Том 32 № 1 2026

DOI: 10.21538/0134-4889-2026-32-1-7-26

К 85-ЛЕТИЮ СО ДНЯ РОЖДЕНИЯ ВИТАЛИЯ ЛЕОНИДОВИЧА ГАСИЛОВА

В. И. Бердышев, В. Б. Костоусов

Статья посвящена деятельности крупного ученого, математика и механика Виталия Леонидовича Гасилова, который оставил яркий след не только в истории Института, но и в истории российской науки.

Ключевые слова: навигация по карте геофизического поля, поисковый корреляционно-экстремальный алгоритм, системы наведения объектов.

V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov. To the 85th anniversary of the birth of Vitaly Leonidovich Gasilov.

The article is devoted to the activities of the prominent scientist, mathematician, and mechanic Vitaly Leonidovich Gasilov, who left a bright mark not only in the history of the Institute but also in the history of Russian science.

Keywords: map-aided navigation, correlation-extreme search algorithm, object guidance systems.

Введение

Двенадцатого декабря 2025 г. исполнилось 85 лет со дня рождения математика и механика по образованию, мастера прикладной математики по призванию, Виталия Леонидовича Гасилова, оставившего яркий след не только в истории Института, но и в истории российской науки. В. Л. Гасилов внес большой вклад в развитие математической теории управления, современных методов высокоточной навигации летательных аппаратов и других разделов прикладной математики и механики. Его пионерские работы 1980-х гг., посвященные проблемам высокоточной навигации летательных аппаратов, до сих пор ложатся в основу проектов, направленных на создание востребованных жизнью систем автономной навигации и наведения движущихся управляемых объектов. Он являлся научным руководителем и непосредственным исполнителем большого числа научно-исследовательских и опытно-конструкторских программ, направленных на создание прецизионных систем управления движущимися объектами и выполнявшихся совместно с ведущими в стране организациями — разработчиками в этой области. Им исследованы принципы построения высокоточных систем навигации и наведения летательных аппаратов, использующих коррекцию параметров движения по наблюдениям физических полей окружающей среды, разработаны методы теоретической оценки достижимой точности коррекции навигационных ошибок, предложены и изучены эффективные алгоритмы коррекции параметров движения, такие как ориентирование по характерным особенностям полей, по контурам объектов, по “максимальным граничным элементам”, по образу цели и ее окружения. Полученные В. Л. Гасиловым результаты в данной области были использованы в успешных конструкторских разработках. В 1993 г. за эти достижения В. Л. Гасилову в составе авторского коллектива присуждена Государственная премия Российской Федерации в области науки и техники.

Материал статьи основан на следующих источниках: рукописные материалы из архива В. Л. Гасилова; работы В. Л. Гасилова и коллег; статья “В его окне всегда был свет” Е. Е. Понизовкиной в газете “Наука Урала” [23].

1. Биография

Виталий Леонидович Гасилов родился 12 декабря 1940 г. в селе Шкотово Приморского края. Его отец, Гасилов Леонид Александрович, служил в рядах Советской армии; по выходу на пенсию работал инженером в автоколонне в Свердловске. Мать, Гасилова (урожденная Борисова) Александра Михайловна, была домохозяйкой, что являлось обычным для жены военного. Виталий Гасилов закончил в 1958 г. среднюю школу в г. Шверин (ГДР) — по месту службы отца, затем приехал в Свердловск и поступил на математико-механический факультет Уральского государственного университета им. А. М. Горького.

Е. А. Барбашин с молодыми учеными С. Т. Завалищиным и В. Л. Гасиловым.

Учебу Виталий Леонидович окончил с отличием в 1963 г. Уже в студенческие годы В. Л. Гасилов включился в научную работу. Его научным руководителем был выдающийся математик Евгений Алексеевич Барбашин (17.01.1918 – 5.07.1969), который создал свердловскую школу дифференциальных уравнений и внес значительный вклад в создание и укрепление Свердловского отделения Математического института (СОМИ) АН СССР. Евгений Алексеевич был также замечательным педагогом и благодаря ему многие молодые люди открыли для себя красоту и глубину математики. Среди его студентов были В. Л. Гасилов и С. Т. Завалищин, которые, следуя примеру учителя, посвятили всю свою жизнь изучению и развитию сложных и неизведанных разделов математики, таких как теория нелинейных динамических систем с нерегулярными и разрывными характеристиками при наличии постоянно действующих возмущений различного класса.

Дипломная работа В. Л. Гасилова на тему “Скользящие режимы в релейных системах” была отмечена научным руководителем как исключительно оригинальное научное исследование.

О том, каким студентом был Виталий Гасилов, вспоминал в 2002 г. академик Николай Николаевич Красовский (1924 – 2012): “Он отличался выдающимися способностями к математике и механике, умением их использовать и исключительной добросовестностью. При этом никогда намеренно не демонстрировал свои знания и возможности, а обнаруживал их лишь тогда, когда это требовалось. Если можно так выразиться, он любил не себя в науке, а науку в себе. Это суждение не только мое, но и его учителя, выдающегося математика Евгения Алексеевича Барбашина” [23].

В 1963 г. Виталий Леонидович поступил на работу в Свердловское отделение Математического института им. В. А. Стеклова АН СССР. На работу его принимал основатель и директор СОМИ Сергей Борисович Стечкин (1920 –1995) и, как позже рассказывал Виталий Иванович Бердышев, С. Б. Стечкин при приеме молодого специалиста на работу с симпатией говорил: “А Вы, *красава*, чем собираетесь заниматься?”.

Позже в 1970 г. СОМИ был преобразован в Институт математики и механики Уральского отделения Российской Академии наук. Виталий Леонидович работал в Институте с 1 августа 1963 г. вплоть до своей кончины 13 ноября 2002 г.

Научные результаты В. Л. Гасилова отражены в 60 публикациях и в 63 научно-технических отчетах. В 1993 г. В. Л. Гасилов защитил докторскую диссертацию по специальности системный анализ и автоматическое управление.

В. Л. Гасилов награжден медалью “За трудовое отличие” (1985), ему присвоено звание “Заслуженный деятель науки” (1999).

2. Исследования в области теории управления в нелинейных системах

Исследования В. Л. Гасилова в области нелинейных систем отражены в работах [4–10].

В 1968 г. В. Л. Гасилов защитил кандидатскую диссертацию на тему “Осуществление программных движений управляемых систем при постоянно действующих возмущениях”.

Очень ёмко содержание работы и характеристика диссертанта изложены в отзыве научного руководителя Е. А. Барбашина: “Диссертация В. Л. Гасилова посвящена важному вопросу выбора управления, реализующего заданное программное движение. Исследование вопроса проводилось с учетом последующего приложения к синтезу автоматов стабилизации.

Автор исходит из реального предположения, что возмущающие силы, действующие на систему, не являются малыми и не могут быть непосредственно измеренными. Информация о возмущающих силах получается в результате изучения движения, реализовавшегося в предшествующий период времени. На основе определенного способа прогнозирования строится управление на следующем интервале времени. При построении управления оптимизируется величина вектора отклонения на конце рассматриваемого интервала.

Таким образом, автор, сохраняя преимущества следящей системы, добивается более высокой точности отслеживания заданного сигнала, более высокого быстродействия отслеживания и более гибкого и эффективного способа борьбы с нежелательными возмущениями по сравнению с существующими следящими системами.

Метод применим к объектам с переменными параметрами, непосредственное измерение которых невозможно. Применение метода автора в вопросах синтеза автоматов стабилизации предусматривает использование быстродействующих вычислительных устройств ... .

Особый интерес представляет также исследование автором адаптивной системы с эталонной моделью. В данном случае предполагается, что объект обладает переменными параметрами, незамеряемыми непосредственно, и подвергается действию незамеряемых возмущений. Имеется наряду с управляемым объектом некоторая эталонная модель. Выбор управления должен быть таким, чтобы выходной сигнал объекта совпадал с выходным сигналом эталонной модели. Автор решает эту задачу косвенно; исследуя движение объекта, он подбирает управление таким образом, чтобы производная по времени выходного сигнала совпадала с правой частью дифференциального уравнения, описывающего эталонную модель.

