

УДК 682 + 531.6, 519

Г.Б. ЕФИМОВ, М.В. ЕФИМОВА

**РАБОТЫ Д.Е. ОХОЦИМСКОГО ПО СИМВОЛЬНЫМ ВЫЧИСЛЕНИЯМ  
НА КОМПЬЮТЕРЕ И ПРОГРАММИРОВАНИЮ**

**Анотація.** У статті описуються праці академіка Д.Є. Охоцимського, ветерана ІПМ ім. М.В. Келдыша, з програмування, починаючи з перших вітчизняних обчислювальних машин, з комп'ютерної алгебри, програмних комплексів розрахунку і управління польотами космічних апаратів, управління рухом і сприйняття рухомих робіт.

**Ключові слова:** історія науки, комп'ютерна алгебра, програмування, космонавтика.

**Аннотация.** Описываются труды академика Д.Е. Охоцимского, ветерана ИПМ им. М.В. Келдыша, по программированию, начиная с первых отечественных вычислительных машин, по компьютерной алгебре, программным комплексам расчета и управления полетами космических аппаратов, управления движением и восприятием подвижных роботов.

**Ключевые слова:** история науки, компьютерная алгебра, программирование, космонавтика.

**Abstract.** The works of professor D. Okhozimsky, a colleague of M. Keldysh and S. Korolev, in Programming and Computer Algebra are discussed. D. Okhozimsky is a pioneer of using first soviet computers in the area of Cosmonautics, Robotics and the Programs for space vehicles control.

**Keywords:** history of science, computer algebra, programming, space research.



Д.Е. Охоцимский

**1. Введение**

В 2011 году исполнилось 90 лет со дня рождения Дмитрия Евгеньевича Охоцимского (1921–2005), выдающегося ученого, академика Российской академии наук. Его главные достижения относятся к механике космических полетов. Охоцимский Д.Е. был ближайшим соратником М.В. Келдыша, Главного теоретика космонавтики, и С.П. Королева, ее Главного конструктора. Работы Дмитрия Евгеньевича и руководимого им отдела № 5 Института прикладной математики РАН относятся к теории движения и управления ракет, динамике космических полетов. Им, вместе с сотрудниками, параллельно с ОКБ С.П. Королева и другими, рассчитывались траектории полетов первого спутника Земли, первых полетов к Луне и создания ее спутников, полетов к Марсу и Венере. Была рассчитана возможность спуска человека с орбиты спутника, полет первого космонавта Юрия Гагарина и дру-

гие замечательные достижения советской космонавтики, принесшие славу нашей стране и нашей науке [1, 2]. Одновременно Д.Е. Охоцимский активно и творчески использовал вычислительную технику, был ее энтузиастом, следил за ее развитием и использовал ее в своих работах и работах своего коллектива.

**2. Первые, пионерские работы на ЭВМ**

Исследования полетов в космосе, как и другие работы института, требовали большого объема сложных вычислений и опирались на использование электронных вычислительных машин (ЭВМ), которые создавались в те же годы, для решения тех же задач, на новые методы

расчета и средства программирования. Вычислительный центр ИПМ (ОПМ – Отделения прикладной математики МИАН имени В.А. Стеклова, как он назывался в первые годы из соображений секретности) был одним из самых первых в стране, его вычислительная машина М-20 имела заводской номер 1. Институт объединял физиков, математиков, механиков, программистов и создателей вычислительных машин. Среди них широко известные в области программирования лица: А.А. Ляпунов, М.Р. Шура-Бура, Э.З. Любимский, Ю.И. Янов, И.Б. Задыхайло, В.С. Штаркман, Д.А. Карягин и многие другие. Разработчиками машин во главе с А.Н. Мямлиным были созданы машины “Восток”, Рефал-процессор ЕС-2702, многопроцессорные суперкомпьютеры МВС-100 и МВС-1000 в 1990-е годы и в наши дни 100К, названный в честь юбилея М.В. Келдыша.

