

ВКЛАД Э.Л. АКИМА В ПРОГРАММУ КОСМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ РОССИИ

Г.К. БОРОВИН*, Ю.Ф. ГОЛУБЕВ, Г.С. ЗАСЛАВСКИЙ, В.А. СТЕПАНЬЯНЦ,
А.Г. ТУЧИН

Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН Москва, Россия

*Ответственный автор. E-mail: borovin@keldysh.ru

DOI: 10.20948/mathmontis-2019-46-14

Ключевые слова: космический аппарат, искусственный спутник Земли, искусственный спутник Луны, искусственный спутник Марса, планета Венера, Баллистический центр, баллистико-навигационное обеспечение, бортовая система управления, гравитационный манёвр, гравитационное поле

Аннотация. 14 марта 2019 года исполнилось 90 лет со дня рождения выдающегося отечественного ученого, члена-корреспондента РАН Эфраима Лазаревича Акима (1929–2010). Вся профессиональная деятельность Э.Л. Акима была связана с Институтом прикладной математики, куда он пришел на работу сразу после окончания МГУ им.М.В.Ломоносова. Для выполнения задач, связанных с управлением космическими аппаратами, в Институте был создан отдел, который возглавил Д.Е.Охоцимский. В этот отдел пришел на работу Э.Л. Аким. Ему поручили заниматься проблемами навигации. Этот круг проблем определил дальнейшую научную судьбу Э.Л. Акима. Э.Л. Аким защитил кандидатскую и докторскую диссертации, стал лауреатом Ленинской и трижды лауреатом Государственных премий. Он возглавил Баллистический центр Института прикладной математики и руководил им до конца своей жизни. Вехи творческого пути Э.Л. Акима неразрывно связаны с программой освоения космического пространства. Важный этап освоения космического пространства был связан с исследованием Луны. Для осуществления высокоточных расчетов при проектировании орбит требовалось знать гравитационное поле Луны. Э.Л. Аким и его ближайшим сотрудникам принадлежат пионерские результаты в построении модели гравитационного поля Луны. Под руководством Э.Л. Акима были выполнены проектные исследования, связанные с навигационным обеспечением полетов к Луне всех наших космических аппаратов (КА) («Луна 1–24»). Наряду с первой мягкой посадкой на поверхность Луны (автоматической станции «Луна-9»), следует отметить и первый искусственный спутник Луны — «Луна-10» и станцию «Луна-16», впервые осуществившую забор и доставку на Землю образцов лунного грунта.

Э.Л. Аким (вместе с Т.М. Энеевым) выполнил анализ динамики движения межпланетных КА, разработал и навигационно обосновал схему первых полетов КА к Венере и Марсу, положенная в основу всех последующих полетов наших КА к этим планетам. Под руководством Э.Л. Акима были разработаны математические модели, которые позволили получить точность навигации КА, необходимую для построения качественных изображений планеты и ее рельефа.

2010 Mathematics Subject Classification: 37Q05, 70Q05, 70M20, 70F15.

Key words and Phrases: spacecraft, space vehicle, orbiter, artificial earth satellite, artificial moon satellite, artificial martian satellite, ballistic center, ballistics-navigation support, onboard control system, gravity assist maneuver, quasi-synchronous orbit, space radio telescope, very-long-baseline radiointerferometric (VLBI) observations, Lagrange point L_2 of the Sun-Earth system

E. L.AKIM'S CONTRIBUTION TO THE RUSSIAN SPACE RESEARCH PROGRAM

G.K. BOROVIN*, **Yu.F. GOLUBEV**, **G.S. ZASLAVSKY**, **V.A. STEPANYANTS**,
A.G. TUCHIN

Keldysh Institute of applied mathematics RAS Moscow, Russia

**Corresponding author. E-mail: borovin@keldysh.ru

DOI:10.20948/mathmontis-2019-46-14

Summary. March 14, 2019 marked the 90th anniversary of the birth of the outstanding Russian scientist, corresponding member of the RAS Efraim Lazarevich Akim (1929-2010). All professional activity of E.L. Akim was connected with the Institute of applied mathematics, where he came to work immediately after graduating from Lomonosov Moscow State University. To perform tasks related to the management of spacecraft, a department was created at the Institute, which was headed by D.E. Okhotsimsky. E.L. Akim came to work in this department. He was assigned to deal with the problems of navigation. The range of issues identified for further research the fate of Akim. E.L. Akim defended his candidate's and doctoral dissertations, became a laureate of Lenin's and three times a laureate of State prizes. He headed the Ballistic center of the Institute and directed it until the end of his life. Milestones creative ways Akim is inextricably linked with the program of space exploration.

An important stage of space exploration was associated with the exploration of the moon. For the implementation of high-precision calculations in the design of orbits required to know the gravitational field of the moon. Akim and his closest employees have pioneering results in the construction of a model of the gravitational field of the moon. Under the leadership of Akim, project studies were carried out related to the navigation support of flights to the moon of all our spacecraft (SC) ("Moon 1-24"). Along with the first soft landing on the surface of the moon (automatic station "Luna-9"), it should be noted the first artificial satellite of the moon — "Luna-10" and the station "Luna-16", for the first time carried out the fence and delivery to Earth samples of lunar soil.

When the decision was made to start designing the ballistic flight of an unmanned spacecraft to Mars and Venus, the Akim (together with T.M. Eneev) was the analysis of the dynamics of interplanetary spacecraft, developed and justified navigation scheme of the first flight of the spacecraft to Venus and Mars, forming the basis for all subsequent flights of our spacecraft to these planets. 16 vehicles were sent to Venus, in the navigation support of which Akim made his irreplaceable creative contribution. Of particular note is the work on the creation of the first Atlas of Venus, built according to data obtained from the spacecrafts "Venus-15" and "Venus-16", located in the orbits of artificial satellites of Venus. Under the leadership of Akim, mathematical models were developed, which allowed to obtain the accuracy of spacecraft navigation necessary for the construction of high-quality images of the planet and its relief.

Until the end of his life, E.L. Akim kept his focus on the new, immediately guessed promising directions. Here it is worth mentioning the use of GPS and GLONASS satellite navigation systems to determine the position of spacecraft.

1 ВВЕДЕНИЕ

14 марта 2019 исполнилось 90 лет со дня рождения члена-корреспондента РАН, доктора физико-математических наук, профессора Акима Эфраима Лазаревича (14.04.1929-13.09.2010) (рис.1).



Рис.1. Эфраим Лазаревич Аким

Э.Л. Аким родился 14 марта 1929 года в г. Галич Костромской области. Его отец, Лазарь Эфраимович Аким, инженер, погиб на фронте под Москвой в 1941 году. Мать, Фаина Яковлевна работала всю жизнь библиотекарем. Старший брат, Яков Лазаревич Аким — известный детский поэт. В 1933 году семья переехала в Москву. Аким Э.Л. поступил на механико-математический факультет МГУ им.М.В. Ломоносова в 1948 году, а в 1953 году пришел на работу в Институт прикладной математики АН СССР (ныне ИПМ им. М.В. Келдыша РАН) в программистский отдел, возглавляемый Яблонским О.В. Затем он перешёл в отдел № 5, которым руководил Дмитрий Евгеньевич Охоцимский. Здесь

Аким Э.Л. активно включается в работы по баллистико-навигационному обеспечению (БНО) космических полетов.

