

Спутниковая навигация

В. Е. ЧЕБОТАРЕВ,

кандидат технических наук

НПО прикладной механики им. М.Ф. Решетнева
(г. Железногорск)

Навигация – это наука о способах выбора пути, методов вождения транспортных средств. Задача навигации: найти безопасный и выгодный маршрут, определять местоположение, направление и значение скорости, а также другие параметры движения. Важное место в современной хозяйственной деятельности человека занимают космические спутниковые



навигационные системы. Они являются уникальным средством высокоточного определения координат любых стационарных и движущихся объектов – место работы геологических партий и строящихся сооружений, наземного и морского транспорта, авиации, а также поиска и спасения терпящих бедствие людей, попавших в аварию судов и самолетов.

ОТ КОМПАСА ДО “ГЛОНАССа”

С незапамятных времен люди, чтобы ориентироваться на местности, использовали наиболее яркие светила: Солнце, Луну и звезды. В моменты их восхода, кульминации и захода можно визуально определить общее направление движения. Изобретение компаса позволило решать эту задачу вне зависимости от погодных условий и времени суток. Узнают местоположение объекта на поверхности Земли, измеряя параметры небесных светил отно-

сительно наблюдателя и по известным угловым координатам светил относительно центра масс Земли. По точному времени проведения измерения вычисляют географическую широту и долготу. Такая возможность появилась после разработки теоретических основ небесной механики и создания специальных астрономических календарей с прогнозируемыми положениями светил на небесной сфере на длительный интервал (год и более).

Еще в начале XVIII в. английское правительство

установило высокую премию (30 тыс. фунтов стерлингов) за надежный способ определения местоположения корабля с точностью 0.25° (около 25 км). Это стимулировало работы по совершенствованию методов навигации, созданию высокоточных хронометров и компактных приборов, позволяющих в условиях качки достаточно быстро найти широту и долготу с погрешностью до десятков километров.

Когда изобрели радиосвязь, появилась надежда, что будет создана всепогодная глобальная ра-

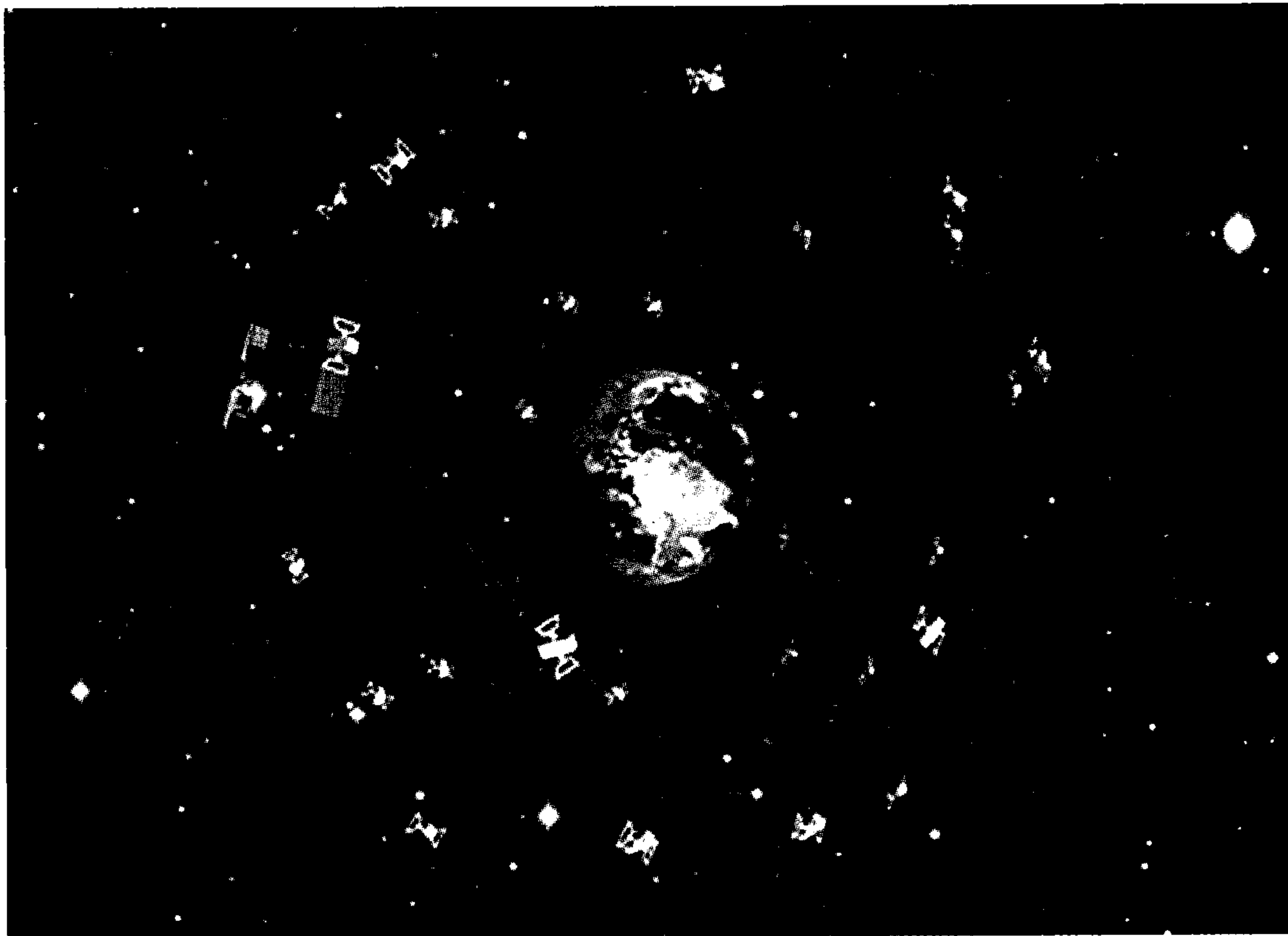


Схема построения космических навигационных систем, показывающая размещение космических аппаратов в трех плоскостях орбит (по восемь спутников в каждой).