Автор приводит в диссертации ряд примеров применения своего метода, в своей работе он широко пользовался математическим экспериментированием с использованием электронно-вычислительных машин. В процессе работы над диссертацией автор постоянно учитывал задачи автоматики сегодняшнего дня и возможности вычислительной техники завтрашнего дня. И хотя работа автора носит поисковый характер с учетом перспективного приложения к важнейшим задачам регулирования, нет сомнения, что некоторые предложенные им способы осуществления программного движения могут быть реализованы и в настоящее время ... .”

В заключении отзыва Е. А. Барбашин также отметил, что достоинствами подхода диссертанта к работе является “постоянно ощущаемая ответственность перед решаемой задачей, отсутствие погони за красивой формой математических конструкций, привлечение всех математических средств, необходимых для решения задачи, независимо от субъективных вкусов и симпатий самого автора.”

После защиты кандидатской диссертации В. Л. Гасилов продолжил активно работать в области нелинейных управляемых систем. После отъезда научного руководителя Е. А. Барбашина в Минск, Виталий Леонидович перешел в отдел нелинейной механики, который возглавлял перспективный молодой математик и механик Евгений Иванович Геращенко (1939–1972). Е. И. Геращенко принадлежит известная монография “Метод разделений движений и оптимизации нелинейных систем" [20], которая до сих пор пользуется успехом у инженеров-специалистов по автоматическому регулированию.

Евгений Иванович Геращенко, заведующий отделом нелинейной механики.

В этом отделе В. Л. Гасилов с успехом приобщился к важным прикладным работам, проводимым в интересах оборонных предприятий Урала. Трагический случай зимой 1972 г. внезапно оборвал жизнь Евгения Ивановича Геращенко, и это существенно изменило судьбу многих молодых ученых — Виталия Леонидовича Гасилова, Льва Владимировича Киселева (1938 – 2023), Глеба Владимировича Малышева (1938 –1985), Виталия Михайловича Решетова (1941– 2015), Анатолия Федоровича Клейменова (1939 – 2022), Александра Николаевича Сесекина, Александра Петровича Кукушкина (1943 – 2013) и других сотрудников. Некоторое время Виталий Леонидович руководил лабораторией нелинейной механики ИММ УНЦ АН СССР, но в результате административной реорганизации лаборатория В. Л. Гасилова была расформирована, и часть ее сотрудников влилась в отдел дифференциальных уравнений, который возглавлял Юрий Сергеевич Осипов — будущий академик и президент Российской академии наук.

В то время в данном отделе развивалось сотрудничество с оборонными предприятиями по тематике математического моделирования и управления летательными аппаратами. Собственно, именно под эти задачи и был в свое время создан по инициативе академика Николая Николаевича Красовского отдел дифференциальных уравнений. В 1977 г., когда в отдел пришел Виталий Леонидович, руководством оборонной организации была поставлена задача повышения точности навигации летательных аппаратов по полю высот рельефа местности. С этого времени и началась плодотворная деятельность Виталия Леонидовича в области навигации по геофизическим полям.

3. Навигация по геофизическим полям

Наиболее значительных и ярких результатов Виталий Леонидович добился в сфере создания систем навигации движущихся объектов по геофизическим полям. Именно за эти работы в составе авторского коллектива он получил в 1993 г. Государственную премии Российской Федерации. В авторский коллектив, удостоенный премии, вошли академик РАН Юрий Сергеевич Осипов, тогдашний директор ИММ УрО РАН [12], и Геннадий Павлович Чигин (1934 – 2000), профессор Военно-воздушной академии им. профессора Н. Е. Жуковского и Ю. А. Гагарина, который занимался разработкой и созданием первой в стране системы высокоточной навигации по физическим полям Земли [22]. Следует отметить, в успешном развитии данной тематики в ИММ УрО РАН большую роль сыграло то, что к ней с большим энтузиазмом подключились сразу несколько отделов Института: отдел дифференциальных уравнений (рук. Ю. С. Осипов, В. Л. Гасилов), отдел приближения функций (рук. Ю. Н. Субботин, В. И. Бердышев), отдел прикладных задач (рук. А. Ф. Сидоров), отдел системного обеспечения (рук. В. В. Самофалов) и другие.

Ниже — насколько возможно в открытой публикации — описываются общие принципы, которые были выработаны в результате многолетнего опыта прикладных исследований в ИММ УрО РАН под руководством В. Л. Гасилова и при его непосредственном участии.

Результаты этих исследований частично отражены в работах [3; 13; 15; 16; 19].

В автономном движении информация о положении движущегося объекта (наземного движущегося средства, летательного или космического аппарата, надводного или подводного судна) поступает от инерциальной навигационной системы (ИНС). Интегрирование уравнений движения при заданных начальных условиях производится на борту объекта самой ИНС, и результатом является измеренная траектория объекта. При большом времени движения в автономном режиме такие измерения траектории содержат значительные накопившиеся ошибки [21]. Если управляющие воздействия формируются по принципу обратной связи в виде функции от измеряемых ИНС величин, то реализующаяся траектория со временем будет значительно отличаться от желаемой. Как правило, на небольших отрезках времени (интервалах измерения навигационных полей) известна структура ошибок измерения ИНС, но эта структура содержит неизвестные параметры. Например, в качестве таких параметров могут выступать координаты смещения начальной (или конечной) точки траектории и проекции вектора скорости. Тогда задача коррекции ошибок ИНС сводится к оцениванию этих параметров.

Эффективным средством коррекции накопленных ошибок является использование информации о внешних геофизических полях (ГФП), наблюдаемых в процессе движения объекта. При этом применяется корреляционно-экстремальный подход, который основан на экстремальном сравнении полученных измерений поля с априорной (эталонной) информацией о нем, хранящейся в памяти бортового вычислительного устройства [22].

В качестве ГФП могут выступать, например, магнитное, гравитационное поля Земли или поле высот рельефа, оптическая и радиотепловая яркость покровов подстилающей поверхности [1] и т. п. В простейшем случае берется одно скалярное информационное поле (например, высота рельефа земной поверхности), и оно измеряется одним датчиком (радиовысотомером). Однако могут использоваться и несколько различных физических полей, отличающихся как размерностью своей области определения (сфера, трехмерное пространство), так и размерностью значений измеряемого поля (скаляр, вектор). Отвлекаясь от этих физических подробностей авторы статьи [19] предложили единое математическое описание, учитывающее то общее, что присутствует в большинстве подобных задач.

В качестве результата измерений здесь рассматриваются компоненты вектора h из векторного пространства H соответствующей размерности. Будем считать, что этот вектор получен посредством работы некоторого обобщенного датчика. Для этого объединяются все измеряемые физические поля в одно информационное поле $h(\cdot)$, определенное на некотором пространстве S — *визируемом пространстве.* Например, в случае скалярного поля высот S — это поверхность земного эллипсоида. Размерность $dimH$ значения информационного поля h равна сумме размерностей всех измеряемых полей с учетом числа каналов каждого датчика. Размерность $dimS$ визируемого пространства S равна сумме размерностей областей определения для всех используемых полей. Заметим, что часто реальный физический датчик снимает информацию не в единственной точке, а в некоторой области — *пятно засветки.* При решении задачи навигации по ГФП вполне допустима привязка показаний датчика к некоторой "точке визирования" (например, к центру пятна засветки). Для краткости обобщенный датчик будем в дальнейшем называть просто *датчиком поля.*

Пусть $q(t),\ t \in [0, \vartheta]$, — траектория механической системы. Промежуток $[0, \vartheta]$ считаем фиксированным и всю траекторию в целом обозначим через $q(\cdot)$. В момент измерения $t_\alpha \in [0, \vartheta]$, $\alpha = 1, \ldots, N$, система находится в точке q_α пространства M, имеет скорость $\dot{q}_\alpha$ и условия визирования определяют положение точки $r_\alpha = f(q_\alpha, t_\alpha)$ визируемого пространства S, в которую направлен датчик. Положение точки визирования r на S зависит от положения механической системы в фазовом пространстве в данный момент времени $t \in [0, \vartheta]$, параметров установки датчика на носителе, а также от ориентации и состояния датчика в момент времени t (в соответствии с алгоритмом его функционирования). Все вместе это определяет условия визирования в виде функции f, определяющей в каждый момент t положение точки визирования $r(t) = f(q(t), t)$ на визируемом пространстве S, на котором задано информационное поле h. Измеренное значение поля в точке визирования r_α равно $h_\alpha = h(t_\alpha) = h(r_\alpha)$. Полагаем, что априори нам известно информационное поле в виде некоторой *эталонной карты поля* h_e.