Вся профессиональная деятельность Эфраима Лазаревича была связана с Институтом прикладной математики, куда он пришёл на работу сразу после окончания МГУ. Этот институт был организован выдающимся ученым Мстиславом Всеволодовичем Келдышем [1]. М.В. Келдыш собрал сильный коллектив для развития методов прикладной математики, с помощью которых предполагалось решить проблемы ядерной энергетики и освоения космоса. Для выполнения задач, связанных с вопросами, нарождающейся тогда ракетодинамики и управлением ракетами, в Институте был создан отдел, который возглавил Дмитрий Евгеньевич Охоцимский. Отдел Д.Е.Охоцимского был той «командой», на которую опирался М.В. Келдыш в своей многогранной деятельности в области ракетно-космической техники. Эфраим Лазаревич сразу попал в поле зрения М.В. Келдыша. М.В. Келдыш поручил Тимуру Магомедовичу Энееву и Э.Л. Акиму заниматься проблемами навигации. Навигация в космическом полёте – это определение положения и скорости космического аппарата (КА), а также прогноз его движения. Этот круг проблем определил дальнейшую научную судьбу Э.Л. Акима. Он прошёл путь от стажёра-исследователя до заместителя директора института, защитил кандидатскую и докторскую диссертации, стал лауреатом Ленинской, трижды лауреатом Государственных премий. Он возглавил Баллистический центр Института прикладной математики (БЦ ИПМ), созданный в 1965 году по рекомендации М.В. Келдыша и С.П. Королёва, и руководил им до конца своей жизни.

Следует отметить, что выдающийся отечественный учёный член-корреспондент РАН Эфраим Лазаревич Аким входит в число тех лучших представителей науки и техники, чей талант и самоотдача обеспечили начало космической эры - исследование и освоение космического пространства. Важное место в его научной жизни занимали Лунные проекты и полёты к планетам. Осуществлялись проекты, которые в то время казались фантастическими: мягкая посадка на Луну, доставка грунта с Луны на Землю, получение фотографии с поверхности Венеры. Казалось, что пройдёт совсем немного времени и на Луне будет создана база, состоится пилотируемая экспедиция на Марс, отечественные космические аппараты совершат полёты в системы Юпитера и Сатурна. Однако развитие пошло по другому пути, а темпы исследований замедлились. Эфраим Лазаревич принимал, но не соглашался с этим... Он считал, что вскоре наступит время регулярных полётов на Луну, создание лунной базы, освоение природных ресурсов Луны в интересах человечества. А вслед за этим человечество начнёт осваивать и другие небесные тела. Вехи творческого пути Э.Л. Акима неразрывно связаны с российской программой освоения космического пространства.

С 1963 году начал выходить журнал Академии наук «Космические исследования». Символично, что первый номер журнала открывается фундаментальной статьёй Э.Л. Акима и его учителя Т.М. Энеева «Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений» [2]. В этой статье обобщён опыт определения орбит искусственных небесных тел, полученный ещё при первых космических полётах. На эту основополагающую статью продолжают ссылаться, хотя с тех пор прошли десятилетия и методы определения орбит совершенствовались несколькими поколениями учёных.

2 РУКОВОДИТЕЛЬ БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ЦЕНТРА ИШМ

2.1 Лунные исследования

Важный этап освоения космического пространства был связан с исследованием Луны. Хотя Луна – это ближайшее к нам небесное тело, до недавнего времени неизвестно было, что находится на обратной стороне Луны. Тем более не было сведений о величине силы притяжения Луны над разными точками её поверхности. Для осуществления высокоточных расчётов при проектировании орбит требовалось знать гравитационное поле Луны. Только в самых первых приближительных расчётах можно предполагать, что планета или естественный спутник – это шар. На самом деле гравитационное поле естественных небесных объектов устроено весьма причудливым образом, и если это не учитывать при расчётах, то катастрофические последствия не заставят себя ждать. Измерить гравитационное поле можно только косвенно, наблюдая за отклонениями орбит искусственных спутников. По результатам этих исследований в 1984 году была выпущена монография «Поле тяготения Луны и движение её искусственных спутников» (рис.2), в которой Э.Л. Аким - соавтор.



Э.Л. Аким внёс большой вклад в исследование и построение модели гравитационного поля Луны. Нецентральный характер гравитационного поля Луны был обнаружен по данным либрационных измерений. Однако эти косвенные измерения не могли дать качественной и количественной характеристики нецентральности. Запуск первого искусственного спутника Луны (ИСЛ) КА «Луна-10» позволил получить прямое экспериментальное подтверждение нецентральности поля тяготения Луны и определить его первые количественные характеристики. КА «Луна-10» был запущен 31 марта 1966 г. Время активного существования КА «Луна-10» составило 56 суток. Первые результаты по характеристикам нецентральности поля Луны Э.Л. Аким опубликовал в 1966г. [3]. В этой работе он всегда чувствовал внимание и поддержку академика М.В. Келдыша.

Принятая в нашей стране программа исследований гравитационного поля Луны предполагала запуски целевых спутников, выводимых на различные орбиты вокруг Луны, и организацию для них длительных систематических наземных траекторных измерений. Было предусмотрено проведение гравитационных измерений (траекторных измерений в интересах изучения поля тяготения Луны) на других спутниках Луны, для которых эти измерения не были основными. Для получения гравитационных измерений были запущены два лунных спутника: «Луна-19» и «Луна-22». Длительное активное существование этих спутников дало возможность накопить траекторные измерения на интервале более года по каждому спутнику. Траекторные измерения, выполненные по искусственным спутникам: «Луна-10-12,-14,-19,-22» позволили получить представление об эволюции в нецентральном поле лунного тяготения на значительном интервале времени орбит полярного, экваториального спутников, а также орбит спутников со

средним наклоном. Для получения более полной информации о влиянии гравитационного поля Луны на движение в нём спутников с различными наклонами и геометрией орбит были использованы траекторные измерения по автоматическим станциям «Луна-15-18,-20,-21,-23,-24» [4]. Эти измерения были проведены на коротких интервалах времени полёта станций на орбитах ИСЛ, которые были необходимы для расчёта и проведения манёвров, обеспечивающих посадку лунных станций в заданные районы Луны. Следует отметить, что Э.Л. Аким одновременно с исследованиями поля тяготения Луны одновременно решал прикладные задачи обеспечения полётов к Луне автоматических КА. Результаты определения параметров нецентральности гравитационного поля Луны, полученные по информации КА «Луна-10», были использованы для баллистического обеспечения полёта ИСЛ «Луна-11,-12,-14». Анализ динамики движения спутников в поле тяготения был положен в основу баллистического проектирования нового поколения лунных автоматических аппаратов. Модель гравитационного поля, построенная по наблюдениям за движением ИСЛ «Луна-14» была успешно использована при управлении полётами автоматических лунных аппаратов «Луна-16 - Луна-24», которые обеспечили высадку на поверхность Луны «Луноходов», забор и доставку на Землю образцов Лунного грунта». Следует также отметить, что последние траекторные измерения КА «Луна-10», использованные для оценки нецентральности поля тяготения Луны, были получены 29 мая 1966 г, в то время как первые траекторные измерения по КА НАСА «Лунар Орбитер-1» 14 августа 1966 г.