ции состоит в последовательном приеме пользователем радиосигналов от всех радиостанций. Это позволяет определять дальность до каждой из них по величине запаздывания приходящего импульса относительно опорного. Затем, взяв из каталога известные координаты данных радиостанций, вычисляют долготу и широту с точностью до 3–5 км. Солнце тоже может быть использовано как источник радиосигнала.

После запуска первого ИСЗ (4 октября 1957 г.) были разработаны методы использования спутников в качестве радионавигационных точек и намечены пути их реализации. В 1958 г. ВМС США приступили к созданию навигационных ИСЗ **“Transit”** (1960–1973), аналогичные советские навигационные спутники появились в 1967 г. (**“Космос-192 и -220”**). Уже в начале 1970-х гг. на орбитах были развернуты полномасштабные навигационные спутниковые системы, содержащие 4–6 КА. В настоящее время в интересах морских потребителей развернуты и успешно эксплуатируются навигационные спутниковые системы двойного назначения

первого поколения: **“Transit”** в США, **“Парус”** (1976) и **“Цикада”** (1979) в нашей стране. Впоследствии были созданы глобальные навигационные спутниковые системы второго поколения, работающие на новых принципах и других орбитах – американская **“GPS”** (Global Positioning System – глобальная позиционирующая система, запуски осуществляются с 1978 г.) со спутниками **“Navstar”** и отечественная **“ГЛОНАСС”** (глобальная навигационная спутниковая система, с 1982 г.) со спутниками серии **“Глонасс”** (запускаются под индексом **“Космос”**). В настоящее время на смену навигационным системам второго поколения приходят модер-

низированные навигационные космические системы.

ПРИНЦИП КОСМИЧЕСКОЙ НАВИГАЦИИ

Для космических навигационных систем первого поколения были выбраны близкие к круговым приполярные орбиты высотой около 1 тыс. км и наклоном 80° . Благодаря высокому наклону орбиты и вследствие вращения Земли дважды за сутки обеспечивается с помощью одного спутника обзор потребителя, расположенного в любом месте на поверхности Земли. Использование нескольких спутников (4–6) повышает частоту навигационных определений до величины, кратной периоду обращения спутника (около 1.5 ч). Для навигационных систем первого поколения, использующих доплеровский метод навигации, потребитель по одному прохождению КА в зоне радиовидимости за 6–15 мин осуществляет измерения доплеровского приращения частоты, прием эфемеридно-временной информации и шкалы времени спутника. По результатам измерений и с использованием принятых со спутника навигационных данных потребитель определяет поправки к широте и долготе, а также уточняет собственную шкалу времени. Такого класса космические системы вполне удовлетворяют потребностям навигационного обеспечения судоходства и ряда наземных потребителей, нужда-

ющихся только в координатах на поверхности Земли (широта и долгота) и не требующих высокой оперативности навигационных определений. Комплекс навигационного радиотехнического оборудования позволяет определять с точностью до сотен метров (расположение объекта на поверхности Земли) и до миллисекунд (поправка к собственной шкале времени).

Космические навигационные системы используют пассивный режим проведения измерений (без излучения сигнала), что позволяет принимать навигационный сигнал неограниченному количеству пользователей, имеющих навигационную аппаратуру. Спутниковые навигационные определения, во-первых, связаны с необходимостью высокоточного прогнозирования положения спутника на любой момент движения по орбите (эфемеридная информация), во-вторых, с использованием высокоточной спутниковой шкалы времени на основе атомных стандартов частоты и соответствующего навигационного сигнала высокой стабильности, в-третьих, с передачей эфемеридно-временной информации в составе радионавигационного сигнала потребителю. Чтобы выполнить перечисленные требования, создали обширную службу эфемеридно-временного и геодезического обеспечения в составе наземного комплекса управления.

Радиотехнические средства наземного комплекса

управления осуществляют измерения параметров движения КА и сверку бортового времени с наземным. По результатам измерений производится расчет параметров орбиты и прогнозирование движения спутника на заданной орбите на несколько суток вперед (эфемериды), а также степени ухода бортовой шкалы времени. Полученная эфемеридно-временная информация закладывается в бортовую программу КА и затем последовательно во времени передается в навигационном сигнале на Землю потребителю. В задачу наземного комплекса управления входит также управление полетом КА по радиокомандам или по программным командам на заданном интервале времени с контролем его состояния.

КОСМИЧЕСКИЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ

Возросшие масштабы и интенсивность грузопотоков, связанный с этим рост аварий судов и самолетов обусловили необходимость объединения усилий мирового сообщества в создании глобальной оперативной системы поиска и спасения на базе спутниковых навигационных систем первого поколения. Разрабатывать такую систему (“КОСПАС–САРСАТ”) начали в 1977 г. научно-технические коллективы в СССР, США, Канаде и Франции (первые спутники “Космос-1000” и “NOAA-8” стартовали в 1978 г. и 1982 г., с 1989 г. стали за-



Схема работы космической системы "КОСПАС-САРСАТ". От радиобуя, сброшенного с терпящего бедствие судна, сигнал поступает на космический аппарат, потом ретранслируется на близлежащие к судну станции. Там информацию обрабатывают, вычисляют координаты местоположения радиобуя и передают в национальные центры, а затем — поисково-спасательной службе.

