глонасс-М	Глонасс-К	Глонасс-К2	Блок-ИИР-М	Блок-ИИФ	Блок-ИИ
1. Решаемые задачи:						
1.1. Количество и тип навигационных сигналов	L1OF, L1SF, L2OF, L2SF	L1OF, L1SF, L2OF, L2SF, L3OC	L1OF, L1SF, L2OF, L2SF, L1OC, L1SC, L2SC, L2POC, L3OC	L1P/Y, L1C/A, L1M, L2P/Y, L2M, L5	L1P/Y, L1M, L1C/A, L2M, L2P/Y, L2C, L5	L1P/Y, L1M, L1C/A, L1C, L2M, L2P/Y, L2C, L5
1.2. Межспутниковые измерения						
– радиодиапазон	+	+	+	+	+	+
– оптический диапазон	–	–	+	–	–	–
1.3. Задачи КОСПАС-САРСАТ		+	+	+	+	+
1.4. Дополнительные задачи	1	2	6	Н.Д.	заложены резервы ресурсов	
2. Мощность БС в конце САС, Вт	2200	2265	6240	1136	2400	Н.д.
3. Масса КА, кг	1415	935 (962)	1645	1075	1559	1800
4. Технический полетный ресурс	7	10	12,5	10	12	12
5. Срок активного существования, лет	7	10	10	7,5	9,9	Н.Д.
6. Год первого запуска	2003	2011	2014	2005	2010	2014
7. Точность местоопределения (с вероятностью 0,95), м	7–18	6–12	1	3	3	2,5

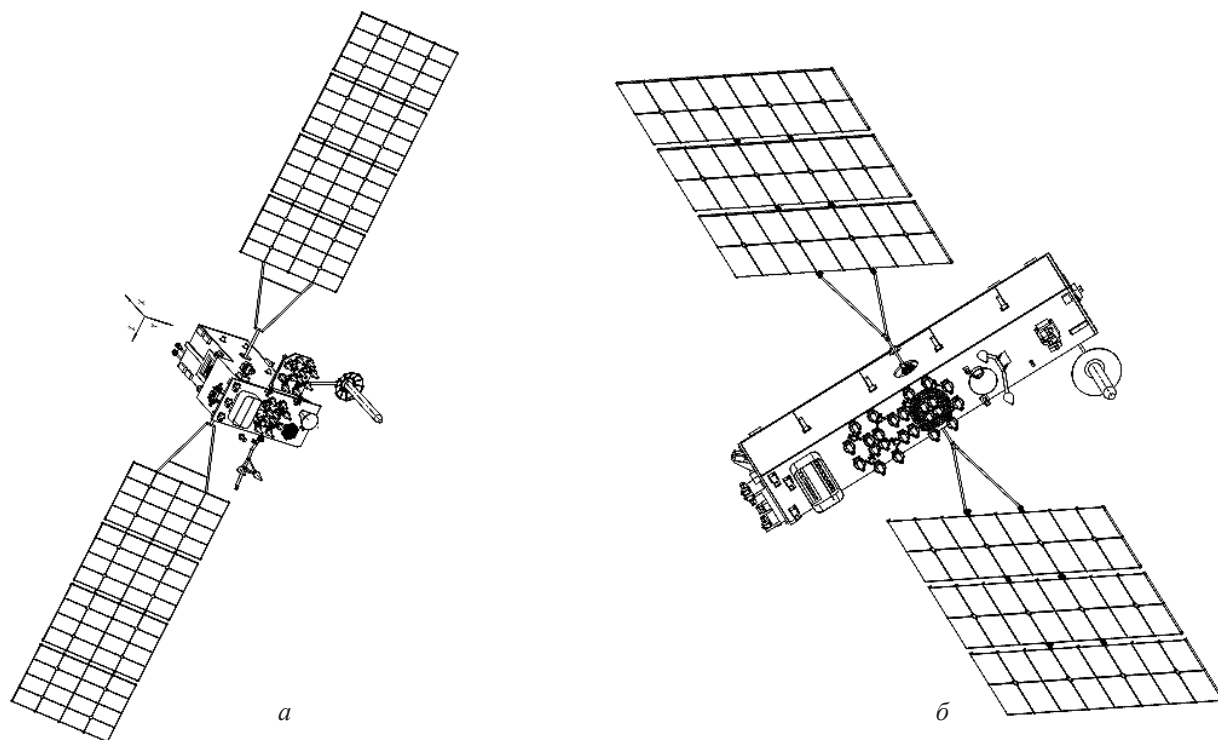


Рис. 3. Перспективные космические аппараты системы ГЛОНАСС: а – КА «Глонасс-К2» – эскизный проект; б – КА «Глонасс-К2» – технический проект