Дмитрий Евгеньевич был не просто пользователем передовой вычислительной техники, не ограничивался помощью вычислителей и программистов, он проявлял живейший интерес ко всем новейшим веяниям в развитии и использовании ЭВМ. Интересовался новинками, включая средства системного программирования, поощрял их освоение и внедрял их в работы руководимого им отдела. Первой работой в отделе на ЭВМ был расчет действия сильного взрыва в атмосфере – это был ведущий профиль работ, которыми занимались в только что созданном институте. Вычислительный центр ОПМ тогда был оснащен механическими вычислительными машинами “Мерседес” [3]. Но уже создавались первые отечественные вычислительные машины. Использование ЭВМ БЭСМ-2, по современным меркам убогой (сравнимой, наверное, с компьютером хорошего мобильного телефона), позволило Дмитрию Евгеньевичу с сотрудниками получить точное решение задачи, недоступной по сложности и объему вычислений для расчетов на “Мерседес” [3, 4].

Другой работой этого начального этапа применения ЭВМ, в которой Дмитрий Евгеньевич был среди пионеров и энтузиастов даже в ИПМ, были создание методики и расчет времени существования спутника. Эта работа опубликована в особом выпуске “Успехов физических наук” в 1957 году, накануне запуска первого спутника, вместе с другими трудами по космической тематике. В этой работе был применен метод численного осреднения движения спутника в атмосфере для расчета времени его существования [2, 5]. Вычислительных машин было мало, время работы на них было остро дефицитным. Об этом можно судить по письму М.В. Келдыша в 1956 году с просьбой выделить 30 часов машинного времени для расчетов полетов спутников [6]. В.А. Егоров, например, считал траектории полетов к Луне, на основании которых вскоре проектировали первые полеты к ней, по ночам, на “Стреле”, потихоньку, вне плановых работ [2, 7, 8].

### **3. Работы по символьным вычислениям на ЭВМ**

Пионерским был зачин Д.Е. Охоцимского и в области преобразований формул на ЭВМ [9]. Идея научить компьютер проводить преобразования формул в традициях привычной классической математики привлекала многих первопроходцев в области компьютерных вычислений. Работы в области небесной механики занимали среди них ведущее место благодаря большому заделу в классических методах, типах задач, в необходимости работать с громоздкими выражениями [10–12]. Сейчас эта область получила имя компьютерной алгебры (КА) [11–13]. Дмитрий Евгеньевич построил решение в задаче о разгоне космического аппарата двигателем малой тяги (электроракетным) с орбиты спутника до ухода его в межпланетный полет. Две асимптотики для раскручивающейся спиральной траектории строились в виде формальных степенных рядов в окрестности сингулярных точек (центра притяжения и бесконечности, до которых продлевалась в обе стороны спираль разгона) и соединялись в регулярной области численно. Расчет был проведен на машине “Стрела”.

Это была реализация программы по компьютерной алгебре на ЭВМ и построение асимптотических разложений, прозвучавшей в пленарном докладе академика А.А. Дородницына на Первой Всесоюзной конференции по программированию в 1956 году [13]. Тогда

же ей была посвящена работа А.А. Стогния, предложившего алгоритм дифференцирования функции и построения аналитического решения на МЭСМ, одной из первых отечественных ЭВМ [13, 14]. Расчет траектории полета аппарата с использованием компьютерной алгебры поставил Дмитрия Евгеньевича в ряд пионеров нового направления в программировании.

Построение асимптотических разложений в автоматическом режиме с помощью рекуррентной процедуры на ЭВМ происходило по следующей схеме. В области действия асимптотик, вблизи центра притяжения и вдали от него, имеется малый параметр  $\xi$  (переменная) – расстояние от центра притяжения в первом случае и величина, ему обратная, во втором. Асимптотики в той и другой области строились в виде степенных полиномов по степеням  $\xi$ , причем переменные масштабированием приводились к величинам  $\sim \text{const}$ .

Оператор производной в форме  $\xi d/d\xi$  преобразует степенной полином  $\sum a_i \xi^i$  в  $\sum i a_i \xi^i$  с коэффициентами, умноженными на показатель степени каждого монома. В левых частях уравнений движения собирались старшие относительно малого параметра члены, а в правых частях – переменные и их комбинации, имеющие множителем положительную степень малого параметра. Таким образом, уравнения принимают рекуррентный вид, и их левые части образуют систему уравнений, линейную относительно входящих в нее переменных.