Вслед за [19] упорядоченную (по времени) совокупность точек визирования $\{r_\alpha\}$ на поверхности S будем называть *трассой* измерений, а набор соответствующих значений информационного поля $\{h_\alpha\}$ — *профилем трассы.* Если дискретный характер трассы и ее профиля не влияет на рассуждения, будут использоваться также обозначения $r(\cdot)$ и $h(\cdot)$.

К моменту окончания измерений $t_N = \vartheta$ на борту движущегося объекта имеется следующая информация: карта информационного поля h_e, условия визирования f, измеренный профиль трассы $h(\cdot) = \{h_\alpha\}$ и моменты замеров $\{t_\alpha\}$. Кроме того, посредством ИНС измерена траектория $q(\cdot)$, содержащая неизвестные ошибки, которые подлежат коррекции.

Ключевым моментом является задача нахождения трассы, к которой относятся полученные замеры (в терминах работы [19] — задача *привязки* измерений к эталону). В результате ее успешного решения производится коррекция ошибок ИНС.

В реальной ситуации вся доступная информация содержит ошибки. Условия визирования определяются установочными и иными параметрами, которые могут быть измерены лишь приближенно, поэтому вместо истинного отображения f приходится использовать лишь некоторое эталонное отображение f_e. Вместо истинного поля h получается воспользоваться только его приближенной картой h_e (эталоном). Далее, ошибки входят и в измерения поля, поэтому измеренный профиль $h_m(\cdot)$ может отличаться как от истинного профиля данной трассы $h(\cdot)$, так и от ее эталонного профиля $h_e(\cdot)$, восстановленного по эталону поля. Наконец, истинная траектория $q(\cdot)$ отличается от траектории $q_m(\cdot)$, измеренной с помощью ИНС .

В соответствии с методом корреляционно-экстремальной навигации привязка измерений к эталону производится следующим образом.

Измеренная инерциальной системой траектория, условия визирования и априорная информация о динамике и системе управления объекта используются для выделения множества допустимых трасс $W = \{r_d(\cdot)\}$.

Каждой допустимой трассе $r_d(\cdot)$ можно поставить в соответствие допустимый профиль $h_d(\cdot)$, восстановленный по имеющейся карте поля $h_d(\cdot) = h_e(r_d(\cdot))$. Кроме того, рассматривая эту трассу в качестве гипотезы, сопоставим с ней и измеренный профиль $h_m(\cdot)$.

Для этого вводится функционал сопоставления $F(h_1(\cdot), h_2(\cdot))$, который оценивает расстояние между двумя профилями, отнесенными к одной и той же трассе $r(\cdot)$.

Во введенном функционале F зафиксируем один аргумент, приравняв его измеренному профилю трассы $h_m(\cdot)$, а в качестве другого аргумента будем рассматривать профили $h_e(\cdot) = h_e(r_d(\cdot))$, определяемые при помощи эталонной карты на каждой допустимой трассе. В результате получаем критерий невязки — функционал Φ на множестве допустимых трасс W (индекс “d” для краткости опускаем):

$$\Phi(r(\cdot)) = F(h_e(\cdot), h_m(\cdot)). \tag{3.1}$$

Этот функционал оценивает меру рассогласования гипотезы об истинности допустимой трассы с имеющимися измерениями [22].

Приведенные построения позволяют свести задачу навигации по ГФП к следующей экстремальной задаче:

Требуется найти трассу $r(\cdot)$, *доставляющую минимум функционалу невязки* $\Phi(r(\cdot))$ (*см.* (3.1)) *на множестве допустимых трасс* W*:*

$$\hat{r}(\cdot) = \operatorname{argmin}\{\Phi(r(\cdot)) | r(\cdot) \in W\}. \tag{3.2}$$

По традиции, сложившейся в отечественной научно-технической литературе [1; 22], метод, решающий задачу (3.2), называется корреляционно-экстремальным.

3.1. Алгоритмические и информационные компоненты задачи навигации по ГФП

Построение корреляционно-экстремального метода сводится к выбору следующих компонент:

- эталонная карта поля h;
- множество допустимых трасс W;
- критерий (функционал) невязки Φ;
- процедура минимизации Φ на W.

Наличие ошибок в априорной информации и измерениях порождает ошибку коррекции, которая, естественно, зависит от выбора указанных компонент. Рассмотрим эти компоненты более подробно.

Эталонная карта поля. Способ хранения априорной информации об измеряемом ГФП в значительной мере определяется выбором функционала невязки. Если структурные особенности поля не используются, то поле может храниться в виде матрицы его значений на равномерной сетке, покрывающей район ориентирования (например, цифровая карта рельефа). Для восстановления значений поля в промежуточных точках используется процедура интерполяции. Погрешность восстановления δh_e определяется ошибками задания значений поля в узлах сетки и ошибками интерполяции. В общем случае эта ошибка может быть описана (см. [24]) стационарным случайным процессом с известной корреляционной функцией $K(\rho)$.

В качестве эталонной карты для структурированных полей в [15; 19] предлагается использовать контурный эталон — упорядоченный набор контуров элементов, расположенных в зоне коррекции. Ошибки такого эталона можно разбить на два класса — локальные и структурные. К локальным ошибкам относятся ошибки положения границ, возникающие как за счет неточного указания положения угловых точек контуров, так и вследствие аппроксимации криволинейных (в плане) участков границ отрезками прямых. Структурные ошибки обусловлены изменением к моменту визирования конфигурации контурной мозаики границ структур (часть объектов может быть разрушена) и ошибками при формировании карты (ложные объекты).

Локальные ошибки положения границ можно оценить вектором отклонений соответствующих координат крайних точек отрезков реальной границы от соответствующих точек на эталоне. Такие ошибки характеризуются случайными величинами δr_e, которые в простейшем случае являются независимыми (по координатам), нормальными, с нулевым средним и среднеквадратическим значением σ_e. Структурные ошибки эталона можно оценить коэффициентом искажений K_{err}, который вычисляется как отношение суммарного числа разрушенных и ложных объектов к общему числу объектов на эталоне.

Множество допустимых трасс. По постановке задачи трасса измерений — упорядоченный набор точек $\{r_\alpha\}$ на визируемом пространстве S. При фиксированных условиях визирования трасса полностью определяется траекторией системы $q(t), t \in [0, \vartheta]$.

Вообще говоря, множество допустимых трасс W является бесконечномерным, как и множество допустимых траекторий. Однако при конструировании практически используемых алгоритмов удается с приемлемой точностью описать множество допустимых трасс с помощью конечного числа параметров. Любая трасса, рассматриваемая в качестве допустимой $r_d(\cdot)$, должна согласовываться с траекторией системы $q_m(\cdot)$, измеренной ИНС. Поэтому задача описания множества допустимых трасс тесно связана с описанием множества возможных траекторий системы. Траектория как решение уравнений движения определяется граничными условиями и измеренными действующими силами.