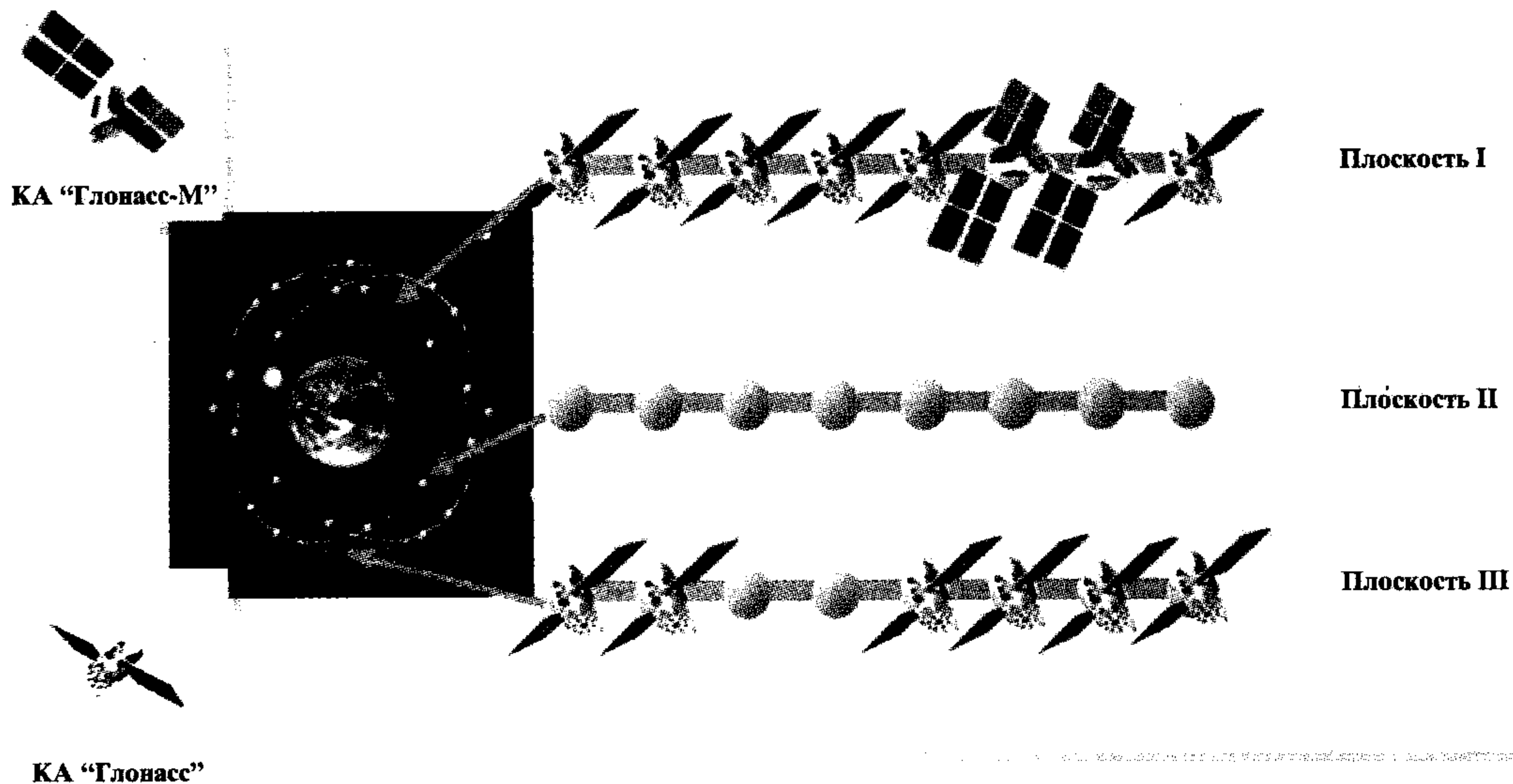
пускать новые отечественные ИСЗ серии "Надежда"). Каковы же принципы обеспечения поиска и спасения? В случае аварии с судна сбрасывается и включается аварийный радиобуй, непрерывно передающий радиосигналы, которые через космические аппараты ретранслируются на наземный

пункт приема и передачи информации. По данным измерений с наземных пунктов в центре спасения определяют местоположение радиобуя и выдают координаты места катастрофы специальным службам для организации поиска и спасения потерпевших. По своим характеристикам такая система удовлетворяет требованиям морской и авиационной поисково-спасательных служб и значительно повышает эффективность проведения спасательных операций. С 1982 г., когда система вступила в действие, спасены тысячи людей.

Эксплуатация спутниковых радионавигационных систем первого поколения, с одной стороны,

продемонстрировала потенциальные возможности космической навигации и привлекла внимание различных потребителей, а с другой, выявила ограничения в применении систем такого класса.

