

## ОБ ИСТОРИИ АВТОМАТИЗАЦИИ БАЛЛИСТИКО-НАВИГАЦИОННОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ ПРОГРАММ В СССР И РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Сергей Яковлевич Нагибин<sup>1</sup>, Владимир Григорьевич Ровенко<sup>2</sup>,  
Владимир Владимирович Ясюкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),  
Москва, Российская Федерация, nsy7@rambler.ru*

<sup>2</sup> *НИЦ (г. Королёв) ЦНИИ ВКС, Королёв, Российская Федерация, 93764.19@gmail.com*

**Аннотация** – Создание и развитие баллистико-навигационного обеспечения происходило в соответствии с реализацией космических программ и развитием вычислительной техники. В докладе дается краткий обзор создания баллистико-навигационного обеспечения для космических программ. Прослежен путь модернизации специального программного комплекса на машинах БЭСМ-6, АС-6, ПМ-6, дальнейшего развития программного обеспечения БНО на вычислительном комплексе ВС1-К2, а затем на «Эльбрус 1-КБ». Авторы – участники описываемых событий.

**Ключевые слова** – баллистико-навигационное обеспечение, космический аппарат, вычислительный комплекс, БЭСМ-6, автоматизированный комплекс программ.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Запуск первого в мире искусственного спутника Земли (ИСЗ) в СССР послужил началу создания новой области научной деятельности – баллистико-навигационного обеспечения (БНО) управления полетом космических аппаратов, становление и развитие которой тесно связано с развитием вычислительной техники.

С созданием в СССР первых образцов электронно-вычислительной техники появились новые возможности по разработке программного обеспечения БНО пусков ракет-носителей (РН) и управления полетом искусственных спутников Земли.

Исторически сложилось так, что основные вопросы баллистического обеспечения космических систем разрабатывались силами сотрудников засекреченных военных НИИ (НИИ-4, ЦНИИ-50). Если разработчиков ракет-носителей, космических аппаратов (С.П. Королева, Н.А. Пилогина, В.И. Кузнецова, М.С. Рязанского, В.П. Глушко, В.П. Бармина, В.Н. Челомея, Б.Е. Чертока, М.Ф. Решетнёва, М.К. Янгеля и др.) знает едва ли не каждый, то, к примеру, имя Михаила Клавдиевича Тихонравова, которое присвоено 50 Центральному научно-исследовательскому ордена Октябрьской революции институту космических средств Министерства обороны СССР, практически никому неизвестно.

Первые шаги зарождения космической баллистики в НИИ-4 были связаны с деятельностью М.К. Тихонравова, возглавлявшего в то время научное направление баллистики жидкостных баллистических ракет. Именно под его руководством начала функционировать группа энтузиастов освоения космоса. Практически в инициативном порядке в начале 1950-х годов членами этой группы был проведен ряд исследований, оформленных в виде отчетов по НИР и направленных в ОКБ-1 С.П. Королеву. В них рассматривались проблемы баллистики РН, выполненных по пакетной («составной») схеме, способных вывести полезную нагрузку на орбиту ИСЗ. Ознакомление с этими материалами дало основание С.П. Королеву официально заказать начатую в 1954 г. в НИИ-4 НИР «Исследования по вопросу создания искусственного спутника Земли». В этой НИР впервые было дано обоснование возможности создания баллистического обеспечения ракет с межконтинентальной полётной дальностью (порядка 8-10 тыс. км), при одновременном использовании его в качестве БНО ракет-носителей для выведения ИСЗ.

Однако, потребовалось несколько лет, прежде чем деятельность энтузиастов военного НИИ была введена в рамки административной структуры. Только в мае 1956 г. в НИИ-4 была создана первая в стране специализированная лаборатория космической баллистики. Ее начальником был назначен П.Е. Эльясберг, который явился одним из основоположников нового научного направления – баллистико-навигационного обеспечения управления полетом первых ИСЗ.