Модель гравитационного поля Луны, которую построили Э.Л. Аким и З.П.Власова, использовала траекторные измерения, полученные от 14 ИСЛ [5]. Общий объём информации оценивался величиной около 456 тысяч измерений. Построение моделей гравитационного поля Луны осуществлялось путём совместной статистической обработки траекторных измерений, полученных почти от всех отечественных ИСЛ. Было построено несколько моделей лунного поля тяготения. Сравнение построенных моделей с близкой по составу гармоник моделью поля тяготения Луны, построенной в Лаборатории реактивного движения (JPL) в США по траекторным измерениям ИСЛ серии «Лунар Орбитер», показало весьма удовлетворительное согласование наиболее крупных по величине коэффициентов этих моделей. Такое согласование моделей, построенных разными методами по независимому и различному наблюдательному материалу, явилось убедительным подтверждением их корректности.

Под руководством Э.Л. Акима были выполнены проектные исследования, связанные с навигационным обеспечением полётов к Луне всех наших космических аппаратов («Луна 1 – 24») (рис.3). За осуществление первой мягкой посадки на Луну КА «Луна-9» Э.Л. Акиму и его коллегам в 1966 г. присуждена Ленинская премия.

Мягкой посадке предшествовала подготовительная работа, в которой непосредственное участие принимал Э.Л. Аким. Примером работы из «лунного» цикла явился проект облёта и фотографирования невидимой с Земли стороны Луны. Этот проект был реализован КА «Луна-3» (рис.4). Здесь, впервые в мировой практике, был предложен и успешно реализован так называемый «гравитационный маневр» – целенаправленное изменение траектории КА в результате возмущения его движения небесным телом (в данном случае Луной). Для этого была построена общая теория и проведен анализ пространственных траекторий полёта к Луне, в том числе траекторий с облётом Луны и возвращением к Земле.

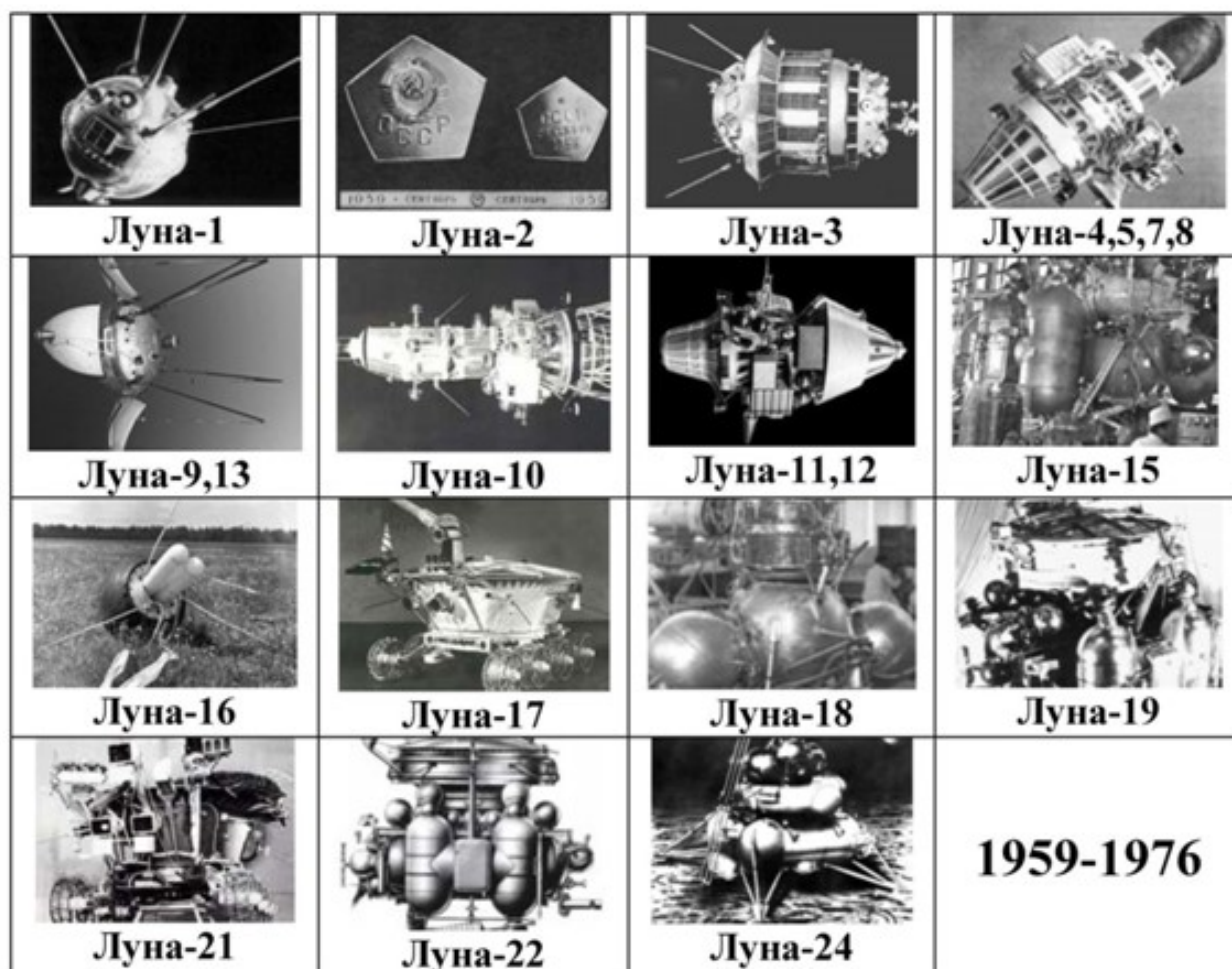


Рис.3. Советские космические аппараты, исследовавшие Луну

Попутно была разработана методика расчёта управления полётом таких аппаратов. Результаты этой работы положены в основу баллистического проектирования КА для полётов к Луне и КА серии «Зонд», предназначенных для отработки пилотируемого облёта Луны (в беспилотном варианте). Наряду с первой мягкой посадкой на поверхность Луны (автоматической станции «Луна-9»), следует отметить и первый искусственный спутник Луны «Луна-10» и станцию «Луна-16», впервые осуществившую забор и доставку на Землю образцов лунного грунта. КА Лунный грунт доставили на Землю ещё два аппарата: «Луна-20» (рис.5) и «Луна-24».