По результатам эскизного проектирования (2010 г.) навигационный КА «Глонасс-К2», удовлетворяющий требованиям по расширению номенклатуры навигационных сигналов и решаемых задач получился с увеличенными массовыми и габаритными характеристиками, ограниченными возможностями средств выведения: одиночная схема с помощью РН «Союз-2» с РБ «Фрегат» и групповая схема (2 КА) с помощью РН «Протон-М» с РБ «Бриз-М».

Дальнейшие проработки ОАО ИСС показали возможность размещения трех КА в зоне полезного груза РН «Протон-М» за счет применения оригинальной компоновки негерметичной схемы КА. Этот вариант проектного облика КА «Глонасс-К2» был одобрен Советом главных конструкторов (март 2011 г.) и заложен в реализацию.

К моменту завершения этапа ФЦП (2020 г.) космический комплекс системы ГЛОНАСС должен обеспечивать характеристики, сопоставимые с зарубежным аналогом (табл. 4).

В заключение можно констатировать, что отечественная космическая навигация создавалась поэтапно, усилиями военных и гражданских специалистов из различных организаций и предприятий нашей страны.

В процессе реализации такого крупномасштабного проекта было преодолено множество научно-технических проблем и получено множество технических решений, защищенных авторскими свидетельствами и патентами. Космическая навигационная система ГЛОНАСС является национальным достоянием России и предоставляет услуги отечественным и зарубежным мобильным потребителям на бесплатной основе. Будущее системы ГЛОНАСС связано с эффективной

интеграцией с зарубежными навигационными системами для повышения надежности и качества навигационных услуг.

Библиографические ссылки

1. Сетевые спутниковые радионавигационные системы / В. С. Шебшаевич, П. П. Дмитриев, Н. В. Иванцевич [и др.] ; под ред. В. С. Шебшаевича. 2-е изд. перераб. и доп. М. : Радио и связь, 1993. 408 с.
2. Тестоедов Н. А., Косенко В. Е., Попов В. В., Звонарь В. Д., Чеботарев В. Е., Яковлев А. В. Космические аппараты информационного обеспечения – успехи преемственного развития // Успехи современной радиоэлектроники: научно-технический журнал. М. : Радиотехника, 2012. № 9. С. 111–118.
3. Академик Михаил Федорович Решетнев / А. Г. Козлов [и др.] // Науч.-произв. об-ние прикл. механики. Железногорск, 2006. 334 с.
4. Скубко Р. А., Мордвинов Б. Г. Спутник у штурвала. Л. : Судостроение, 1989. 208 с.
5. Международная космическая радиотехническая система обнаружения терпящих бедствие / А. И. Балашов, Ю. Г. Зубарев, Л. С. Пчеляков [и др.]. М. : Радио и связь, 1987. 376 с.
6. Чеботарев В. Е., Косенко В. Е. Основы проектирования космических аппаратов информационного обеспечения // Сиб. гос. аэрокосм. ун-т. Красноярск, 2011. 488 с., [24] с ил.
7. ГЛОНАСС. Принципы построения и функционирования / В. Е. Косенко, А. И. Перов, В. Н. Харисов, В. Е. Чеботарев [и др.] ; под ред. А. И. Перова, В. Н. Харисова. 4-е изд., перераб. и доп. М. : Радиотехника, 2010. 800 с., ил.
8. Использование пассивных КА для повышения точности фундаментальных геодезических параметров / В. Е. Косенко, В. Ф. Черемисин, В. Е. Чеботарев [и др.] // Геодезия и картография. 1993. № 12. С. 21–23.

*Статья поступила в редакцию
29.05.2013 г.*