Проектирование навигационных спутниковых систем второго поколения в США и СССР проводилось в целях удовлетворения требований всех классов стационарных и мобильных морских, наземных, воздушных и космических потребителей. В результате были сформулированы основные требования к разрабатываемым спутниковым радионавигационным системам: глобальная зона обслуживания (поверхность Земли и



околоземного воздушного и космического пространства); условия обслуживания вне зависимости от времени года, суток и метеоусловий; обеспечение высокоточных определений пространственных координат и скорости в любой момент времени. В итоге были созданы две глобальные навигационные космические системы второго поколения: в США – "GPS" (1993) и в России – "ГЛОНАСС" (1995). Стоимость разработки такого класса многоспутниковых систем составляет несколько миллиардов долларов. По основным характеристикам (точность, оперативность, доступность, надежность) обе системы оказались равноценными, и принцип их работы одинаков. Чтобы обеспечить требования по глобальности применения, оперативности и качеству навигационных определений, используется разно-одно-дальномерный ме-

тод: одновременное измерение дальностей от подвижного потребителя до не менее чем четырех спутников, находящихся в зоне радиовидимости. Этому условию удовлетворяет орбитальная группировка из 24 спутников на близких к круговым орбитах высотой около 20 тыс. км и наклоном 55° – 65° , при координации их взаимного положения в пространстве и синхронизации бортовых шкал КА со шкалой времени наземного комплекса управления.

Разработкой отечественных космических навигационных систем и спутников (Земля и Вселенная, 2004, № 6) занимается **НПО прикладной механики им. академика М.Ф. Решетнева**. В системе "ГЛОНАСС" орбитальная группировка штатного состава содержит 24 спутника, обращающихся на орбитах с наклоном 64.8° и сгруппированных в трех орбитальных плоскостях, раз-

Программа модернизации российской космической навигационной системы "ГЛОНАСС" в 2003–2007 гг. (слева – схема размещения спутников в трех плоскостях орбиты). В декабре 2005 г. планируется вывести на орбиты два КА "Глонасс-М" и один "Глонасс". Рисунок НПО прикладной механики.

несенных по долготе восходящего узла на 120° (по восемь спутников в каждой плоскости). В плоскости орбиты спутники размещены равномерно (через 45°), и это взаимное положение поддерживается в заданных пределах ($\pm 5^{\circ}$). Спутники в соседних орбитальных плоскостях сдвинуты относительно базовой на 15° по аргументу широты (в плоскости орбиты). Номинальный период обращения каждого спутника составляет 11 ч 15 мин 44 с (высота 19140 км) и реализуется с высокой точностью после приведения спутника в рабочую точку с помощью бортовой сис-

темы коррекции полета. Это позволяет не проводить в последующем коррекцию орбиты спутника в течение длительного срока его активного функционирования на орбите, так как спутник не уходит вдоль орбиты в заданные пределы точки размещения ($\pm 5^\circ$).

В американской космической системе "GPS" вначале была опробована аналогичная структура орбитальной группировки, но затем перешли на новую: шесть плоскостей (наклонение 55°) по четыре спутника в каждой плоскости на орбите высотой 20 200 км. Такое различие орбитальных группировок обусловлено следующими факторами:

- система "ГЛОНАСС" дает большую точность навигации в высоких широтах, что для отечественных пользователей более приемлемо;

- групповая схема выведения на орбиту (по три КА одновременно) в системе "ГЛОНАСС" экономически целесообразнее;

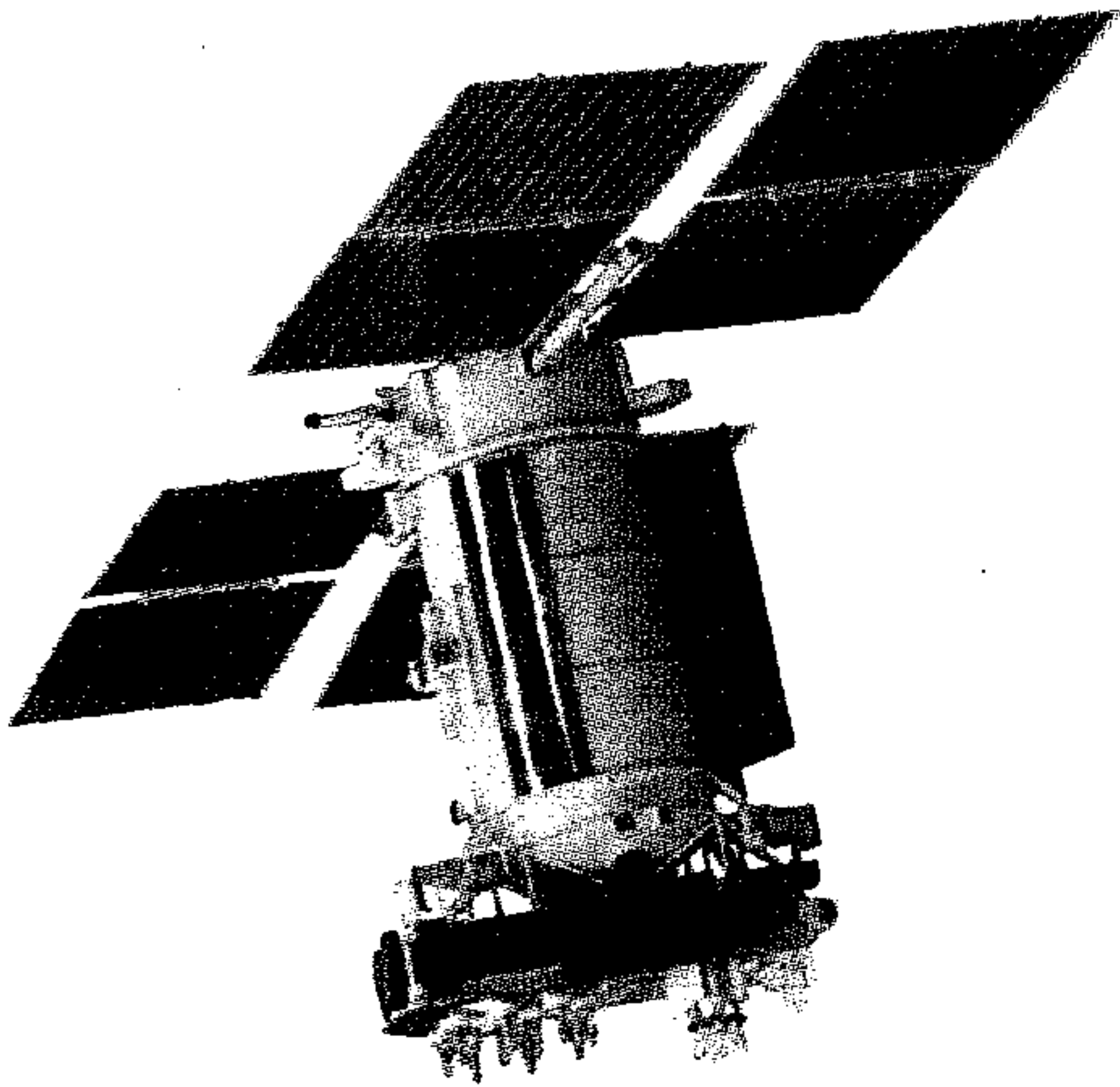
- использование средств наземного комплекса управления, размещаемых на северных широтах при высокоточном эфемеридно-временном обеспечении, эффективнее в системе "ГЛОНАСС".