Вычисление переменных в виде полиномов начиналось заданием нулевых их коэффициентов – постоянных. Одни из них определялись при выделении особенностей, масштабировании переменных, другие суть произвольные постоянные и задавались произвольно (их значения определялись в процессе решения краевой задачи при соединении асимптотик участком численного счета). Подставив полиномы с известными коэффициентами при  $\xi^0$  в правые части уравнений, в силу их рекуррентности в правой части имеем известные коэффициенты при первой степени  $\xi$  как функции нулевых коэффициентов полиномов. Для определения коэффициентов при первой степени  $\xi$  имеем линейную систему уравнений в левой части с известными свободными членами. Если определитель этой системы не равен нулю, все коэффициенты при первой степени  $\xi$  определяются. Процедуру повторяем и определяем нужное число коэффициентов полиномов вплоть до заданной степени  $\xi$ .

Определитель левой части системы уравнений может обращаться в нуль независимо от номера степени  $\xi$ , если имеет место вырождение системы уравнений, например, резонанс. Тогда система должна быть преобразована к невырожденному виду. Если имеет место вырождение при определенной степени  $\xi$  (из-за переменных коэффициентов от  $\xi d/d\xi$ ), то один из коэффициентов – произвольная постоянная; ее значение задает траекторию из семейства, представляемого асимптотикой. Построение асимптотик в виде полиномов автоматизировалось с помощью программ для работы со степенными полиномами, которые задавались векторами коэффициентов с фиксированным положением коэффициента при данной степени  $\xi$ . Система программ в машинных кодах была разработана Т.И. Фроловой при консультации А.С. Фролова. Это была одна из первых отечественных программ по КА [10, 15].

Продолжением этой задачи стала диссертация Г.Б. Ефимова, аспиранта Дмитрия Евгеньевича. Спираль разгона вблизи центра притяжения была не единственной особой траекторией, а включала целое семейство, переменные задачи представлялись полиномами Фурье с аргументом – полярным углом  $\varphi$ , с коэффициентами в виде полиномов по степеням малого параметра  $\xi$ , монотонной функцией расстояния до центра притяжения. В компьютерной алгебре эти объекты носят название рядов Пуассона. Совместно с Т.И. Фроловой был разработан достаточно сложный комплекс программ для работы с этими рядами на “М-20” и решена серьезная и громоздкая задача [16]. Работы по КА для задач небесной механики и механики космического полета проводили в отделе А.П. Маркеев, М.Л. Лидов с сотрудниками, А.Г. Сокольский, В.А. Сарычев с С.А. Гутником, в наши дни – А.С. Кулешов, М.А. Ваш-

ковьяк и др. [10–12]. Дмитрий Евгеньевич вошел в комиссию Академии наук по автоматизации программирования.

#### **4. Программистские работы в других направлениях**

Дмитрий Евгеньевич интересовался всеми новинками в области компьютеров и программирования и осваивал их, в том числе лично и с ближайшими помощниками. Когда в ИПМ появилась импортная машина с дисплеем (без полного матобеспечения и документации), он организовал ее освоение, на ней же была выполнена анимация движения модели шагающего робота и эволюция галактик при их гравитационном взаимодействии. Последняя знакома многим: она в течение многих лет была заставкой популярной телепередачи “Очевидное – невероятное”. Эти пионерские работы показали мощь компьютерной визуализации и внесли заметный вклад в соответствующие области науки [17–19].

Пятый отдел ИПМ участвовал в разработке траекторий полетов к Луне, Марсу, Венере, к их искусственным спутникам. Были проведены пионерские работы по баллистике, управлению и навигации полетов аппаратов в космосе, создавались большие комплексы программ [2, 8]. По предложению М.В. Келдыша и С.П. Королева, в ИПМ был создан Баллистический центр для обеспечения управления полетом пилотируемых кораблей и автоматических аппаратов. На основе разработанных алгоритмов и программ были созданы программные комплексы для управления полетом комических аппаратов на всех участках и этапах полетов [19, 20]. Работа баллистического центра обеспечивала повседневное сопровождение большого числа космических аппаратов и, из-за большого объема работ, зачастую круглосуточных, требовала автоматизации при использовании этих программных средств. Потребовалось создать комплексы автоматизированной обработки поступающих с пунктов слежения данных и интерактивные системы реального времени высокой производительности для управления полетом космических аппаратов. Операторы баллистики выполняли лишь функции контроля за процессами в системе и могли оперативно вмешиваться в них.