В апреле 1960 г. был введен в строй вычислительный центр НИИ-4, оснащенный наиболее эффективной по тем временам вычислительной техникой: двумя трехадресными ЭЦВМ М-20 с быстродействием 20 тыс. операций в секунду. В результате впервые возникла возможность создания программных комплексов для автоматизации вычислений при обработке пусков РН и обеспечении

пилотируемых и беспилотных аппаратов, выводимых на орбиты ИСЗ, а также для формализации функций согласования работ, возлагаемых на координационно-вычислительные центры (КВЦ).

Подготовка к первому пилотируемому полету в космос Ю.А. Гагарина в апреле 1961 г. потребовала реализации ряда дополнительных мер по повышению надежности как самого БНО, так и осуществляемых на его основе баллистических расчетов. Технология БНО непрерывно совершенствовалась. Его отработка предварительно осуществлялась в процессе пяти беспилотных пусков первых космических аппаратов (КА) модификации «Восток», причем четвертый и пятый пуски проводились по программе, принятой для полета пилотируемого корабля. Выбор параметров орбиты был определен строго из тех соображений, что жизнеобеспечение на космическом аппарате (КА) «Восток» было рассчитано на предельный срок в 10 суток.

В ВЦ НИИ-4 для непосредственного БНО полета была создана оперативная баллистическая группа во главе с В.Д. Ястребовым. При головной роли ВЦ НИИ-4 в качестве дублирующих были задействованы все существовавшие на тот период крупные ВЦ, прежде всего Академии наук и Министерства обороны СССР.

В марте 1968 г. с целью централизации исследований по военному космосу в структуре НИИ-4 на основании приказа Министра обороны СССР был сформирован филиал – войсковая часть 73790. На ее базе в 1972 г. был создан 50 Центральный научно-исследовательский институт космических средств Министерства обороны СССР (ЦНИИ-50). Позднее Постановлениями ЦК КПСС и СМ СССР ЦНИИ-50 был определен в качестве головного разработчика БНО космических средств военного назначения.

## II. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ

Появление в ЦНИИ-50 БЭСМ-6, первой советской супер-ЭВМ с быстродействием 1 млн операций в секунду (1973 г.), позволило программистам-баллистикам под руководством В.В. Исакова разработать первый автоматизированный комплекс программ (АКП), который был значительным шагом в развитии автоматизированных комплексов БНО. Однако, БЭСМ-6 была оснащена операционной системой Д-68, разработанной в ИТМиВТ АН СССР под руководством Л.Н. Королева, при участии В.П. Иванникова и А.Н. Томилина. Д-68 имела ограниченные возможности, не позволяла в полной мере использовать широкие аппаратные возможности БЭСМ-6 и не вполне отвечала требованиям, предъявляемым к баллистическим вычислениям.

Реакцией на недостатки Д-68 стала разработка новых операционных систем, ДИСПАК и НД-70. На НД-70, под руководством Б.К. Ящука был разработан новый АКП-Д для БНО практически всех типов КА (разведка, навигация, связь, ретрансляция...), во многом лишенный недостатков существующего АКП. К концу жизненного цикла трудозатраты на создание АКП-Д оценивались более чем в 200 человеко-лет.

Накопив в ходе работы над БЭСМ-6 большой опыт, разработчики АС-6 (расшифровывается как «аппаратура сопряжения к БЭСМ-6») под руководством В.А. Мельникова постарались реализовать множество оригинальных идей. Аппаратура сопряжения АС-6 представляла собой модульную систему, позволяющую объединять БЭСМ-6, центральный процессор (ЦП) АС-6 (1,5 млн. операций в секунду), общие модули памяти, несколько специализированных периферийных машин (ПМ-6) и их периферию в единый комплекс. Это была настоящая сеть машин разного назначения – счетных и обслуживающих ввод/вывод данных, имевших доступ к общей памяти и общавшихся друг с другом посредством высокоскоростных каналов. Все вместе это составляло комплекс ЭВМ, работающих как конвейер, – разные машины одновременно выполняли последовательные стадии обработки поступающих порций измерительной информации.