Параметризация множества допустимых трасс W может быть проведена следующим образом. Интегрируя уравнения движения при граничных условиях $q(\vartheta) = q_\vartheta$, $\dot{q}(\vartheta) = \dot{q}_\vartheta$, находим решение

$$q(t) = q(t, q_\vartheta, \dot{q}_\vartheta), \quad t \in [0, \vartheta].$$

Принимая $q_\vartheta, \dot{q}_\vartheta$ в качестве параметров с учетом условий визирования $f(q,t)$, получаем параметрическое описание множества допустимых трасс:

$$r_d(t, q_\vartheta, \dot{q}_\vartheta) = f(q(t, q_\vartheta, \dot{q}_\vartheta), t).$$

Не все введенные параметры фактически влияют на профиль трассы, даже если на саму трассу они оказывают влияние. Это обуславливается многими факторами — информативностью поля и чувствительностью датчика по отношению к данному параметру, условиями визирования и т. п. Так что число искомых параметров может быть значительно меньше размерности набора $(q_\vartheta, \dot{q}_\vartheta)$. При минимизации функции многих переменных размерность задачи и удачный выбор переменных сильно сказываются на трудоемкости и сходимости алгоритма коррекции.

В дальнейшем будем полагать, что выделено множество навигационных параметров P и доверительная область $D \in P$. Тогда множество допустимых трасс описывается соотношениями вида

$$W = \{\{r_{d\alpha}\} : r_{d\alpha} = r(t_\alpha, p),\ p \in D,\ \alpha = 0, \ldots, N\}, \tag{3.3}$$

где $r(t, p)$ — известная функция. Полагаем, что различным значениям p в (3.3) отвечают различные трассы.

На практике множество допустимых трасс формируется по измеренной траектории системы с использованием эталонных условий визирования f_e. Для этого принимается некоторая модель ошибок ИНС [22] и в качестве параметров p множества W выбираются неизвестные параметры этой модели. В важном частном случае такими параметрами могут быть, например, ошибки в измерениях начальной и конечной точки трассы либо ошибки в определении конечной точки и поправки по скоростям $p = (\delta q_\vartheta, \delta \dot{q}_\vartheta)$.

Критерий невязки. Функционал невязки должен оценивать "расстояние" между измеренным профилем и любым допустимым профилем, рассматриваемым в качестве гипотезы.

Геофизические поля, используемые для навигации, можно разбить на два класса в зависимости от их морфологических особенностей — это поля структурированные и поля непрерывные. Структурированными полями будем называть ГФП, при наблюдении которых явно обнаруживается наличие определенной структуры. Такая структура может, например, состоять из контрастных относительно фона областей (объектов), допускающих однотипное описание. При мониторинге земной поверхности подобную структуру наблюдаемого поля дают при соответствующем выборе спектра многие искусственные и естественные образования — районы промышленной и жилой застройки, сельхозугодия, дорожная и гидрологическая сеть и т. д. Примером непрерывного поля является поле высот рельефа — такие поля могут не обладать четко выраженной структурой.

При выборе критерия невязки морфологические характеристики поля должны учитываться. Если отсутствуют надежные методы выделения структур на карте либо если датчики не позволяют точно определить момент пересечения границ структурных образований, то профили сравниваются традиционным способом — путем задания метрики в пространстве векторфункций. В этом случае в качестве критерия невязки будем использовать квадратичный функционал. Такой функционал можно определить, например, по формуле

$$\Phi(\{r_{d\alpha}\}) = \sum_\alpha ||h_{d\alpha} - h_{m\alpha}||^2,$$

где $h_{m\alpha}, h_{d\alpha}$ — отсчеты измеренного и допустимого профилей соответственно, $||\cdot||$ — норма в пространстве H.

В любом случае требования к функционалу невязки заведомо противоречивы и, как показывает опыт, на практике не удается обойтись одним единственным функционалом на всех этапах решения задачи привязки.

Действительно, в процессе поиска нужной трассы приходится искать глобальный минимум при наличии множества локальных. Поэтому неизбежен этап перебора — для отсеивания локальных минимумов. На этом, “грубом”, этапе необходимо производить многократные вычисления функционала, так что важнее простота вычисления, а не высокая точность оценки расстояния между профилями. Аналитические методы на данном этапе, как правило, не используются.

Напротив, на этапе “тонкого” поиска, после отсеивания заведомо ложных гипотез, необходимо обеспечить высокую точность нахождения действительного минимума (естественно, и здесь затраты времени не должны превосходить некоторого разумного предела). На этом этапе начинает играть роль гладкость (дифференцируемость) функционала. Гладкие функционалы обладают тем неоспоримым преимуществом, что они допускают применение аналитических методов и при конструировании функционала, и при анализе достижимой точности, и, наконец, при построении алгоритма минимизации.

Надежность и точность, с которыми определяется искомая трасса, зависят, естественно, от выбора функционалов на “грубом” и “тонком” этапах. “Грубый” функционал $\tilde{\Phi}$ должен обеспечивать надежное отсеивание заведомо ложных гипотез и локализацию области, в которой может находиться истинная трасса. А уже при поиске минимума в этой области выбор “тонкого” функционала Φ определяет в конечном счете погрешность, с которой находится искомая трасса.

В простейшем варианте “грубый” функционал является просто укороченным вариантом “тонкого” функционала — например, полученным из него путем прореживания (меньшее количество членов в сумме). В общем случае “грубый” функционал может иметь принципиально иной вид, в частности от него не требуется дифференцируемости.

Процедура минимизации. С математической точки зрения задача привязки сводится к задаче минимизации функции многих переменных путем параметрического описания множества допустимых трасс. При этом сам функционал в задаче привязки носит вспомогательный характер — нас, в конечном счете, не интересуют численное значение функционала и его вид; важен лишь результат, который мы получаем (точность привязки). Именно с этим обстоятельством связано использование различных функционалов (“грубого” и “тонкого”) на разных этапах решения задачи привязки.

Основными особенностями задачи минимизации при ориентировании по геофизическим полям являются:

• трудоемкость вычисления функционала — функционалы могут содержать большое количество слагаемых, восстановление эталона представляет собой громоздкую процедуру, требующую многократного интерполирования дискретной карты; в процессе вычисления необходимо выделять систематические составляющие ошибок и фильтровать их флуктуационные составляющие и т. п.;

• неопределенность условий решения задачи — неточность всей исходной информации, большие случайные ошибки, реальная возможность сбоев аппаратуры;

• ограниченные возможности бортового вычислителя по быстродействию, разрядности представления чисел, объему памяти.

Эти особенности предопределяют компромиссность метода решения, обусловленную многими противоречивыми факторами. Речь идет о компромиссе между точностью решения и временем счета, между общностью математического метода минимизации и его эффективностью в каждом конкретном случае, между стремлением к максимальному учету специфики ошибок и устойчивостью алгоритма по отношению к ошибкам в самой статистической информации и т. д.

Теоретические проработки и опыт численного моделирования, накопленный в ИММ под руководством В. Л. Гасилова, позволили построить общую схему поиска решения в задаче привязки. Данная схема содержит следующие основные этапы:

1) предварительная обработка замеров — фильтрация ошибок измерений, преобразование замеров к виду, удобному для совмещения с эталоном и т. п.;

2) перебор по узлам сетки в множестве допустимых трасс (т. е. в области определяющих

параметров $D \subset P$) с адаптивным нахождением трендовых составляющих суммарной ошибки при вычислении "грубого" функционала $\tilde{\Phi}$ и выделением трассы $\tilde{r}(\cdot)$, соответствующей минимуму $\tilde{\Phi}$;

3) "тонкий" спуск с адаптацией к ошибкам от трассы $\tilde{r}(\cdot)$ по функционалу Φ ("тонкий" функционал) к минимуму $\hat{r}(\cdot)$ — именно эта трасса принимается за искомое решение задачи привязки.