Для создания комплекса потребовалось разработать его облик и реализовать целый ряд системных и программных идей. В его состав входило несколько ЭВМ, выполнявших вычисления, и машина управления ими. Был создан супервизор – надстройка над операционными системами машин для обеспечения их совместной работы. Разработан монитор для комплексного управления задачами (баллистическими расчетами) и данными (потоками информации) с банком данных для информации различного рода. Вместе с двумя другими Баллистическими центрами центр ИПМ в течение многих лет успешно обеспечивал и обеспечивает полеты многочисленных отечественных космических аппаратов. Дмитрий Евгеньевич вложил много сил в создание комплекса, старался, чтобы он соответствовал самым современным достижениям отечественной вычислительной техники, системного и программного обеспечения, чтобы операторы баллистики центра (немногочисленные в сравнении с персоналом других центров) имели максимум удобств в своей нелегкой работе [20–22].

Еще один большой комплекс работ был связан с ракетно-космической системой “Энергия-Буран”. Проведенный по поручению М.В. Келдыша анализ американской много-разовой системы “Спейс-шатл” показал, что она имеет двойное назначение и США могут с ее помощью создавать серьезную угрозу безопасности страны [8, 23]. На высшем уровне было решено создавать аналогичную систему “Энергия-Буран”. ИПМ и отдел приняли в ее разработке самое активное участие, в том числе в научном и программном обеспечении спуска орбитального корабля “Буран” на аэродром в автоматическом режиме. Сюда входили работы по моделированию различных участков полета, разработка алгоритмов управления, создание матобеспечения бортового вычислительного комплекса, проверка бортового программного обеспечения для участка спуска. Полет и посадка “Бурана” в автоматическом режиме прошли успешно. Американский аэрокосмический журнал назвал посадку “Бурана” выдающимся нашим достижением после первого спутника и полета Гагарина [23].

## 5. Исследования программистского плана в робототехнике

С конца 1960-х годов Дмитрий Евгеньевич вместе со значительной частью сотрудников отдела и учениками начал осваивать новую область – робототехнику [2, 19]. В процессе этих исследований развивались и применялись различные области искусственного интеллекта, системного программирования и теории управления. Разрабатывались различные аспекты машинного видения, элементов искусственного интеллекта, компьютерной графики и др. [24–27]. Для построения алгоритмов движения роботов, с учетом препятствий, определения положения в пространстве, выбора пути движения и т.п. разрабатывались алгоритмы многоуровневого типа [24]. Были разработаны и реализованы программные системы управления ситуацией и движением робота [25]. Дмитрий Евгеньевич с увлечением отслеживал развитие различных направлений и задач, погружался в обсуждение возникающих проблем и идей, прилагал много сил для реализации их в макетах и образцах роботов разного рода и нескольких поколений. Программистская компонента всех этих работ была, очевидно, весьма значительна, в том числе и системная компонента, которую в отделе развивали в сотрудничестве и параллельно с работами программистов других отделов и смежных организаций, занимавшихся этой темой [26].

## 6. Выводы

В процессе многолетних работ по механике космического полета и робототехнике Дмитрий Евгеньевич выполнил многочисленные исследования с применением самых совершенных на тот момент средств вычислительной техники и программных средств. Он стимулировал их развитие в отделе и вместе с другими отделами института принимал в них самое активное участие. В процессе этих работ в отделе выросла целая школа прекрасных специалистов высокого уровня – как в области механики и управления, так и в программировании.