С 1972 г. в ЦНИИ-50 были начаты работы по баллистическому обоснованию средневысотной глобальной навигационной спутниковой системы (ГЛОНАСС). Основной проблемой при создании системы являлось высокоточное определение и прогнозирование параметров орбит навигационных КА. Предъявляемые требования были на тот момент беспрецедентными.

Была разработана «Программа обеспечения точности системы ГЛОНАСС», которая предусматривала повышение точности работы измерительных средств, уточнение их геодезической привязки, уточнение моделей геопотенциала Земли, неравномерности ее вращения и движения полюса Земли, уточнение моделей солнечного и отраженного от Земли и Луны давления на КА с учетом физики соударения с элементами его конструкции.

В результате анализа влияния геопотенциала на эволюцию орбит было решено отказаться от резонансных орбит, применяемых в аналогичной американской системе GPS, и использовать орбиты с периодом около 11 часов 15 минут. При условии равномерного разнесения КА в каждой орбитальной

плоскости и относительного фазирования плоскостей системы обеспечивалось движение всех КА по одной и той же трассе с периодом повторяемости 17 витков или 8 суток. Такая орбитальная структура давала два существенных преимущества, впоследствии признаваемых даже разработчиками GPS.

Так обеспечивалась орбитальная устойчивость системы, позволившая отказаться от коррекции орбит навигационных КА в течение всего срока активного существования. Это существенным образом упрощало процесс управления навигационными КА по целевому назначению.

Задача выполнения программы обеспечения точности системы ГЛОНАСС и формирование эфемеридной информации и альманаха системы для закладки на борт была возложена на ЦНИИ-50.

Основная нагрузка по разработке программного комплекса для оценки правильности принятого решения по параметрам орбиты и возможности достижения требуемых точностных характеристик определения параметров движения КА на основе построения согласующих моделей легла на плечи В.А. Коробкина. Фактически, ещё до начала практических работ, в рамках АКП-Д на БЭСМ-6 под его руководством был разработан комплекс программ высокоточного определения параметров движения по результатам измерений текущих навигационных параметров орбит навигационных КА. Он обеспечил проведение лётных испытаний КА системы ГЛОНАСС (с октября 1982 г. по апрель 1988 г.).

Следует отметить, что выполнение программы обеспечения точности проводилось одновременно с оперативными работами по обеспечению лётных испытаний системы. С учётом большого объёма вышеуказанных работ под это была выделена полностью одна из ЭВМ БЭСМ-6.

Весь этот огромный объём работы позволил к окончанию лётных испытаний системы обеспечить выполнение утверждённой программы обеспечения точности эфемеридного обеспечения. Кроме того, были отработаны типовые циклы и технологии оперативного эфемеридного обеспечения НКА. Это позволило в кратчайшие сроки обеспечить разработку специального программного математического комплекса Центра управления системой ГЛОНАСС.

В связи с тем, что ЦНИИ-50, кроме обеспечения лётно-конструкторских испытаний практически всех типов КА, часто привлекался в качестве дублирующего центра при проведении различных ответственных операций (маневрирование на орбите, выведение и спуски КА и другие), нагрузка на сотрудников баллистических отделов была очень высокой. Именно они являлись основными потребителями дефицитного машинного времени ЭВМ БЭСМ-6, которого, несмотря на высокую оснащённость (три ЭВМ), катастрофически не хватало. Назрела необходимость дальнейшей модернизации баллистического центра (БЦ), объединяющего ЭВМ БЭСМ-6, ЭВМ ЦП АС-6 и ЭВМ ПМ-6, а также обеспечение взаимодействия вычислительных средств института по каналам связи с измерительными пунктами наземного автоматизированного комплекса управления КА и космодромов, а также с другими организациями, участвующими в лётных испытаниях космических систем.