3.2. Оценка информативности навигационных полей

Одной из важных заслуг Виталия Леонидовича является разработка подходов к априорной оценке информативности геофизического поля. На содержательном уровне информативность поля определяется возможной величиной ошибки решения задачи навигации. При этом влияние ошибок на точность коррекции проявляется двояким образом, что связано с сущностью метода экстремальной навигации — неизвестные параметры находятся из условия минимума выбранного функционала.

Локальный анализ, проведенный в малой окрестности истинной трассы, покажет (при дифференцируемом функционале невязки и достаточно малых ошибках), что погрешность в определении параметров трассы линейно зависит от ошибок. При малых ошибках подобное отклонение в принципе должно быть небольшим.

Однако такая оценка справедлива лишь при условии, что среди нескольких локальных минимумов удалось выделить именно тот, который соответствует истинной трассе. И второй — глобальный — эффект наличия ошибок может быть разрушительным: алгоритм привязки выделяет "чужой" локальный минимум и величина погрешности привязки при этом никак не определяется малостью ошибок. Подобную ситуацию принято называть *срывом коррекции*.

Оба этих аспекта — локальный (точность коррекции) и глобальный (устойчивость алгоритма) — необходимо учитывать при анализе информативности.

В соответствии с описанной выше общей схемой решения задачи на этапе "грубого" поиска производится сравнение измеренного профиля с профилями конечного набора трасс-гипотез. Этот набор определяется выбором некоторой сетки в доверительной области D. Задача "грубого" этапа — отсеять трассы, лежащие далеко от действительной, и выделить трассу, расположенную в области притяжения трассы с минимальным значением функционала и близкую к реализовавшейся. Под областью притяжения подразумевается такая окрестность глобального минимума, из каждой точки которой на этапе "тонкого" поиска произойдет спуск (по функционалу невязки) к трассе, соответствующей этому глобальному минимуму. Глобальная информативность навигационного поля понимается как такое его свойство, которое обеспечивает успешное решение задачи "грубого" поиска, прежде всего — надежное отсеивание трасс, далеко отстоящих от истинной.

Глобальная информативность может оцениваться с помощью модуля информативности, введенного в [2]. Информативность ГФП с позиций теории стохастического оценивания рассматривалась многими исследователями (см., например, в [25]).

Рассмотрим влияние ошибок измерения профиля и ошибок восстановления профиля с эталона на локальную точность привязки.

В рамках аддитивной модели ошибок связи между введенными величинами (истинными, измеренными и восстановленными) можно описать соотношениями вида

$$r(t) = r_d(t) + \delta r_d(t), \quad h_m(t) = h\,(t) + \delta h_m(t), \quad h(t) = h_e(t) + \delta h_e(t). \tag{3.4}$$

Здесь δr_d — ошибка в определении допустимой трассы (т. е. отклонение допустимой трассы $r_d(t,p)$ от истинной $r(t)$, соответствующей этому же значению p); δh_m — ошибки датчика поля; δh_e — ошибки процедуры восстановления эталона (в частности, сюда входит ошибка картографирования). Заметим, что при такой модели ошибок $h_m\,(t) = h_e\,(t) + \delta h\,(t)$, где $\delta h\,(t) = \delta h_m\,(t) + \delta h_e\,(t)$. Обозначим сводный вектор ошибок через $\varepsilon = (\delta r_d, \delta h_m, \delta h_e)$.

Допустим, что процедура минимизации критерия невязки на множестве допустимых трасс обеспечивает нахождение глобального минимума и истинная трасса находится в области притяжения именно этого минимума. Так как измерения и восстановление профиля производится с ошибками, минимум может достигаться не на истинной трассе $r(\cdot)$ а на некоторой другой трассе $\hat{r}(\cdot)$.

Принятый метод описания множества допустимых трасс позволяет считать (для данного измеренного профиля и конкретной реализации ошибок) функционал невязки просто функцией от p. Обозначим эту функцию той же буквой $\Phi(p) = \Phi(r(\cdot, p))$. Если критерий невязки является гладким, то эта функция дифференцируема. В результате решения задачи привязки (ср. с (3.2)) получим вектор навигационных параметров

$$\hat{p} = \operatorname{argmin}\{\Phi(p) | p \in D\}. \tag{3.5}$$

Пусть минимум достигается внутри области D, тогда в точке $\hat{p}$ должно выполняться необходимое условие минимума:

$$\Phi_v(\hat{p}) = \left.\frac{\partial \Phi}{\partial p^v}\right|_{p=\hat{p}} = 0, \quad v = 1, \ldots, dimP, \tag{3.6}$$

где Φ_v вычисляется вдоль допустимого профиля $r_d(\cdot, \hat{p})$ при реализовавшихся ошибках. Так что по сути критерий невязки Φ и сама эта производная являются функционалами от $r_d(\cdot)$, $h_m(\cdot)$ и $h_e(\cdot)$. При определенных предположениях о гладкости функционала Φ можно записать:

$$\Phi_v(\hat{p}) = \sum_\alpha \sum_s \Big(\frac{\partial \Phi}{\partial r^s_{da}} \frac{\partial r^s_{da}}{\partial p^v} + \sum_\varkappa \frac{\partial \Phi}{\partial h^\varkappa_e} \frac{\partial h^\varkappa_e}{\partial r^s_{da}} \frac{\partial r^s_{da}}{\partial p^v} \Big) = \Phi_v(r_d(\cdot, \hat{p}), h_m(\cdot), h_e(\cdot)).$$

Здесь суммирование по α, s и $\varkappa$ производится в пределах от единицы до N, $dimS$ и $dimH$ соответственно. С учетом малости ошибок можно разложить это выражение в окрестности истинной трассы, истинного профиля трассы и истинного поля в окрестности трассы. Однако такое разложение бесполезно, поскольку фактически истинные значения нам неизвестны. Кроме того, если вполне допустимо говорить о дифференцируемости (гладкости) карты поля, то гладкость истинного поля — весьма сомнительное допущение. Нам известны лишь эталонные значения и возможные ошибки отклонения эталона от истины. Поэтому для получения практически пригодных формул надо проводить разложение производной $\Phi_v(\hat{p})$ в окрестности допустимой трассы $r_d(\cdot)$ и эталонного профиля $h_e(\cdot)$ этой трассы.

Рассматриваем ошибки измерения и восстановления как вариации (возмущения) соответствующих функций (3.4) и, полагая $\hat{p} = p + \delta p$ (p — истинная точка, δp — малый вектор), получаем в первом приближении

$$\Phi_v(\hat{p}) = \Phi^e_v + \sum_w \Phi^e_{vw} \delta p^w + \delta \Phi^e_v(\varepsilon(\cdot)) = 0, \tag{3.7}$$

где $\{\Phi^e_{vw}\}$ — матрица вторых производных критерия невязки по p; $\delta\Phi^e_v$ — вариация функционала Φ^e_v (линейная часть приращения Φ^e_v при возмущении $r_d(\cdot)$ и $h_m(\cdot)$):

$$\delta\Phi^e_v(\varepsilon(\cdot)) = \sum_a \Big[\sum_s \Big(\frac{\partial \Phi^e_v}{\partial r^s_{da}} + \sum_\varkappa \frac{\partial \Phi^e_v}{\partial h^\varkappa_e} \frac{\partial h^\varkappa_e}{\partial r^s_{d\alpha}} \Big) \delta r^s_a + \sum_\varkappa \frac{\partial \Phi^e_v}{\partial h^\varkappa_{ea}} \delta h^\varkappa_a(\cdot) \Big].$$

Индекс “e” в формуле (3.7) означает, что все производные и вариации вычисляются вдоль допустимой трассы с использованием карты поля и при отсутствии ошибок, так что они полностью определяются выбором допустимой трассы и могут быть найдены численно. Для упрощения записи в дальнейшем, если это не приводит к двусмысленности, опускаем индекс “e” у производных и вариаций.