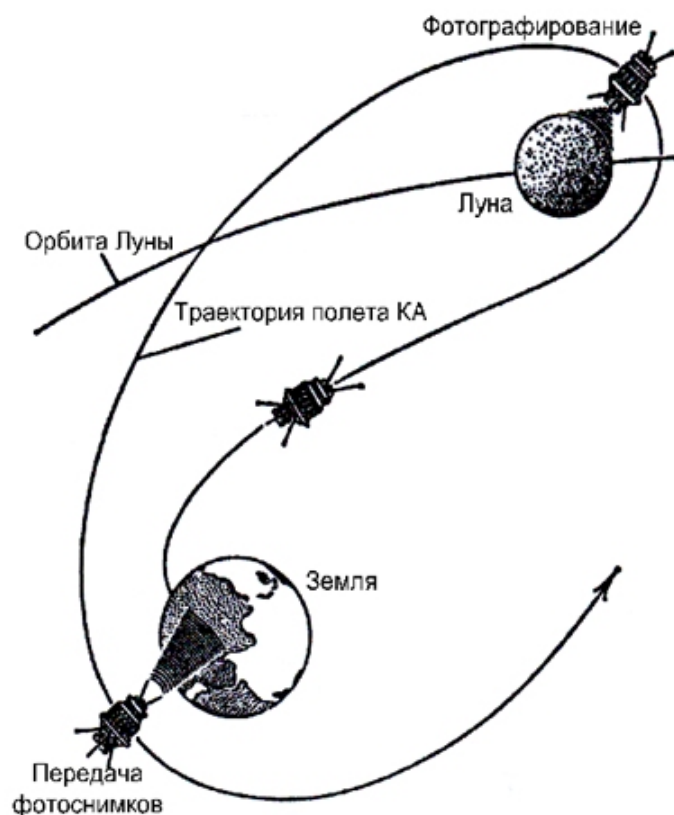


Рис.4. Проект облёта и фотографирования невидимой с Земли стороны Луны для КА «Луна-3»

Полёт КА «Луна-16» с точки зрения задач, которые приходилось решать при проектировании этих полётов, имел целый ряд особенностей. Чтобы доставить возвращаемый аппарат (ВА) с лунным грунтом на заданный полигон территории нашей страны, требовалось посадить КА на поверхность Луны в пятно радиусом 5 км вокруг выбранной точки посадки. Баллистики в то время не могли обеспечить столь высокую точность прогноза точки посадки, т.к. не имели необходимой для этого системы траекторных измерений и недостаточно точно знали лунное поле тяготения. Чтобы спрогнозировать с необходимой точностью место посадки на Земле ВА с грунтом Луны, нужно было иметь на борту ВА достаточно точную на то время дециметровую систему траекторных измерений. Но эта система имела слишком большой вес. Разместить эту систему на КА, пожертвовав научным оборудованием, было нельзя. Любой из названных причин было достаточно, чтобы отказаться от реализации проекта. Только талант, высочайшая квалификация и настойчивость Главного конструктора проекта Г.Н. Бабакина и энтузиазм команды, в которую входили и сотрудники ИПМ им.М.В. Келдыша, позволили реализовать этот проект.



Рис.5. «Луна-20». Контейнер с лунным грунтом

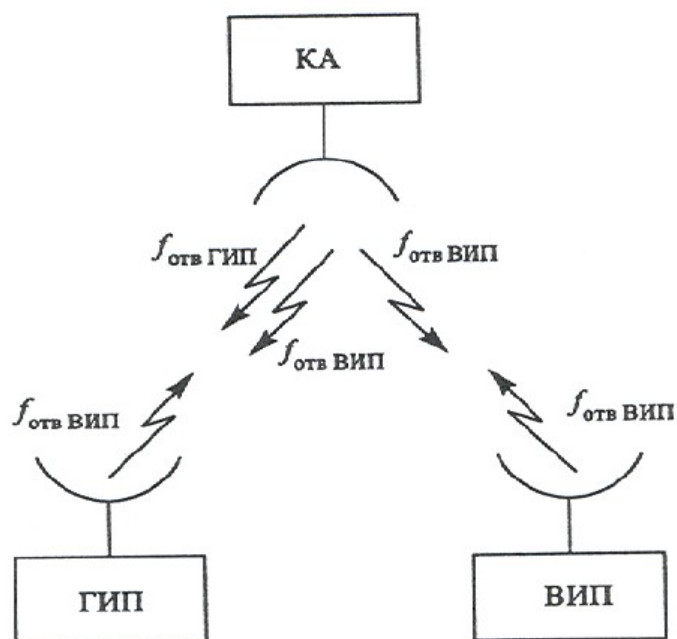


Рис.6. Высокоточная система траекторных измерений в проекте «Луна-16». (ГИП – главный измерительный пункт, ВИП – вспомогательные измерительные пункты, $f_{отв}$ - частота сигнала от измерительного пункта)

В результате была разработана и испытана новая высокоточная система траекторных измерений (рис.6). По наблюдениям за движением ИСЛ «Луна-10,11,12 и 14» была уточнена модель лунного поля тяготения. Было предложено поставить на борт ВА менее точную, но существенно более лёгкую траекторную систему метрового диапазона.

А для получения необходимой точности посадки на Землю ВА с грунтом предложили дополнительно привлечь для наблюдений за ВА оптические измерения обсерваторий Академии наук СССР. Систему траекторных измерений обычно принято дублировать. Но на борту ВА для этого не было резерва веса. Главный конструктор Г.Н.Бабакин принимает решение – обойтись без дублирования. Созданный проект оказался надёжным и позволил успешно решить задачу забора и доставки на Землю лунного грунта на всех предназначенных для этого лунных аппаратах.

2.2 Полёты к планетам Солнечной системы

Вслед за Луной пришла очередь исследования наших ближайших соседей в Солнечной системе: Венеры и Марса. Академики М.В. Келдыш и С.П.Королёв приняли совместное решение начать баллистическое проектирование беспилотных полётов к планетам Марсу и Венере. Была разработана схема управления полётом КА, которая легла в основу всех дальнейших работ, как по баллистическому проектированию, так и по практическому управлению полётами межпланетных КА. Эта схема обеспечивала достижение как максимальной точности управления в ходе полёта, так и минимальных массовых затрат, связанных с созданием самой системы управления. Коллектив Института прикладной математики участвовал по всех проектно-баллистических работах, а также работах по БНО полётов космических аппаратов, предназначенных для исследования межпланетного космического пространства, планет и малых тел солнечной системы.