Была разработана транспортная станция, реализованная на центральном процессоре ЭВМ АС-6, обеспечивающая создание локальной вычислительной сети института, организацию сбора траекторных изменений по каналам связи системы «Железняк», а также обмена данными для взаимодействия БЦ ЦНИИ-50 с баллистическими центрами ЦНИИмаш, ИПМ АН СССР и ГИЦИУ, а также с центрами обработки специальной информации Министерства обороны.

В 1975 году, во время космического полёта «Союз-Аполлон», управление осуществлялось комплексом, в состав которого входили БЭСМ-6, АС-6 и ПМ-6. Эта система позволяла обрабатывать данные по траектории полёта за 1 минуту, в то время как на американской стороне такой расчёт занимал 30 минут.

В 1982 году были завершены работы по созданию программного обеспечения межцентрового взаимодействия баллистических центров ЦНИИ-50, ЦНИИмаш и ИПМ АН СССР. В результате была создана уникальная сеть трёх БЦ, которая обеспечивала оперативный обмен специальной информацией и давала возможность объединения их информационно-вычислительных ресурсов. В частности эта сеть баллистических центров использовалась во время полёта многоцветного космического корабля «Буран» и всех пилотируемых полётов.

АКП-Д эксплуатировался в ЦНИИ-50 до завершения эксплуатации БЭСМ-6 и вычислительных машин АС-6 и ПМ-6.

Разработка существующего на тот момент СПО БНО представляла очень трудоемкий процесс. Разработка программ велась годами в системе команд ЭВМ, в лучшем случае на языках низкого уровня. Поиск ошибок и доработка программ, составляющих многие сотни команд, без участия авторов практически приводил к повторной разработке программы.

Существовала ещё одна серьёзная задача, которая стояла перед разработчиками БНО для центров управления полётом различных КА (разведка, навигация, связь, ретрансляция). Каждый из Главных конструкторов, проектируя ЦУП для «своего» КА, учитывал заделы, которые имелись у него в области программного обеспечения по обработке телеметрии, расчёта командно-программной информации, особенностей контроля и управления. Учитывая это, центры проектировались с использованием разной вычислительной техники.

Разработка программ СПО БНО является трудоёмким процессом, учитывающим особенности операционной системы и конкретного типа вычислительной машины. При этом нужно учесть, что наработанная в ЦНИИ-50 обширная библиотека программ БНО, разработанных на ЭВМ БЭСМ-6, оказалась бесполезной ввиду различия языков программирования. Таким образом, разработка БНО для конкретного ЦУП может вылиться в очень большой проект, затратный по количеству привлекаемых сотрудников и времени.

Появление на рынке новых типов ЭВМ (ЕС ЭВМ) и стековых машин «Эльбрус-1», «Эльбрус-2», которые планировались к установке в новые баллистические центры при жестких сроках ввода новых космических систем в эксплуатацию, создавало большие сложности разработчикам, поскольку специалистов-баллистиков было мало. Разработка автоматизированных комплексов программ сложной структуры с многими десятками целевых задач и сотнями отдельных модулей, включающих сотни тысяч операторов языков программирования, как правило, занимала длительный срок (от 3 до 7 лет).

Планируемые к установке в новые БЦ машины и установленные на них операционные системы существенно отличались от существующих: разрядность, системы команд, системы прерываний, макрокоманды взаимодействия с операционной системой, ассемблеры... Эти обстоятельства привели к мысли о создании комплекса программ БНО, пригодного к переносу на другие типы ЭВМ. При этом пришлось решить несколько сложных задач.

Даже с выбором языка программирования баллистических задач были определенные трудности. Конечно язык Фортран, предназначенный для научно-технических расчетов, подходил для разработки БНО лучше всего: «Фортран, он и в Африке Фортран». Трансляторы с Фортрана имеются на всех вычислительных машинах. Однако анализ показал, что реализации Фортрана на разных ЭВМ имеют некоторые различия. Для переноса библиотеки баллистических программ на другие машины необходимо было выбрать такое подмножество языка, которое при переносе адекватно интерпретировалось бы на них.