В регулярном случае матрица вторых производных $\{\Phi_{vw}\}$ невырождена (точнее, положительно определена) и существует обратная матрица $\{\Phi^{vw}\}$, что позволяет разрешить уравнение (3.7) относительно ошибки привязки δp:

$$\delta p^v = -\sum_w \Phi^{vw}(\Phi_w + \delta\Phi_w(\varepsilon(\cdot))). \tag{3.8}$$

Исходя из формул (3.8), мы можем для каждой допустимой трассы определить влияние конкретной реализации ошибок и оценить это влияние с точки зрения принятого критерия качества.

Возьмем в качестве примера задачу навигации по полю высот рельефа ($dimH = 1$). Пусть измерения производятся с постоянным шагом в моменты времени $t_\alpha = \alpha\Delta T$, $\alpha = 0, \ldots, N$, $\Delta T = \vartheta/N$, где ϑ — время визирования; $N+1$ — число замеров. Пусть p — вектор "истинных" параметров, при которых произведены измерения высот. Пусть $\widehat{p}$ — решение задачи (3.5) и $\delta p = \widehat{p} - p$ — вектор ошибки привязки. Ошибка привязки возникает за счет ошибок измерений $\varepsilon = \delta h$ (где δh — вектор размерности $N+1$) и зависит от информативных свойств поля h. Для сокращения выкладок и получения явных выражений рассмотрим случай нулевых ошибок по скорости. Тогда требуется найти двумерный вектор $\widehat{p} = (\widehat{x}, \widehat{y})$, доставляющий минимум в задаче (3.5), и оценить ошибки коррекции $\delta p = (\delta x, \delta y)$.

Обозначим $h_{xi} = \dfrac{\partial h}{\partial x}(x_i, y_i)$, $h_{yi} = \dfrac{\partial h}{\partial y}(x_i, y_i)$ — частные производные поля h, вычисленные в точках истинной трассы замеров (при нулевых ошибках измерения). Введем $(N+1)$-векторы h_x и h_y, составленные из h_{xi} и h_{yi} соответственно, и пусть, как обычно, (a, b) обозначает операцию скалярного произведения векторов a и b.

При предположении о непрерывной дифференцируемости функции h и малости ошибок δx и δy для всех $i = 0, \ldots, N$ справедливо приближенное равенство: $\delta h_i = h_i(\widehat{p}) - h_i(p) \approx h_{xi}\delta x + h_{yi}\delta y$. Учитывая эти равенства, путем линеаризации системы (3.6) получаем следующую линейную систему уравнений относительно ошибок δx и δy:

$$\begin{cases} (h_x, h_x)\delta x + (h_x, h_y)\delta y = (h_x, \varepsilon), \\ (h_x, h_y)\delta x + (h_y, h_y)\delta y = (h_y, \varepsilon). \end{cases}$$

Решение этой системы имеет вид

$$\begin{cases} \delta x = \dfrac{(h_x, \varepsilon)(h_y, h_y) - (h_y, \varepsilon)(h_x, h_y)}{(h_x, h_x)(h_y, h_y) - (h_x, h_y)^2}, \\[2ex] \delta y = \dfrac{(h_y, \varepsilon)(h_x, h_x) - (h_x, \varepsilon)(h_x, h_y)}{(h_x, h_x)(h_y, h_y) - (h_x, h_y)^2} \end{cases} \tag{3.9}$$

и выражает явную зависимость ошибок привязки от ошибок измерения ε. Условие неравенства нулю знаменателя в этих формулах допускает простую геометрическую интерпретацию: на трассе должны найтись по крайней мере две точки замеров, в которых градиенты поля высот не коллинеарны.

Предположим, что все $N+1$ компонент вектора ε являются независимыми случайными величинами с нулевым математическим ожиданием и одинаковой дисперсией σ_ε^2. Тогда из формул (3.9) получаем следующие выражения для дисперсий ошибок привязки:

$$\begin{cases} \sigma_{\delta x}^2 = \sigma_\varepsilon^2 \dfrac{(h_y, h_y)}{(h_x, h_x)(h_y, h_y) - (h_x, h_y)^2}, \\[2ex] \sigma_{\delta y}^2 = \sigma_\varepsilon^2 \dfrac{(h_x, h_x)}{(h_x, h_x)(h_y, h_y) - (h_x, h_y)^2}, \end{cases} \tag{3.10}$$

которые и определяют информативность геофизического поля h в окрестности некоторой трассы замеров. Для общей оценки локальной информативности поля в заданной области плоскости формулы (3.10) применяются к множеству трасс, покрывающих эту область.

Важной характеристикой полученных выше формул (3.8), (3.9) для оценки точности привязки является их линейность по отношению к ошибкам ε. Это позволяет рассматривать влияние на точность привязки суммы различных ошибок (ошибок в каждом из каналов датчика, отдельных составляющих ошибок в одном из каналов и т.п.) как суперпозицию влияний отдельных ошибок. Этим самым исследование точности коррекции параметров движения объекта при сложном составе ошибок в измерениях можно свести к разложению ошибок на относительно простые слагаемые и к изучению влияния на точность каждой из составляющих в отдельности.

Рассмотрим методику оценки локальной информативности более подробно на примере поля высот рельефа. Формулы (3.9) представим в виде

$$\delta x = \sum_{\alpha=0}^{N} X_a \varepsilon_a, \quad \delta y = \sum_{\alpha=0}^{N} Y_a \varepsilon_a, \tag{3.11}$$

где коэффициенты X_a, Y_a выражаются через частные производные функции $h(x,y)$, вычисленные по цифровой карте поля высот.

Пусть ошибки ε в (3.11) рассматриваются как сумма l независимых стационарных случайных процессов ξ_j, $j = 1, \ldots, l$, с нулевыми средними, среднеквадратическими отклонениями σ_j и корреляционными функциями $K_j(t - t_0)$ [24]. Соответствующий радиус корреляции обозначим через ρ_j. В качестве таких компонент-процессов можно рассматривать, например, ошибки картографирования (вдоль трассы), измерения, интерполирования рельефа, определения трассы измерений и т. д.

Для дисперсий ошибок привязки $D(\delta x), D(\delta y)$, используя соотношения (3.11), получаем

$$D(\delta x) = \sum_{j=1}^{l} D_{xj}, \quad D(\delta y) = \sum_{j=1}^{l} D_{yj}. \tag{3.12}$$

Здесь D_{xj}, D_{yj} — дисперсии ошибок $\delta x, \delta y$, отвечающие отдельному случайному процессу ξ_j. Эти величины рассчитываются (см. [24]) по формулам (приводим только для D_{xj})

$$D_{xj} = K_j(0) \sum_{\alpha=0}^{N} {X_a}^2 + 2K_j(\Delta T) \sum_{\alpha=1}^{N} X_a X_{a-1} + \ldots + 2K_j(T) X_0 X_N. \tag{3.13}$$

Дисперсии (3.12), (3.13) при заданных статистических свойствах ошибок измерения и картографирования вычисляются при известных исходных данных.

На этапе проектирования информация об ошибках неизбежно носит предварительный характер. Чаще всего можно определенно предположить только структуру ошибок (вид корреляционной функции и т. п.). При этом параметры корреляционных функций известны лишь приближенно. Для оценки влияния различных параметров на достижимую точность привязки удобно использовать *номограммы точности* [12], которые строятся по данному участку ориентирования для определенных условий привязки (количество и шаг замеров, число членов функционала, параметры фильтра и т. п.). Для построения номограмм точности используются формулы (3.13), в которых применяется нормированная корреляционная функция ($\sigma = 1$), причем радиус корреляции ρ рассматривается в качестве параметра. Сами номограммы представляют собой зависимости

$$\sigma_{\delta x}(\rho) = \sqrt{D(\delta x, \rho)}, \quad \sigma_{\delta y}(\rho) = \sqrt{D(\delta y, \rho)},$$

которые и дают возможность учитывать влияние отдельных составляющих ошибок.