Работа поддержана грантами РФФИ 09-01-00299 и НШ.1123.2008.1.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Келдыш М.В. Избранные труды. Ракетная техника и космонавтика / Келдыш М.В.; под ред. В.С. Авдеевского, Т.М. Энеева. – М.: Наука, 1988. – 430 с.
2. Прикладная механика и управление движением: сб. статей, посвященный 90-летию со дня рождения Д.Е. Охочимского [Электронный ресурс]. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2010. – 368 с. – Режим доступа: <http://keldysh.ru/memory/okhotsimsky>.
3. Казакова Р.К. Точечный взрыв в атмосфере / Р.К. Казакова // Прикладная механика и управление движением. – М., 2010. – С. 107 – 118.
4. Расчет точечного взрыва с учетом противодавления / Д.Е. Охочимский, И.Л. Кондрашова, З.П. Власова [и др.] // Труды Математического института им. В.А. Стеклова. – М.: Изд-во АН СССР, 1957. – Т. L. – 150 с.
5. Охочимский Д.Е. Определение времени существования искусственного спутника Земли и исследование вековых возмущений его орбиты / Д.Е. Охочимский, Т.М. Энеев, Г.П. Таратынова // УФН. – 1957. – Т. 63, Вып. 1а. – С. 33 – 50.
6. Келдыш М.В. О выделении машинного времени на ЭВМ для расчетов по ИСЗ. Письмо М.А. Лаврентьеву / М.В. Келдыш // Ракетная техника и космонавтика. – М., 1988. – С. 234 – 235.
7. Егоров В.А. О некоторых задачах динамики полета к Луне / В.А. Егоров // УФН. – 1957. – Т. 63, Вып. 1а. – С. 73 – 117.
8. Охочимский Д.Е. Прикладная небесная механика и управление движением / Д.Е. Охочимский, Т.М. Энеев, Э.Л. Аким [и др.] // Прикладная механика и управление движением. – М., 2010. – С. 328 – 367.
9. Охочимский Д.Е. Исследование движения в центральном поле сил под действием постоянного касательного ускорения / Д.Е. Охочимский // Космические исследования. – 1964. – Т. 2, № 6. – С. 817 – 842.