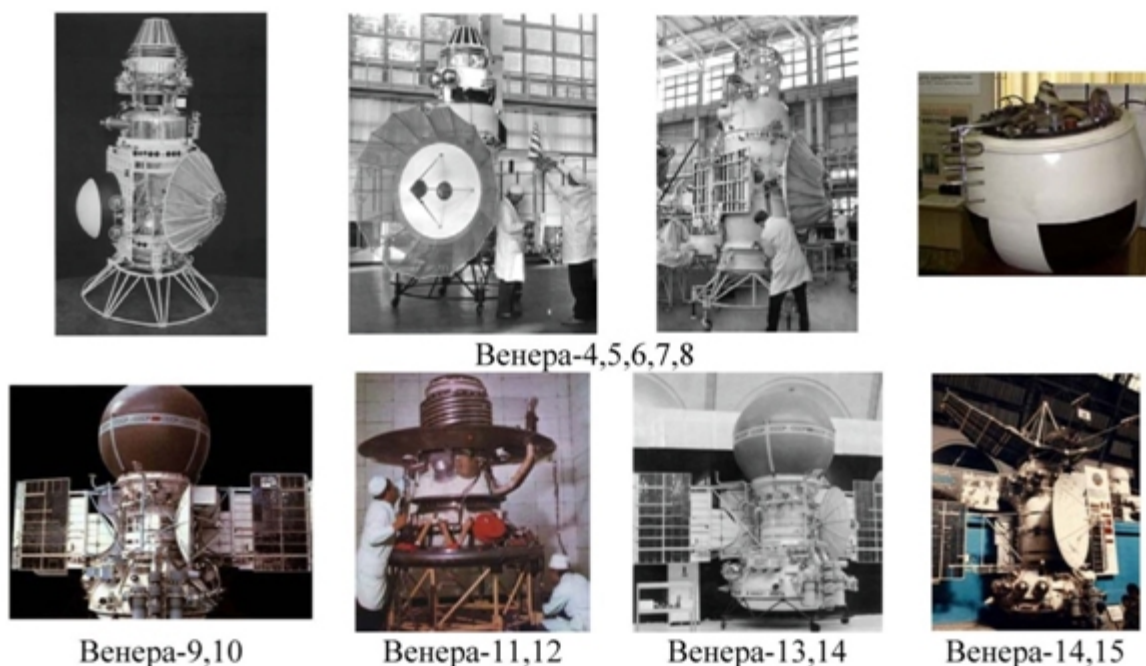


Рис.7. КА «Венера 4, 5, ..., 16»

Э.Л. Акимом (вместе с Т.М.Энеевым) был выполнен анализ динамики движения межпланетных КА, разработана и обоснована схема первых полётов КА к Венере и Марсу, положенная в основу всех последующих полётов российских КА к этим планетам [6].

Ответственный участок полёта – сближение с планетой. При непосредственном участии Э.Л. Акима была разработана схема управления полётом КА на заключительном этапе полёта. Построена методика управления работой наземных средств слежения по измерениям доплеровского смещения частоты сигнала КА в припланетном сеансе связи Земли с КА. На Венеру было отправлено 16 аппаратов (рис.7). Отметим некоторые из космических экспедиций. КА «Венера-4» впервые осуществил передачу на Землю параметров атмосферы планеты. Первые искусственные спутники Венеры (ИСВ) «Венера-9», «Венера-10» и их посадочные аппараты передали на Землю панорамы поверхности этой планеты. ИСВ «Венера-15» и «Венера-16» позволили с помощью уникального эксперимента по радиокартографированию Венеры (рис.8) построить хорошего качества изображения планеты и её рельефа, создать первый атлас Венеры. При этом следует также отметить полёты наших КА «Вега-1» и «Вега-2» к комете Галлея с доставкой в атмосферу Венеры аэростатных зондов и выведением к ядру кометы европейской межпланетной станции «Джотто» (Международный проект «Лоцман»).

Эфраим Лазаревич внёс важный вклад в баллистико-навигационное обеспечение этих космических экспедиций.



Рис.8. Картографирование Венеры. КА «Венера-15» и «Венера-16»

2.3 Проект Союз-Аполлон

Остановимся далее на некоторых, с нашей точки зрения, наиболее интересных этапах работы Э.Л. Акима.

Впечатляющий эксперимент в мире в рамках сотрудничества в космосе был проведен в июле 1975 г., когда американский корабль «Аполлон» был состыкован с советским

кораблем «Союз-19» на околоземной орбите высотой 225 км (рис.9). Полет по программе ЭПАС (экспериментальный полёт Аполлон-Союз), в ходе которого астронавты и космонавты совершали переходы с одного корабля на другой и проводили эксперименты, был полностью успешным. Э.Л. Аким, возглавляя БЦ ИПМ, внёс существенный творческий вклад в успешную реализацию проекта ЭПАС. Последовательность динамических операций, которые необходимо было выполнить космическому кораблю «Союз-19», предъявляла высокие требования к БНО управления полётом по оперативности, надёжности и точности выполнения расчётов. Все операции по выведению космического корабля «Союз-19» на орбиту и последующие манёвры выполнены с высокой точностью. На 36-м витке полёта космического корабля «Союз-19» 17 июля в 19:12 была осуществлена стыковка космических кораблей. 19 июля на 64-м витке космические корабли расстыковались, а на 66-м витке вновь состыковались. После расстыковки космических кораблей на 68-м витке их полёт проходил по самостоятельным программам. Следует отметить, что включение БЦ ИПМ в работы по пилотируемой космонавтике потребовало разработки и реализации новых методов, алгоритмов и программ.



Рис.9. Аполлон-Союз, 1975 ("Аполлон" был активен, "Союз" – пассивен)

2.3. Космические станции «Салюты»

29 сентября 1977 г. на околоземную орбиту была выведена космическая станция «Салют-6». Создание орбитального комплекса «Салют-6» – «Союз» – «Прогресс» расширило возможности исследования околоземного космического пространства. Новые возможности орбитального комплекса позволили повысить интенсивность транспортного сообщения Земля – «Салют-6» – Земля. Стыковку с орбитальной станцией «Салют-6» осуществил 31 КА, включая 4 корабля типа «Союз-Т», 12 транспортных кораблей «Прогресс» и КА «Космос-1267». На борту станции «Салют-6» работало 5 основных и 11 краткосрочных экспедиций. Всё это определило необходимость дальнейшего

совершенствования применяемых методов БНО полёта. Э.Л. Аким и здесь внёс большой творческий вклад в развитие методов БНО полёта орбитальной станции и транспортных, пилотируемых и грузовых кораблей, направляемых к ней [5]. Важнейшей задачей службы навигации является постоянное слежение за состоянием движения станции и кораблей по орбитам. Это слежение осуществлялось наземными радиотехническими средствами, выполняющими измерения наклонной дальности и радиальной скорости. В БЦ ИПМ проводилась статистическая обработка измерений и определение по ним параметров движения КА. Результаты определения параметров движения КА необходимы в первую очередь для прогнозирования движения КА. Анализ изменений параметров орбит, постоянно уточняемым по навигационным измерениям, позволяет судить о возмущениях движения, изменениях плотности верхней атмосферы и при необходимости учитывать в расчётах эти требования.