Навигационные сигналы, излучаемые спутниками систем "GPS" и "ГЛОНАСС", обладают общими чертами и существенными различиями по частотному диапазону и структуре навигационной информации. Чтобы исключить ионосферные ошибки в определении дальности, на

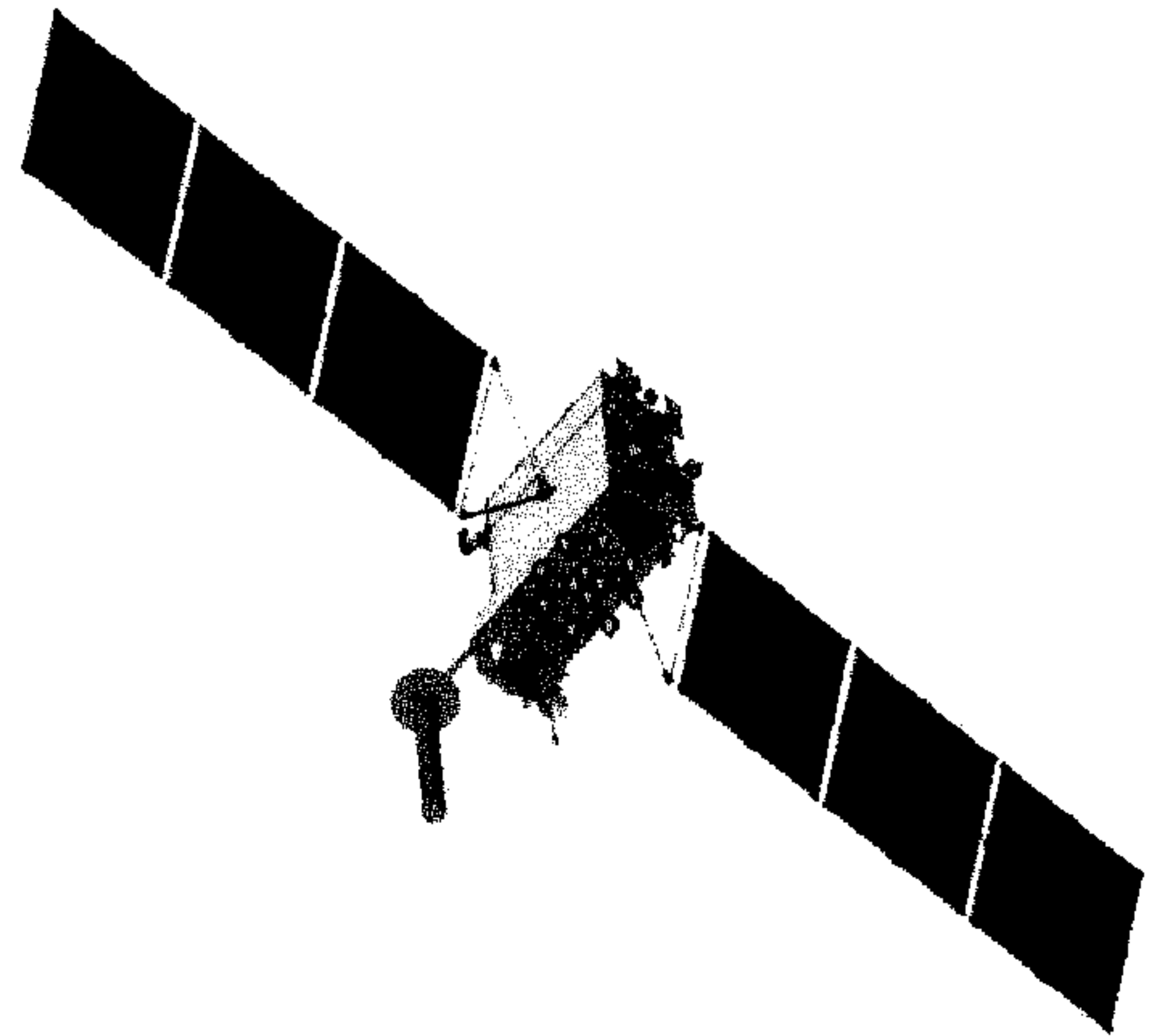
каждой из двух частот передаются два типа сигналов, стандартной и высокой точности. Сигналы стандартной точности предназначены для использования гражданскими потребителями. Сигналы высокой точности модулированы специальным кодом и доступны только специальным пользователям. Для исключения помех от разных электронных систем спутника их частотные диапазоны разнесены. Одновременный прием сигнала от четырех и более спутников обеспечивается введением различной литерности сигналов для каждого спутника. При этом в системе "ГЛОНАСС" различная литерность строится за счет частотного разделения сигналов, а в "GPS" – кодового разделения. Космический сегмент системы "GPS" постоянно совершенствуется – на смену первым спутникам "Navstar" серии Block-I (1978) и Block-II (1989) пришли Block-IIIF (2002) с улучшенными эксплуатационными характеристиками. Ведутся работы по созданию спутника нового поколения "Navstar" Block-III.