В результате обработки большого объема информации с описаниями Фортрана на разных ЭВМ и ряда экспериментов по переносу и тестированию баллистических программ на разных ЭВМ, проведенное В.Е. Кюрегян, появилось описание языка Фортран-ядро, которое было взято за основу при разработке баллистических программ.

Для парирования аппаратных различий ЭВМ и различий их операционных систем один из авторов этой статьи предложил следующее решение. При создании управляющей программы (монитора) программного баллистического комплекса моделировать для баллистических программ виртуальную операционную среду, единую для разных типов машин.

Возглавить группу программистов по реализации управляющих компонентов АКП-Ф было поручено С.Я. Нагибину. В группу разработчиков, кроме него, вошли А.А. Яковлев и А.Ю. Стерехов. Позднее, на стадии внедрения, к ним присоединились В.В. Ясюкевич и А.Ю. Степанов. Разработка целевых задач в среде АКП-Ф для проведения обработки измерительной информации, орбитальных определений навигационных КА, расчёта и контроля эфемерид, проведения динамических операций, решения задач вторичной баллистики выполнялась силами специалистов-баллистиков. Программы расчета эфемеридной информации разработал В.Г. Ровенко, модель солнечного давления – А.Н. Бахтин, модель движения на языке Фортран – Н.З. Тупицын под руководством В.А. Коробкина. Созданный на инструментальной ЭВМ БЭСМ-6 в ЦНИИ-50 мобильный комплекс программ получил название АКП-Ф.

Кроме моделирования виртуальной операционной среды, АКП-Ф содержал ряд инновационных решений, которые позволили впервые создать не автоматизированный, а автоматический комплекс, с автоматическим планированием и управлением вычислений с использованием технологических циклов управления для КА «Глонасс». Для взаимодействия системных модулей внутри монитора использовалось решение, которое только в 2000 году в зарубежной литературе получило название интеграционной шины. С учетом высокой вычислительной нагрузки было реализовано автоматическое восстановление вычислений после возможных сбоев.

Кроме переноса АКП-Ф, необходимо было скомплексировать два вычислительных комплекса ВС1-К2 на общую память на магнитных дисках, образовав двухмашинный комплекс, связать с ЭВМ ЕС

1045 через систему траекторных измерений СТИ-90 для приёма и выдачи специальной информации, увязать технологию работы баллистического сектора с работой других секторов Центра управления системой ГЛОНАСС. Для поддержки и ускорения создания комплекса были привлечены специалисты ИТМиВТ: В.Ф. Тюрин, М.В. Тяпкин, В.Ф. Шебанов, Н.Л. Гайдаренко, Н.Е. Балакирев, М.Ю. Ярославцев.

Первый перенос АКП-Ф с БЭСМ-6 был успешно осуществлен в короткие сроки на двухмашинный вычислительный комплекс ВС1-К2, каждый из которых имел быстродействие 3 млн. операций в секунду, и был внедрён в Центр управления системой ГЛОНАСС для БНО управления полётом навигационных КА.

Значительную работу по обеспечению такой автоматизации выполнили А.Ю. Стерехов, создавший высокотехнологичную СУБД и общесистемные компоненты, и В.В. Ясюкевич, обеспечивший процессы информационного взаимодействия с другими подсистемами ЦУС ГЛОНАСС.

Первый спутник ГЛОНАСС был выведен на орбиту 12 октября 1982 года. 24 сентября 1993 года система была официально принята в эксплуатацию в интересах Министерства обороны РФ с орбитальной группировкой ограниченного состава из 12 спутников. В декабре 1995 года орбитальная группировка была развернута до штатного состава (24 спутника, по 8 в трех плоскостях орбит), который необходим для полного охвата территории всего земного шара.