19 апреля 1982 года на орбиту была выведена орбитальная станция «Салют-7», которая обеспечила продолжение космических исследований, начатых на станции «Салют-6». 11 КА выполнили стыковку со станцией «Салют-7», включая 4 корабля «Союз», 6 КА «Прогресс» и КА «Космос-1443» [7]. На борту станции «Салют-7» проработали две основные и четыре краткосрочные экспедиции. За время управления полётом станции «Салют-7» и транспортных космических кораблей произошли две крупные нештатные ситуации, выход из которых потребовал нестандартных решений и действий от специалистов по БНО. Первая из них связана с полётом транспортного корабля «Прогресс-14», старт которого состоялся 10 июля 1982 г. в 12:57:44 по московскому времени. Средства траекторного контроля морского базирования получили траекторные измерения наклонной дальности и радиальной скорости. Баллистический центр должен был получить параметры орбиты. Однако начальное приближение, используемое в задаче определения параметров движения, оказалось столь грубым, что стандартные численные методы не обеспечивали сходимость. Поэтому пришлось применять различные ухищрения: направленный перебор вариантов начальных приближений и изменение веса измерений. Этим процессом руководил Эфраим Лазаревич. В результате напряжённой работы были получены параметры орбиты. Управление полётом вошло в штатный режим и стыковка состоялась в запланированное время 12 июля 1982 г. в 11:41. Этот случай послужил началом цикла работ по созданию методов и алгоритмов определения орбиты КА в условиях неопределённости. Сам Э.Л. Аким был автором некоторых оригинальных идей и методов решения задач подобного рода. Позже разработанные методы нашли своё воплощение в бортовой навигационной системе, работающей по сигналам навигационных спутников ГЛОНАСС и GPS [6]. Вторая нештатная ситуация произошла на станции «Салют-7» 12 февраля 1985 года. Станция со 2 октября 1984 года находилась в режиме автоматического полёта [7]. Во время очередного сеанса связи обнаружилась неисправность в одном из блоков командной радиолинии станции, через который проходили радиокоманды из ЦУПа и информация со станции на Землю. Анализ состояния бортовых систем показал, что произошло автоматическое переключение на второй передатчик. С Земли выдали команду о возобновлении действия первого передатчика. Команда была принята, и станция ушла на очередной виток. Но на следующем сеансе связи информации со станции уже не было. Предстояла стыковка с не кооперируемой станцией. После нескольких месяцев тренировок космонавты В. Савиных и В. Джанибеков утром 6 июня 1985 года стартовали на корабле «Союз Т-13» [8]. Перед БЦ ИПМ стояла сложная задача. Нужно было обеспечить стыковку корабля со станцией по

разным орбитальным данным. Орбита корабля «Союз Т-13» определялась по данным траекторных измерений, а орбита станции сообщалась из Центра контроля космического пространства. При этом использовались различные модели движения КА. Разработанные в БЦ ИПМ методы согласования моделей движения обеспечили успешное выполнение расчётов по оперативному БНО управления полётом корабля «Союз Т-13» и его стыковку со станцией 8 июня 1985 г в 8:50 по московскому времени.

Следует отметить одну важную особенность оперативных работ баллистика навигационного обеспечения (БНО) полёта корабля «Союз Т-13», которая состояла в том, что БЦ ИПМ одновременно проводил работы по оперативному БНО полёта автоматических межпланетных станций «Вега-1» и «Вега-2» [9]. В момент проведения стыковки в БЦ ИПМ проводились работы к подготовке и проведению второй коррекции межпланетной станции «Вега-2». Время включения двигательных установок (ДУ): 05:45:00. В отличие от аналогичных коррекций, проведенных на станциях "Венера-11" - "Венера-14", к этой коррекции предъявлялись высокие требования по точности исполнения, т.к. она обеспечивала гравитационный маневр, необходимый для последующего полета к комете Галлея.

20 февраля 1986 года в Советском Союзе состоялся запуск ракеты-носителя "Протон-К", которая вывела на околоземную орбиту базовый блок станции "Мир", ставший основой для строительства в космосе орбитального комплекса (ОК) нового поколения. К ОК «Мир» совершили полеты и стыковались с ним 100 советских (российских) космических средств. Кроме того, с 1995 г. с ОК «Мир» проведено девять стыковок с многоразовым транспортным космическим кораблём типа «Шаттл». Работы по БНО управления полётом ОК «Мир» были возложены на ИПМ им. М.В. Келдыша Постановлениями Правительства. БЦ ИПМ под руководством Э.Л. Акима успешно выполнял работы по БНО полёта орбитальной станции «Мир» и транспортных пилотируемых космических кораблей. БЦ ИПМ оперативно и регулярно обрабатывал траекторные измерения, определял орбиты, прогнозировал движение и рассчитывал параметры манёвров каждого из этих космических кораблей. По данным бортовых измерений проводился выборочный анализ динамики движения орбитального комплекса относительно центра масс. Следует отметить, что работы со станцией «Мир» пришлось на суровый период нашей истории – девяностые годы прошлого столетия. В конце 1991 года стало ясно, что в сложившихся условиях невозможно обеспечить надёжное функционирование машин типа БЭСМ-6, АС-6, на которых был построен информационно-вычислительный комплекс БЦ ИПМ. Руководством Института прикладной математики было принято решение об ускоренном создании нового информационно-вычислительного комплекса на основе локальной сети серверов на персональных процессорах. Весной 1992 г. началась опытная эксплуатация новых аппаратно-программных средств БЦ ИПМ, а летом 1992 г. завершена эксплуатация старого вычислительного комплекса. Скорейший переход на новую платформу полностью себя оправдал. Комплекс «Мир» проработал в три раза дольше первоначально установленного срока. В конце 1990-х годов на станции начались многочисленные проблемы из-за постоянного выхода из строя различных приборов и систем. Через некоторое время Правительство РФ, ссылаясь на дороговизну дальнейшей эксплуатации, несмотря на многочисленные проекты спасения станции, приняло решение затопить «Мир». Утром 23 марта 2001 г. Орбитальный научно-исследовательский комплекс «Мир» прекратил своё существование. На последнем этапе орбитальный комплекс состоял из

базового блока, модуля «Квант», модуля «Квант-2», модуля «Кристалл», модуля «Спектр», модуля «Природа» и космического корабля «Прогресс М1-5». Работа по управлению орбитальным комплексом «Мир» на этапе его затопления имела ряд существенных отличий от выполненных ранее работ по затоплению других космических аппаратов, что определялось значительно большей массой (примерно 130 т), более сложной геометрической формой орбитального комплекса, весьма ограниченными запасами топлива на борту для управления орбитальным движением комплекса и его движением относительно центра масс. Работа по управлению орбитальным комплексом на завершающем этапе его полёта была выполнена ЦУП-М (ЦНИИмаш), РКК «Энергия», ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, соответствующими центрами Министерства обороны и другими организациями. Работа проводилась под руководством специально созданной Росавиакосмосом Межведомственной рабочей группой по баллистико-навигационному и информационному обеспечению заключительного этапа полёта орбитального комплекса «Мир». Эфраим Лазаревич принимал активное участие в работе этой группы.

Схема затопления станции «Мир» предусматривала два этапа. Цель первого этапа – при помощи двух или трёх тормозных импульсов сформировать орбиту, обеспечивающую благоприятные условия для затопления на протяжении нескольких суток. Цель второго этапа – при заданной величине завершающего тормозного импульса, определить время его приложения, обеспечивающее затопление станции в заданном районе. В связи с тем, что солнечная активность оказывает сильное влияние на плотность атмосферы, определяющее торможение орбитального комплекса, по инициативе Эфраима Лазаревича в баллистическом центре были выполнены исследования точности прогноза индекса солнечной активности F10.7. В баллистическом центре были разработаны алгоритмы и программы, реализующие методики International Organization for Standardization ISO/CD15857. Следует отметить, что разработанные программы успешно работают по сей день. Результаты прогноза представляются на сайте [10, 11] и используются многими пользователями. Импульсы, реализовавшие сход с орбиты станции «Мир», имели такую большую длительность, что в зоне видимости станции не оставалось интервалов её пассивного движения. Поэтому Эфраим Лазаревич поставил задачу разработать специальную методику и реализовать программный комплекс для определения работы станции по наземным траекторным измерениям на фоне работы двигательных установок. Такой программный комплекс был единственным в организациях, которые обеспечивали уточнение траектории станции на заключительном этапе её полёта. Оперативная работа по БНО управления полётом станции «Мир» была завершена. Фактически это была последняя оперативная работа БЦ ИПМ по пилотируемой программе.