Система "ГЛОНАСС" в 1995 г. была принята в эксплуатацию в штатном составе из 24 КА "Глонасс" и не модернизировалась вплоть до 2001 г., что привело к деградации орбитальной группировки и снижению ее выходного эффекта. В целях сохранения и развития системы "ГЛОНАСС" в 2000–2001 гг. президент РФ и правительство утвердили ряд директивных документов,

основным из которых стала федеральная целевая программа "Глобальная навигационная система". В соответствии с этой программой модернизация системы осуществляется в два этапа. Сначала (2002–2005) разрабатывается модернизированный КА серии "Глонасс-М", и на его базе состав орбитальной группировки доводится до 18. На втором этапе (2006–2011) создаются КА серии "Глонасс-К" с малыми массой и габаритами, орбитальная группировка увеличивается до штатного состава (24 КА) и поддерживается периодическими запусками спутников "Глонасс-К" на смену отказавшим. На космических аппаратах "Глонасс-М и -К" предусмотрены резервы массы для размещения дополнительной полезной нагрузки. Пока ее нет, эти резервы используются для размещения информационных пластин по заявкам организаций и отдельных персон (www.pprort.ru). Информационные пластины сделаны из алюминия толщиной 1 мм и размером 120×260 мм, на которые с помощью гравирования наносятся графические изображения и текст объемом до 500 знаков. На орбитах высотой около 20 тыс. км спутники даже после прекращения активного функционирования будут находиться около 1 млн. лет. Первый КА "Глонасс-М" (вместе с двумя спутниками "Глонасс") запущен 10 декабря 2003 г., второй – 26 декабря 2004 г. На втором спутнике раз-



а



б

мещено шесть информационных пластин, на одной из них представлен текст обращения к потомкам, составленный автором данной статьи. Разработку КА серии "Глонасс-К" предполагается завершить в 2007 г., а первый запуск запланирован на начало 2008 г.

ВОЗМОЖНОСТИ СИСТЕМ ВТОРОГО ПОКОЛЕНИЯ

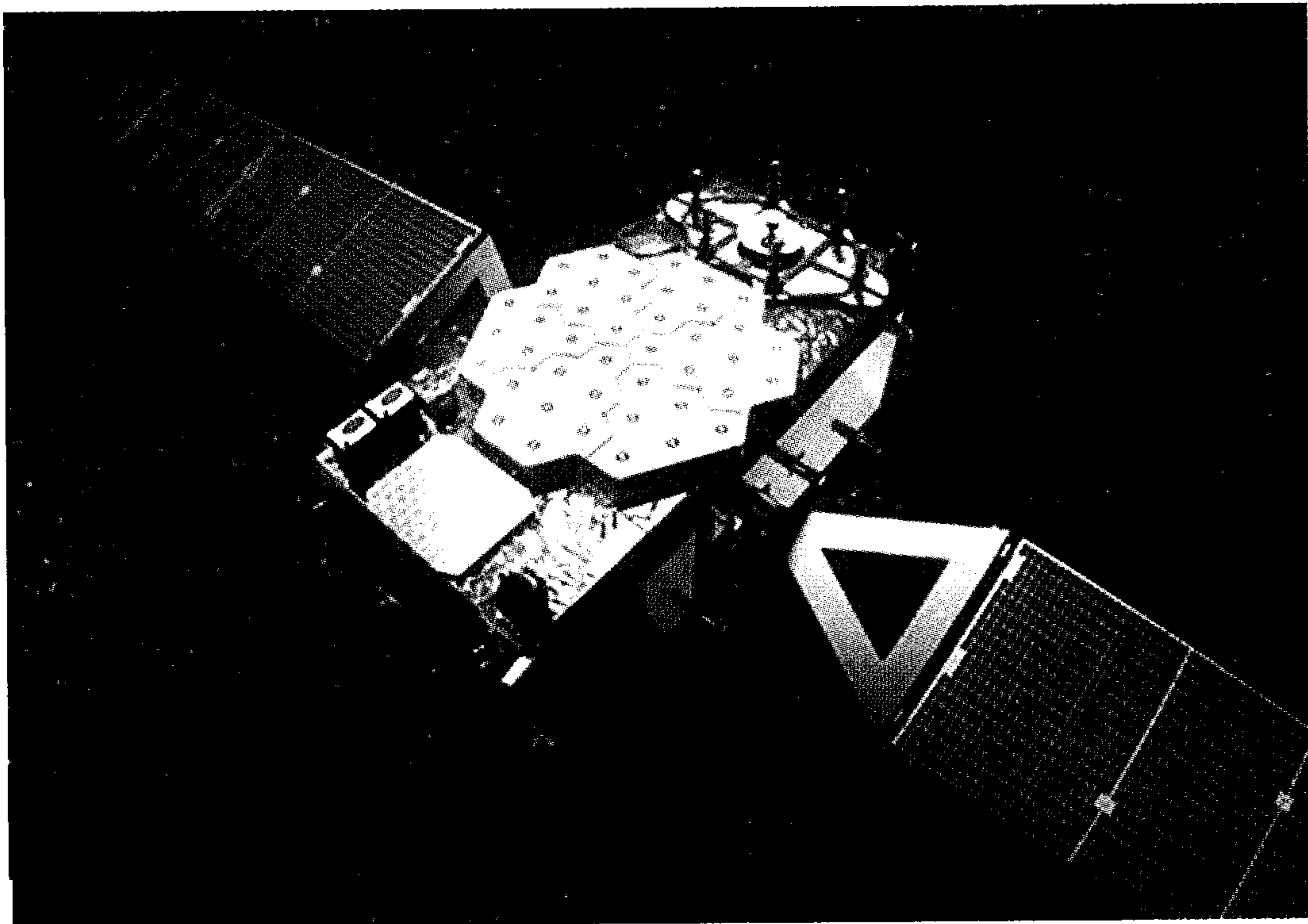
Высокое качество навигационного обеспечения, предоставляемого космическими навигационными системами второго поколения, привело к широкому внедрению в международном масштабе навигационных технологий во все транспортные средства (морские, наземные, воздушные, космические) различной ведомственной принадлежности (гражданские и военные). В настоящее время, как уже говорилось, эксплуатируются две сравнимые по качеству навигационного обеспечения космические глобальные системы "GPS" и "ГЛО-