Номограммы точности позволяют легко определить дисперсию ошибки привязки от воздействия отдельно взятой помехи — для известного периода корреляции помехи ρ находим по графику соответствующие ординаты $\sigma_{\delta x}, \sigma_{\delta y}$, умножаем эти значения на σ помехи и возводим в квадрат. В случае независимости отдельных составляющих ошибки дисперсия суммарной ошибки привязки вычисляется как сумма (3.12) дисперсий ошибок привязки, порождаемых отдельными помехами.

3.3. Принципы прикладной работы В. Л. Гасилова

Трудно переоценить значимость исследований В. Л. Гасилова в области навигации по ГФП для современных разработок систем автономной коррекции навигационных ошибок и систем наведения движущихся объектов, в первую очередь направленных на укрепление обороноспособности страны.

В 2004 г. на базе сектора, которым руководил В. Л. Гасилов, по инициативе директора Института, Виталия Ивановича Бердышева, был создан отдел прикладных проблем управления (ОППУ). Руководителем отдела был назначен Виктор Борисович Костоусов. Ныне в этом отделе продолжаются начатые В. Л. Гасиловым исследования.

Вся деятельность ОППУ строится на основе следующих принципов, сформированных В. Л. Гасиловым в процессе долгой и плодотворной работы:

• *Понять суть задачи.* Это значит, что из пожеланий инженеров (часто поначалу нечетких и непонятных) требуется получить формализованное и математически определенное описание задачи или цели.

• *Понять более широкий контекст задачи.* Важно определить связь конкретной математической задачи с более широкой конечной целью инженерной разработки.

• *Выбрать математический аппарат для решения.* Хотя математическая формулировка, как правило, предполагает использование определенного математического аппарата, тем не менее необходимо вовремя понять ограничения используемых средств (формализация задачи, численный метод, вероятностная модель и т. п.), которые проявляются в процессе решения и постараться, если надо, выйти за рамки ранее освоенных методов и подходов.

• *Создать математические модели основных компонент задачи.* Например, для решения конкретной задачи навигации по ГФП требуется разработать вероятностную модель геофизического поля, подходящую математическую модель датчика поля, учесть ограничения вычислительных средств бортовой системы управления, разработать модель самого летательного аппарата и, наконец, исследовать способы представления карты поля в памяти бортового вычислителя. Такие модели позволят предсказать влияние различных ошибок и возмущений исходных данных задачи.

• *Разработать компьютерную модель задачи.* Без компьютерного (а зачастую и без суперкомпьютерного) моделирования невозможно решать реальные практические задачи. Это уже давно бесспорный факт.

• *Разработать методы решения и реализовать их на ЭВМ.* Создание программ и целых программных комплексов, в том числе для суперкомпьютерных вычислительных систем, составляет неотъемлемую часть настоящей большой разработки.

• *Провести испытания на модельных данных.* Для тестирования принятых математических моделей и полученных с их помощью решений организуются испытания на модельных данных, для которых выходные результаты задачи известны. Это очевидно необходимый этап.

• *Провести испытания на реальных данных.* Окончательным критерием успеха/неуспеха является проверка предложенного решения на реальных данных и в условиях реального применения. Это большая удача, если такая возможность предоставляется.

• *Получить отклик от инженеров-заказчиков и наметить дальнейшие перспективы.* Обратная связь с постановщиками проблемы необходима на протяжении всей работы. Если все сделано честно и правильно, то такая деятельность открывает новые горизонты и новые интересные задачи.

4. Высокопроизводительные вычисления и педагогическая деятельность

В начале 1990-х гг. на фоне больших изменений в стране — развала Советского Союза — директор ИММ УрО АН СССР академик Ю.С.Осипов передал бразды правления Институтом академику Анатолию Федоровичу Сидорову (1933–1999), к тому времени известному специалисту в области аналитических методов исследования краевых задач в газовой динамике и гидродинамике. Анатолий Федорович принадлежал к школе создателей ядерного щита России и был убежденным патриотом своей страны в самом высоком смысле этого слова.

Несмотря на все неимоверные финансовые и организационные проблемы, он упорно "пробивал" идею создания и развития нового для России направления науки и техники — создание суперкомпьютеров и параллельных вычислительных технологий. Тогда образовалась инициативная группа из трех коллективов: из Института прикладной математики им. М. В. Келдыша РАН — в лице Валерия Алексеевича Забродина (1933–2008), из НИИ "Квант" — в лице Владимира Константиновича Левина и из ИММ УрО РАН — в лице Анатолия Федоровича. При поддержке Ю. С. Осипова, ставшего к тому времени президентом Российской академии наук, и при активном участии таких организаций, как ИАПУ ДВО РАН (Владивосток, рук. В. П. Мясников), ИАП РАН (Москва, рук. О. М. Белоцерковский), ИММ РАН (Москва, рук. Б. Н. Четверушкин), ИВМ РАН (Москва, рук. Г. И. Марчук) и другие, работа по выходу России на передовые рубежи современных вычислительных технологий стала приносить свои плоды.

Таким образом, А. Ф. Сидоров был одним из инициаторов развития в России нового перспективного направления — развития суперкомпьютеров МВС-100 — МВС-1000, включающее создание вычислителя, программных средств его функционирования и разработку математических алгоритмов параллельного действия для решения задач, требующих больших вычислительных мощностей. В поддержку этой деятельности в Институте математики и механики активно включились Виталий Леонидович Гасилов и Виктор Владимирович Самофалов (1951–2018). Здесь на смену прежним ЭВМ БЭСМ-6, Эльбрус и ЕС-ЭВМ пришли совершенно новые мультипроцессорные вычислительные системы (МВС), позволяющие решать важные прикладные задачи качественно нового уровня сложности. В ИММ УрО РАН на базе МВС-100 производительностью свыше 10 млрд. опер./с был создан современный информационно-вычислительный центр. Под руководством А. Ф. Сидорова в Уральском регионе была развернута деятельность по телекоммуникационному обеспечению УрО РАН и выходу в Интернет. Следует отметить, что в развитии указанных технологий важная роль принадлежала сотрудникам отдела вычислительных сетей ИММ УрО РАН под руководствои Михаила Людвиговича Гольштейна (1946–2019). В дальнейшем данный вычислительный комплекс был оснащен компьютерами следующего поколения МВС-1000 с производительностью порядка 1000 млрд. опер./с . При этом аппаратно-программные средства создавались одновременно с пакетами прикладных программ. Общим итогом работ по практическому использованию созданных коллективом аппаратных и программных вычислительных средств стало решение многих важных фундаментальных и прикладных задач, что невозможно было сделать на прежних аппаратных и программных платформах.

Организаторы параллельных вычислительных технологий: В.Л. Гасилов, А.Ф. Сидоров и В.В. Самофалов в зале МВС-100.

В настоящее время в ИММ УрО РАН работает суперкомпьютерный центр коллективного пользования, основная вычислительная мощность которого сосредоточена в кластере "Уран" [26].

Начиная с 1994 г. в исследованиях В. Л. Гасилова большое место занимают задачи математической геофизики, обработки космических изображений земной поверхности, крупномасштабного моделирования, параллельных вычислений. Виталий Леонидович был руководителем ряда грантов РФФИ, Министерства науки и технологий России, международных проектов. В рамках этих работ им реализованы новые подходы к математическому моделированию и исследованию задач большой вычислительной сложности на современных МВС.

Можно выделить следующие направления исследований В. Л. Гасилова в области высокопроизводительных вычислительных технологий:

• Математическое моделирование технических систем: датчики геофизических полей, летательные аппараты различного класса, модели физических поверхностных полей (оптический контраст, радиояркость, радиотепло, поверхности рельефа и микрорельефа).

• Нелинейные задачи механики сплошной среды — моделирование механических концентраций напряжений и разрывов [17].

• Обработка статистических данных для анализа активности геологических разломов и мест интенсивной сейсмической активности [16].