2.4 Развитие Методов решения задач баллистики

Большое внимание Э.Л. Аким уделял развитию методов локальной обработки траекторных измерений. В задачи локальной обработки входит выявление и удаление из дальнейшей обработки измерений, содержащих аномальные ошибки, а также сжатие информации, т.е. замена массива измерений одним или совокупностью нормальных мест. Локальная обработка позволила значительно сократить объём вычислений на этапе определения орбиты за счёт сжатия измерительной информации и уменьшения числа отбраковок измерений. Спецификой локальной обработки для искусственных спутников Земли (ИСЗ) является необходимость учёта нелинейностей в математических моделях.

Под руководством Э.Л. Акима были разработаны алгоритмы, позволяющие строить аппроксимацию измерений специальными аналитическими выражениями, зависящими от трёх параметров. Такая аппроксимация позволила идентифицировать аномальные измерения и получать статистические характеристики ошибок измерений. На разных этапах полёта станции и транспортных кораблей требования к точности знания их движения различны и это определяет необходимую частоту измерений и нужную точность определения по ним орбит. Наибольшие точности требуются при маневрировании кораблей и станций. По инициативе Э.Л. Акима и под его руководством была разработана методика и алгоритм одновременного уточнения параметров орбиты и импульса манёвра или коррекции.

Важнейшими задачами, решаемых в ходе оперативного БНО полёта станции и транспортных космических кораблей, являются задачи расчёта манёвров. Перед началом полёта корабля каждой следующей экспедиции решается задача коррекции орбиты станции. Для обеспечения наименьших затрат топлива на манёвры сближения корабля со станцией плоскость орбиты корабля должна быть близка к плоскости орбиты станции, а сама станция должна находиться в момент старта корабля на заданном угловом расстоянии впереди него. Кроме того, при проведении коррекции необходимо устранить снижение высоты орбиты станции, которое обусловлено торможением в верхних слоях атмосферы. После выведения на начальную орбиту корабль должен перейти на орбиту станции и сблизиться с ней. Для этого он должен выполнить ряд манёвров. Номинальная схема манёвров и точные значения их параметров должны уточняться с учётом данных о параметрах реальных орбит корабля и станции. Это уточнение производится последовательно по мере выполнения манёвров, поступления траекторных измерений и определения параметров движения станции и корабля. На условия сближения корабля со станцией, а также на возможные интервалы проведения манёвров накладываются ограничения, которые обусловлены требованиями системы управления кораблём, условиями освещённости корабля Солнцем, а также требованиями наблюдаемости динамических операций со станций слежения. Оптимизация схемы маневрирования и точные расчёты параметров манёвров на каждом этапе сближения корабля со станцией с учётом всех накладываемых ограничений и условий является важнейшей задачей БНО управления полётом.

Для возвращения на Землю и посадку в заданном районе корабль должен совершить манёвр схода с орбиты. Предварительные расчёты спуска производятся задолго до планируемой даты посадки. Кроме того, регулярно проводятся расчёты возможных резервных вариантов спусков для их использования в случае возникновения нештатной ситуации, требующей срочной посадки корабля. В штатном варианте окончательный расчёт манёвра схода с орбиты производится по результатам определения параметров движения, полученным за 10-12 витков до посадки. Уточнение параметров этого манёвра и прогноз координат точки посадки проводится по результатам определения параметров движения с использованием траекторных измерений за 3-4 витка до посадки. Проведение расчётов для посадки корабля, а также проведение регулярных расчётов резервных вариантов посадки является важной задачей БНО полёта космического корабля.

Современные задачи исследования Солнечной системы предъявляют высокие требования к управлению движением автоматических межпланетных станций. Успешное проектирование и реализация отечественных амбициозных проектов исследований дальнего космоса требуют единого комплекса математического моделирования, что

обеспечивает минимизацию просчетов и ошибок. Реализация проектов невозможна без создания системы управления движением нового поколения с высокой степенью автономности. В БЦ ИПМ им.М.В. Келдыша РАН выполнены работы по созданию дальнейшего развитию математических моделей управления движением космического аппарата для исследований Солнечной системы. С помощью пакета прикладных программ ValCalc, созданного в БЦ ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, выполняются работы по баллистическому проектированию перспективных проектов исследования космического пространства [11-16].

2.5 Автономная навигационная система

До конца жизни Э.Л. Аким не терял чувство нового, сразу угадывал перспективные направления. Здесь стоит упомянуть о применении систем спутниковой навигации GPS и ГЛОНАСС для определения положения космических аппаратов. Многие уже привыкли к использованию этих систем для определения положения наземных объектов. Но Э.Л. Аким сразу увидел здесь принципиально новые возможности определения положения КА. Коллектив БЦ ИПМ совместно с промышленностью начал разработки по созданию высокоточной автономной системы навигации (АСН) ИСЗ по сигналам GPS и ГЛОНАСС (рис.10).

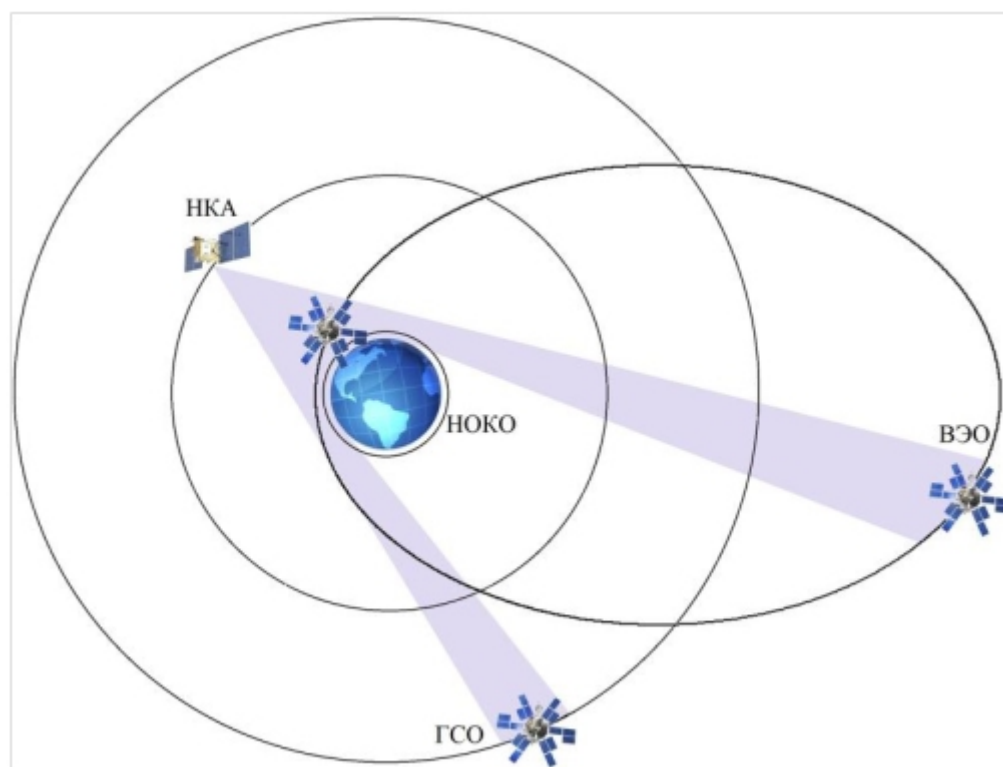


Рис.10 Взаимное расположение КА и навигационного космического аппарата (НКА) на геостационарной орбите (ГСО), высокоэллиптической орбите (ВЭО) и низкой околоземной космической орбите (НОКО)