НАСС", предназначенные для гражданских потребителей. Главные различия состоят в технической реализации, алгоритмах формирования навигационных сигналов на спутнике, системах отсчета времени и координат, разных частотах сигналов и структуре навигационной информации, передаваемой пользователю. Однако принципы построения, архитектура и виды предоставляемых услуг в обеих системах во многом схожи. Это позволило интегрировать две независимо функционирующие системы путем создания интегрированной навигационной аппаратуры пользователя GPS/ГЛОНАСС. При этом повысилась эффективность навигационного обеспечения, поскольку в результате объединения двух орбитальных группировок количество одновременно видимых спутников в зоне радиовидимости увеличивается, что парировает факторы экранирования при работе потребителя в сложных условиях.

Навигационные спутники второго поколения российской системы "ГЛОНАСС": а) "Глонасс-М" (запускаются с 2003 г.); б) "Глонасс-К" (планируется выводить на орбиту с 2008 г.). Рисунки НПО прикладной механики.

Кроме того, улучшились помехоустойчивость, точность (выбирается оптимальное количество спутников) и надежность навигационного обеспечения за счет возможности отбраковки спутников с недостоверным навигационным сигналом. Несмотря на достаточно высокую точность навигационных определений (в пределах 10 м), обеспечиваемых обеими системами, в настоящее время ведутся работы по созданию функциональных дополнений к ним, реализующих дифференциальный режим.

С целью получения точной информации для потребителей создана система наземных корректирующих станций, размещаемых в пунктах с известными координатами. Они измеряют дальности до всех ви-



Европейский навигационный спутник перспективной спутниковой системы "Galileo" (первый запуск двух КА планируется в 2006 г.). Рисунок EADS.

димых спутников, определяют дифференциальные поправки между вычисленными по измерениям и известными координатами, а затем передают их потребителю. Он проводит свои независимые измерения навигационных параметров, определяет координаты и уточняет их на основе полученных дифференциальных поправок, которые передаются с наземной корректирующей станции потребителю через спутник связи или непосредственно по прямой радиолнии, используя специальный радиоканал. Разработаны варианты диффе-

ренциальных подсистем с использованием спутников на геостационарной орбите в качестве ретранслятора корректирующей информации (дифференциальных поправок) и дополнительного источника навигационного сигнала. Дифференциальный режим позволяет повысить относительную точность навигационных определений до 1–5 м (в ближней зоне работы контрольно-корректирующей станции). Поэтому метод применим для навигационного обеспечения самолетов вблизи аэропортов, где расположена станция, морских судов недалеко от гаваней и т.д. Разработан вариант реализации дифференциального режима с использованием псевдоспутника. Псевдоспутник размеща-

ется на Земле и излучает навигационный сигнал, аналогичный спутниковому. При этом псевдоспутник становится дополнительной радионавигационной точкой, что повышает точность и надежность навигационных определений.

Созданное к настоящему времени единое радионавигационное поле Земли с помощью космических систем "GPS" и "ГЛОНАСС", дифференциальных дополнений к ним, наземных систем ближней и дальней навигации обеспечивает высокоточное оперативное глобальное навигационное определение подвижных потребителей любого типа и класса, а также оперативную геодезическую привязку к местности. Оснащение потребителя навигационной

аппаратурой и дополнительным каналом радиосвязи с наземной диспетчерской службой позволяет организовать оперативное и надежное наблюдение за движением наземного, морского и воздушного транспорта. Диспетчер получает данные о местоположении подвижного пользователя, сопоставляет их с плановым маршрутом, корректирует движение, чтобы избежать аварийной ситуации и обменивается информацией с потребителем по служебной радиолинии.

Создаваемая на базе спутниковых систем навигации, связи и наблюдения служба управления движением предъявляет весьма

жесткие требования к надежности и доступности навигационного сигнала, что необходимо для обеспечения безопасности пассажиров. Не случайно страны Европейского союза решили создать навигационную спутниковую систему "Galileo" к 2007–2010 гг., по структуре и методу решения задачи подобную "GPS" и "ГЛОНАСС". Затраты на ее развертывание оценивают в 3.5 млрд. евро. Предполагается, что потребитель должен обладать навигационной аппаратурой пользователя, принимающей сигналы как от системы "Galileo", так и от систем "GPS" или "ГЛОНАСС".