10. Ефимов Г.Б. Компьютерная алгебра в Институте прикладной математики им. М.В. Келдыша [Электронный ресурс] / Г.Б. Ефимов, Е.Ю. Зуева, И.Б. Щенков // Математическое моделирование. – 2001. – Т. 13, № 6. – С. 11 – 18. – Режим доступа: [http://library.keldysh.ru/prep\\_ls.asp](http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp); Efimov G.B. On the History of Computer Algebra at the Keldysh Institute of Applied Mathematics / G.B. Efimov, I.B. Tshenkov, E.Yu. Zueva // SoRuCom 2006. J. Impagliazzo, E. Proydakov (eds.). – Schpringer, IFIP AICT 357, 2011. – P. 220 – 227.
11. Ефимов Г.Б. Из истории развития и применения компьютерной алгебры в ИПМ им. М.В. Келдыша / Г.Б. Ефимов // Математичні машини і системи. – 2003. – № 2. – С. 96 – 105; Ефимов Г.Б. Из истории развития и применения компьютерной алгебры в Институте прикладной математики имени М.В. Келдыша / Ефимов Г.Б., Зуева Е.Ю., Щенков И.Б. – М., 2003. – (Препринт ИПМ № 27). – Режим доступа: [http://library.keldysh.ru/prep\\_ls.asp](http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp).
12. Грошева М.В. История использования аналитических вычислений в задачах механики [Электронный ресурс] / М.В. Грошева, Г.Б. Ефимов, В.А. Самсонов. – М.: ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, 2005. – 87 с. – Режим доступа: [http://library.keldysh.ru/prep\\_ls.asp](http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp); Ефимов Г.Б. Об истории использования отечественных систем символьных преобразований в механических приложения [Электронный ресурс] / Г.Б. Ефимов, М.В. Грошева // Математичні машини і системи. – 2008. – № 1. – С. 85 – 90. – Режим доступа: [http://library.keldysh.ru/prep\\_ls.asp](http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp); Ефимов Г.Б. Из истории отечественной компьютерной алгебры [Электронный ресурс] / Г.Б. Ефимов, М.В. Грошева // Математичні машини і системи. – 2009. – № 2. – С. 61 – 67. – Режим доступа: [http://library.keldysh.ru/prep\\_ls.asp](http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp).
13. Ершов А.П. Становление программирования в СССР. Ч.1. Начальное развитие. Ч.2. Переход ко второму поколению языков и машин / Ершов А.П., Шура-Бура М.Р. – Новосибирск: ВЦ СО АН СССР, 1976. – 42 с.; 41 с. – (Препринт № 12, № 13); Кибернетика. – 1976. – № 6. – С. 141 – 160.
14. Стогний А.А. Решение на ЦВМ одной задачи, связанной с дифференцированием функций / А.А. Стогний // Проблемы кибернетики. – 1962. – №7. – С. 189 – 200.
15. Ефимов Г.Б. Работы Д.Е. Охоцимского по разгону космического аппарата с малой тягой и исследования по полетам с малой тягой в Институте прикладной математики / Г.Б. Ефимов // Прикладная механика и управление движением. – М., 2010. – С. 57 – 72.
16. Ефимов Г.Б. Предельное решение в задаче об оптимальном разгоне аппарата с малой тягой в центральном поле / Г.Б. Ефимов // Космические исследования. – 1970. – Т. 8, № 1. – С. 26 – 45.
17. Платонов А.К. Алгоритмы построения изображения на экране дисплея / Платонов А.К., Боровин Г.К., Карпов И.И., Лазутин Ю.М., Ярошевский В.С. – М., 1972. – (Препринт № 67/ИПМ АН СССР).
18. Козлов Н.Н. Приливное взаимодействие галактик / Н.Н. Козлов, Р.А. Сюняев, Т.М. Энеев // ДАН СССР. – 1972. – Т. 204, № 3. – С. 579 – 582.
19. Платонов А.К. О построении движений в баллистике и мехатронике / А.К. Платонов // Прикладная механика и управление движением. – М., 2010. – С. 127 – 222.
20. Аким Э.Л. Движение искусственных спутников Земли. Межпланетные полеты / Э.Л. Аким, Т.М. Энеев // Прикладная механика и управление движением. – М., 2010. – С. 7 – 28.
21. Аким Э.Л. Определение параметров движения космического летательного аппарата по данным траекторных измерений / Э.Л. Аким, Т.М. Энеев // Космические исследования. – 1963. – Т. 1, №1. – С. 5 – 50.
22. Информационно-вычислительная интерактивная система для баллистического обеспечения полета космических аппаратов / Э.Л. Аким, А.Н. Мямлин, Г.С. Попов [и др.] // Труды 4 Объединенных научных чтений по космонавтике. Секция “Прикладная небесная механика и управление движением”. – М., 1980. – С. 5 – 15.
23. Сихаулидзе Ю.Г. Слово об академике Д.Е. Охоцимском / Ю.Г. Сихаулидзе // Прикладная механика и управление движением. – М., 2010. – С. 273 – 291.
24. Охоцимский Д.Е. Алгоритмы управления шагающим аппаратом, способным преодолевать препятствия / Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов // Известия АН СССР, техническая кибернетика. – 1973. – № 3. – С. 3 – 10.
25. Макаров И.М. Научные проблемы программного обеспечения робототехнических систем / И.М. Макаров, Д.Е. Охоцимский, А.К. Платонов // Программное обеспечение промышленных роботов. – М.: Наука, 1986. – С. 5 – 20.
26. Платонов А.К. Системное программное обеспечение задач робототехники / А.К. Платонов, Ю.М. Лазутин, В.С. Ярошевский // Программное обеспечение промышленных роботов. – М.: Наука, 1986. – С. 110 – 122.

27. Зуева Е.Ю. Компьютерное зрение в ИПМ им. В.М. Келдыша РАН – история развития / Е.Ю. Зуева [Электронный ресурс] // Математичні машини і системи. – 2009. – № 4. – С. 18 – 26. – Режим доступа: [http://library.keldysh.ru/prep\\_ls.asp](http://library.keldysh.ru/prep_ls.asp).

*Стаття надійшла до редакції 14.07.2011*