В апреле 1988 года была выполнена процедура передачи баллистико-навигационного обеспечения из ЦНИИ-50 в Центр управления системой ГЛОНАСС в городе Голицыно-2. В итоге комплекс АКП-Ф на ВК ВС1-К2 проработал непрерывно в режиме реального времени в течение 12 лет и обеспечил функционирование баллистико-навигационного и частотно-временного обеспечения системы ГЛОНАСС.

Когда наметилась нехватка вычислительных мощностей созданного баллистического сектора для обработки полностью развернутой группировки ГЛОНАСС, АКП-Ф был перенесен на лучшую вычислительную машину страны – «Эльбрус 1-КБ», 64 разрядную, имеющую быстродействие свыше 10 млн операций в секунду и высокую надежность. Однако в эксплуатацию комплекс сдан не был из-за недостатка финансовых средств в 1990-х годах и надвигающейся «Проблемы 2000 года».

Баллистические программные комплексы АКП-Д и АКП-Ф внедрялись специалистами ЦНИИ-50 в эксплуатацию в Главный испытательный центр управления космических систем, который обеспечивал управление всеми типами КА военного назначения.

АКП-Ф также был внедрен в ЦУП разгонных блоков на ЕС ЭВМ и использован в ряде ЦУП КА специального назначения. С некоторым запаздыванием по времени наработки военных баллистиков получили распространение и при управлении автоматическими КА двойного и народно-хозяйственного назначения, прежде всего, спутниками дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

### III. ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Необходимо отметить, что впервые в истории космической баллистики в Центре управления был внедрён автоматический комплекс программ баллистико-навигационного обеспечения. Автоматически проводилось планирование технологических циклов, автоматически отслеживалось их выполнение, автоматически осуществлялось восстановление после сбоев.

С началом 1990-х годов производство больших вычислительных машин, так необходимых в космических программах, было практически остановлено. На рынке появились западные образцы персональных компьютеров и серверов. Поэтому следующим вынужденным этапом развития программно-технической платформы для проведения баллистических расчетов было создание автоматизированного комплекса программ в среде персональных ЭВМ на языке С++ (АКП-С), разработка которого была начата в 1990-х годах. При создании этого комплекса программ был учтён технологический задел АКП-Д и АКП-Ф, а в качестве основной была реализована идея унификации, позволяющая адаптировать разрабатываемое программное обеспечение для внедрения в различные центры.

С применением комплекса АКП-С в 1990-х годах выполнялись расчёты при проведении оперативных работ по выведению и управлению КА и РБ, комплекс внедрялся в создаваемые центры управления. Одно из таких внедрений, в частности, было в Центре управления полётом КА «Купон», созданном по заказу Центрального Банка Российской Федерации.

В 2000 г. комплекс АКП-С на ПЭВМ в многомашинном варианте был внедрен в эксплуатацию в Центре управления системой ГЛОНАСС. В последующем идеи данного комплекса программ и

созданный задел были использованы при разработке его уточнённых версий и модификаций, выполнявшихся по мере совершенствования вычислительной техники и операционных сред.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 50 лет в космическом строю. Очерки истории 50 ЦНИИ МО имени М.К. Тихонравова. М.: Ассоциация «МАКСМ», 2018. 464 с.
2. Пшеничников В.В., Соловьев Г.М. Оперативное навигационно-баллистическое обеспечение космических программ СССР. Юбилейный: Хоружевский, 2006. 408 с.
3. Лысенко Л.Н., Бетанов В.В., Звягин Ф.В. Теоретические основы баллистико-навигационного обеспечения космических полетов. Под общей ред. Л.Н. Лысенко. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2014. 512 с.
4. Гудилин В.Е, Завалишин А.П., Меньков Р.П, Ясюкевич В.В. Под ред. В.В. Ясюкевича. На Челомеевском фланге Байконура. Реутов: ВПК «НПО машиностроения», 2019. 328 с.