Разработка космической навигационной системы нового поколения создала предпосылки совершенствования транспортных средств: увеличение скорости их движения на загруженных маршрутах, повышение пропускной способности портов и безопасности движения. В настоящее время формируется глобальное навигационное поле, обеспечивающее высокое качество навигации всех типов и классов подвижных потребителей с высокой надежностью и доступностью при любых условиях эксплуатации, а также наблюдение за их перемещением.

Информация

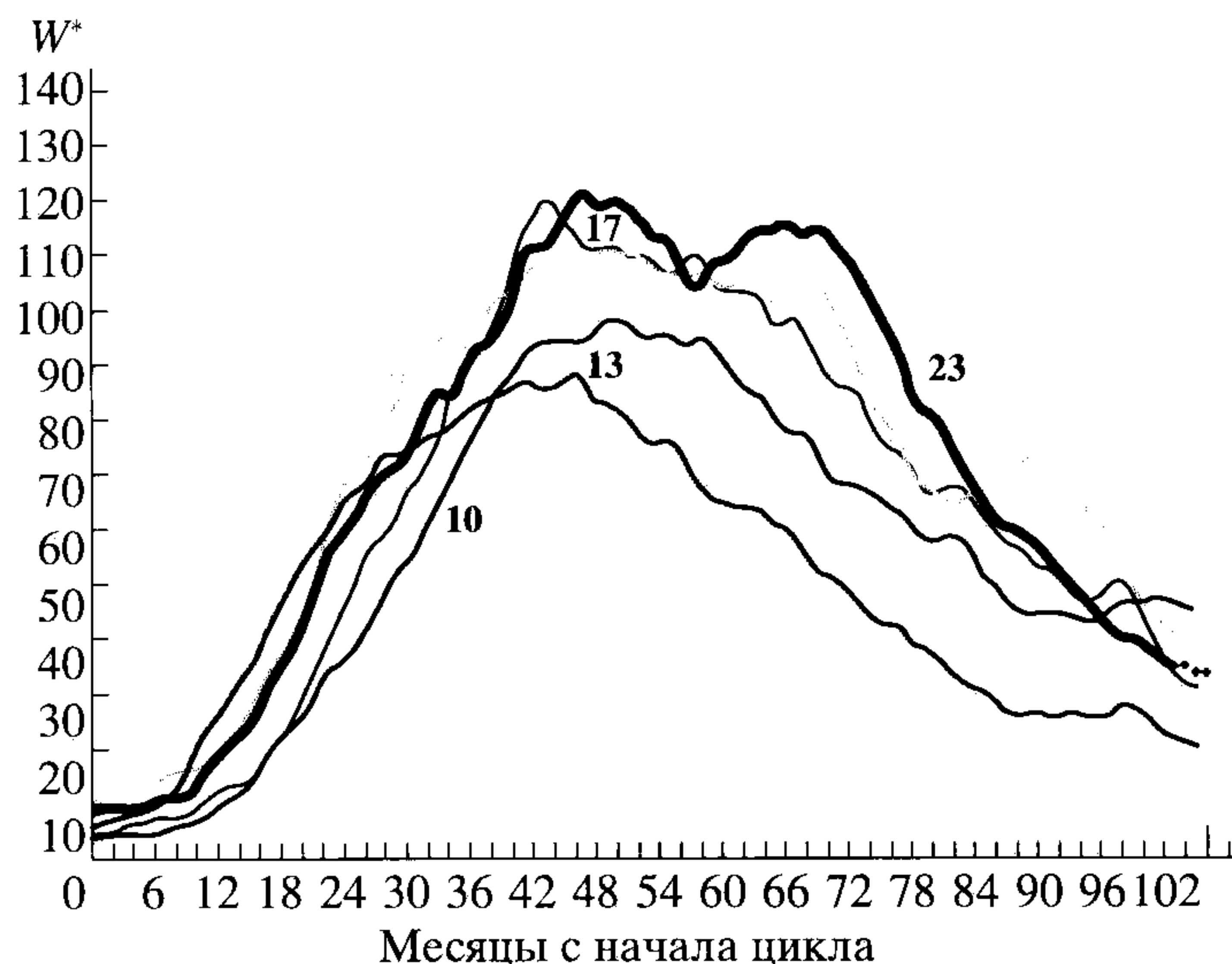
Солнце в августе–сентябре 2005 г.

В конце лета–начале осени 2005 г. уровень солнечной активности в очередной раз резко повысился. За время двух последовательных оборотов Солнца по его Северному полушарию проходила большая группа пятен. Максимум вспышечной активности в данной области пришелся на конец первой и начало второй декады сентября. Однако пятнообразовательная деятельность держалась в основном на среднем уровне, иногда спадая до низкого. Среднемесячные зна-

чения относительного числа солнечных пятен: $W_{авг} = 36.4$ и $W_{сент} = 22.1$.

Напомним, что максимум текущего солнечного цикла

наступил в апреле 2000 г. ($W_{max}^* = 121.7$, $F_{10\text{ см}}^* = 181$), вторичный максимум – в ноябре 2001 г. ($W^* = 115.6$, $F_{10\text{ см}}^* = 193.6$).



Ход развития (за 106 месяцев) текущего 23-го цикла солнечной активности среди аналогичных циклов. W^* – сглаженные за 13 месяцев относительные числа солнечных пятен (числа Вольфа).