Особо следует отметить, что сотрудники Э.Л. Акима решили не только традиционные для центра задачи: исследовали возможность создания высокоточной АСН, разработали для нее алгоритмы и программы на персональном компьютере, провели математическое моделирование работы систем GPS, ГЛОНАСС и АСН. Сотрудники ИПМ также участвовали в выборе бортовой вычислительной машины АСН, разработали для неё необходимое общее программное обеспечение, специальное программное обеспечение бортовых аппаратных средств: приёмника и коррелятора сигналов. И чтобы обеспечить надёжность работы АСН в космических условиях, провели её отработку на аппаратном имитаторе сигналов GPS и ГЛОНАСС. Эфраим Лазаревич был инициатором, организатором и теоретиком этой новой работы [17].

3 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Эфраим Лазаревич проявлял интерес к самым неожиданным и парадоксальным проектам, стремился найти в них рациональное зерно. Он старался поддержать добрым словом авторов таких проектов, говорил о том, что проект интересный, заслуживает дальнейшей проработки.

Велик вклад Э.Л. Акима в подготовку и разработку баллистико-навигационного обеспечения управления полетом КА научного назначения «Радиоастрон» и проведения на его борту высокоточных научных экспериментов. КА «Радиоастрон» проработал на орбите более 7.5 лет.

За выдающиеся заслуги Аким Э.Л. был удостоен Ленинской премии (1966), трижды лауреат Государственных премий СССР (1970, 1980, 1986), премии Правительства РФ (2005), премия им. К.Э. Циолковского РАН (2007), награждён многими государственными наградами. Э.Л. Аким – член-корреспондент РАН, заслуженный деятель науки и техники РФ. Его именем названа малая планета Солнечной системы – астероид (8321) Akim.

Вся жизнь Эфраима Лазаревича Акима – это пример беззаветного служения науке.

REFERENCES

- [1] G.K. Borovin, A.V. Grushevskii, M.V. Zakhvatkin, G.S. Zaslavsky, V.A. Stepanyantz, A.G. Tuchin, D.A. Tuchin, V.S. Yaroshevsky, “Space researches in Keldysh Institute of Applied Mathematics of RAS: Past, Present, Future”, *Mathematica Montisnigri*, **43**, 101-127 (2018).
- [2] E.L. Akim, T.M. Eneev, “Opredelenie parametrov dvizheniyu kosmicheskogo letatel'nogo apparata po dannym traektornykh izmereniy”, *Kosmicheskie issledovaniya*, **1**(1), 5-50 (1963). URL: ftp://ftp.kiam1.rssi.ru/pub/gps/lib/article/akim/1963_akimeneev.pdf
- [3] E.L. Akim, “Opredelenie gravitacionnogo polya Luny po dvizheniyu iskusstvennogo sputnika Luny “Luna-10”, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. **170**(4), 799-802. WOS:A19668359500015 (1966).
- [4] E.L. Akim, I.K. Baginov, V.P. Pavlov, V.N. Pochukaev, *Pole tyagoteniya Luny i dvizheniyum ee iskusstvennykh sputnikov*, M.: Mashinostroenie (1984).
- [5] E.L. Akim, Z.P. Vlasova, “Model gravitacionnogo polya Luny po nabluydeniyam za dvizheniyum ee iskusstvennykh sputnikov “Luna-10, -12, -14, -19 I -22”, *Dokl. Akad. Nauk SSSR*. **235**(1), 38-41 (1977). E.L. Akim, T.M. Eneev, “Dvizhenie iskusstvennykh sputneykov zemli. Mezplanetnye polity”, *Prikladnaya nebesnaya mehanika i upravlenie dvizheniem. Sbornik statei, posviashchenny`i` 90 letiiu so dnia rozhdeniia D.E. Ohotcimskogo. M.: IPM im. M.V. Keldysha*, 7-27 (2010). <http://keldysh.ru/e-biblio/okhotsimsky/>

- [6] I.K. Baginov, V.P. Gavrilov, V.D. Yastrebov, E.L. Akim, R.F.Appazov, G.S. Zaslavskiy i dr., *Navigacionnoe obespechenie poleta orbitalnago kompleksa «Salyut-6»-«Soyuz»-«Progress»*, Moskva: Nauka (1985).
- [7] V.P. Savinyh, *Zapiski s mertvoi stancii*, M.: ID “Sistemy Alisa” (1999).
- [8] Ballistiko-navigacionnoe obespechenie proekta “Vega”, Itogovyj otchet, Moskva (1986).
- [9] E.L. Akim, G.S.Popov, R.V.Kalashnikov, A.N.Myamlin, Informacionno-vychislitel'naya sistema dlya ballisticheskogo obespecheniya poleta kosmicheskikh apparatov, *Trudy IV nauchnyh chtenii po kosmonavtike*, Moskva (1980).
- [10] <http://www.kiam1.rssi.ru/~den/solar.html> (Accessed October 11 2019)
- [11] G.K. Borovin, I.S. Ilin, A.G. Tuchin, Quasi periodic orbits in the vicinity of the Sun-Earth L2 point and their implementation in “SPECTR-RG” & “MILLIMETRON”, *Mathematica Montisnigri*, **30**, 37-45 (2014).
- [12] G.K. Borovin, M.V. Zakhvatkin, V.A. Stepanyants, A.G. Tuchin, “Determination and prediction of orbital parameters of the “RADIOASTRON” mission”, *Mathematica Montisnigri*, **30**, 76-98 (2014).
- [13] G. Borovin, Yu. Golubev, A. Grushevskii, V. Koryanov, A. Tuchin, D. Tuchin, “Mission design in systems of outer planets within model restricted two-coupled three-body problem”, *Mathematica Montisnigri*, **32**, 43-57 (2015).
- [14] G.K. Borovin, I.S. Ilin, A.G. Tuchin, “Quasi periodic orbits in the vicinity of the Sun-Earth L1 point and their implementation in “SODA” mission”, *Mathematica Montisnigri*, **37**, 5-23 (2016)
- [15] G.K. Borovin, A.V. Grushevskii, A.G. Tuchin, D.A. Tuchin, “Russian exploration of Venus: Past and Prospects”, *Mathematica Montisnigri*, **45**, 137-148 (2019). DOI: [10.20948/mathmontis-2019-45-12](https://doi.org/10.20948/mathmontis-2019-45-12)
- [16] E.L. Akim, A.P. Astahov, R.V. Bakitko, V.P. Polshikov, V.A. Stepanyants, A.G. Tuchin, D.A. Tuchin, V.S. Yaroshevsky, “Avtonomnaya navigacionnaya sistema okolozemnogo kosmicheskogo apparata”, *Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya*, **2**, 139-156 (2009).

Received October 15, 2019