• Задачи обработки и анализа медицинских сигналов [18]. В 1990-е гг. Виталий Леонидович сумел переориентироваться на решение медицинских задач. Еще в молодости он всерьез интересовался биологией, медициной и экологией, изучал проблему машинного зрения. В последние годы совместно с Владимиром Семеновичем Кублановым, руководителем Научно-исследовательского медико-биологического инженерного центра высоких технологий УрФУ, В. Л. Гасилов разрабатывал математические программы диагностики и лечения различных заболеваний. Практически те же датчики, которые использовались для того, чтобы обнаружить цель (оборонная тематика), теперь определяли патогенные зоны по фоновому электромагнитному излучению головного мозга. Некоторые разработки Виталия Леонидовича и его коллег были внедрены в медицинскую практику.

По инициативе Анатолия Федоровича Сидорова 26 июня 1997 г. на математико-механическом факультете Уральского госуниверситета была образована кафедра параллельных компьютерных технологий. А. Ф. Сидоров стал руководителем новой кафедры, а В. Л. Гасилов его заместителем. Здесь он получил звание профессора и разработал базовые спецкурсы, такие как “Параллельные вычисления в задачах прикладного анализа” и “Параллельные алгоритмы и математическое моделирование”.

В разработку и преподавание спецкурсов Виталий Леонидович вложил весь свой гигантский опыт работы в области прикладной математики. Он очень доступно и в то же время строго математически (с выводами и доказательствами) рассказывал о генерации случайных чисел, о решении больших систем линейных уравнений точными и приближенными методами, о поиске экстремумов функций многих переменных, о современных методах статистической обработки экспериментальных данных и многих других разделах прикладной математики и механики.

После внезапной смерти А. Ф. Сидорова в 1999 г. В. Л. Гасилов взял руководство кафедрой на себя и до своей кончины с энтузиазмом и ответственностью трудился на этом поприще.

Послесловие

Виталий Леонидович никогда не пренебрегал “нетворческой”, по бытующему иногда мнению, работой — техническими расчетами, программированием. Он органично сочетал в себе черты теоретика и практика, отличался редкой способностью охватить проблему в целом: от формулировки, разработки алгоритма и далее, до инженерного результата. Если задача не решалась известными методами, то он придумывал свой собственный способ и достигал успеха.

Виталий Леонидович запомнился как честный, преданный семье и друзьям и очень волевой человек. Его невозможно было испугать угрозой лишения должности или понижения зарплаты. В то же время он был чрезвычайно щедрым, готов был поддержать в трудную минуту и морально, и материально, и собственным участием в помощи. Так было и когда искали на озере Таватуй погибшего там Глеба Владимировича Малышева, и когда потребовалась помощь в лечении сотрудницы его бывшей лаборатории нелинейной механики, и во многих других случаях.

Виталий Леонидович в молодости увлекался спортивной гимнастикой, вело- и водным туризмом. И даже когда прошло достаточно много лет, первое, на что обращали внимание студенты в кабинете Виталия Леонидовича, — это не всем привычный современный компьютер, а неподъемные гантели — каждая размером с хорошую гирю. Его прекрасная спортивная форма служила достойным примером для молодых и невольным укором для сверстников, не уделяющих достаточного внимания спорту.

Виталий Леонидович был человеком шестидесятых годов, оптимистом и энтузиастом, и его по-настоящему вдохновляло, что та отрасль математики и механики, которой он занимался, была востребована обществом, что своими исследованиями он выполняет гражданский долг. Ценности, которые были дороги ему в молодости, остались таковыми и в последние годы. Академик Н. Н. Красовский особо отметил [23], что Виталий Леонидович не был “перевертышем”, не принадлежал к числу тех, кто в свое время кричал “ура”, а потом поносил прошлое. Он принимал и уважал историю своей страны, осознавая при этом значение многих ее негативных моментов.

Память о Виталии Леонидовиче Гасилове, замечательном человеке и ученом, будет храниться в делах его учеников и последователей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П.** Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985.
2. **Бердышев В.И.** Полиномиальная аппроксимация, связанная с навигацией по геофизическим полям // Докл. РАН. 1992. Т. 325, №6. С. 1099–1102.
3. **Бердышев В.И., Костоусов В.Б.** Экстремальные задачи и модели навигации по геофизическим полям. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 2007. 270 с.
4. **Гасилов В.Л.** К вопросу об устойчивости одного классов релейных систем // Дифференц. уравнения. 1967. Т. 3, №8. С. 1240–1247.
5. **Гасилов В.Л.** Об одном методе приближенного осуществления движения по заданной траектории // Дифференц. уравнения. 1967. Т. 3, №10. С. 1718–1724.
6. **Гасилов В.Л.** О минимизации нормы оператора дискретной системы управления // Докл. Академии наук БССР. Т. 11, №11, 1967.
7. **Гасилов В.Л.** Осуществление программных движений при постоянно действующих возмущениях. Автореферат канд. дисс. Свердловск: Свердлов. отд. Математического института АН СССР, 1968.
8. **Гасилов В.Л.** К задаче осуществления движения по заданной траектории // Прикл. математика и кибернетика: сб. науч. тр. М.: Изд-во “Наука”, 1973.
9. **Гасилов В.Л.** Об адаптивном осуществлении программных движений // Вопросы анализа нелинейных систем автоматического управления : сб. науч. тр. / УНЦ АН СССР. Свердловск, 1973.
10. **Гасилов В.Л.** *Реализация оптимальных программ в автоматических системах.* Вопросы автоматизации нелинейных систем автоматического управления : сб. науч. тр. / УНЦ АН СССР. Свердловск, 1975.
11. **Гасилов В.Л., Кукушкин А.П.** Реализация оптимальных программных движений механических систем // Тез. докл. Четвертой Всесоюзной конф. по качественной теории дифференциальных уравнений. Иркутск, 1986.
12. **Гасилов В.Л., Красовский Н.Н., Осипов Ю.С.** Задачи повышения точности навигации движущихся объектов // Тез. докл. Всесоюзной шк. по проблемам математического обеспечения и архитектуры бортовых вычислительных систем. Ташкент, 1988.
13. **Гасилов В.Л., Костоусов В.Б., Кукушкин А.П.** Реализация программных движений механических систем по наблюдениям внешних информационных полей // Тез. докл. Седьмой Всесоюзной конф. “Управление в механических системах”. Свердловск, 1990.
14. **Гасилов В.Л., Сафронович Е.Л.** Анализ изображений в задачах управления движущимися объектами // Тез. докл. Седьмой Всесоюзной конф. “Управление в механических системах”. Свердловск, 1990.

15. **Гасилов В.Л., Костоусов В.Б.** Задача идентификации параметров движущегося объекта на основе обработки изображения внешнего информационного поля // Изв. РАН. Сер. Техническая кибернетика. № 3. 1994.
16. **Гасилов В.Л.** Моделирование динамики литосферы на многопроцессорной вычислительной системе // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов. № 1. 1997.
17. **Гасилов В.Л., Думшева Т.Д., Зенкова Е.С.** Параллельные процессы в задачах численного моделирования трехмерной динамики блоковых структур и в механике разрушения // Алгоритмы и программные средства параллельных вычислений: сб. науч. тр. № 2. Екатеринбург: Изд-во УрО РАН, 1998. С. 61–76.
18. **Гасилов В.Л., Кубланов В.С., Казаков Я.Е.** Особенности частотно-временных распределений интенсивности флуктуаций электромагнитного излучения глубинных структур головного мозга человека // Биомедицинская радиоэлектроника: сб. науч. тр. № 2. 1999. С. 48–52.
19. **Гасилов В.Л., Костоусов В.Б., Кукушкин А.П.** Идентификация состояния движущегося объекта по наблюдениям геофизических полей // Тр. Ин-та математики и механики УрО РАН. 2006. Т. 12, № 2. С. 53–63.
20. **Геращенко Е.И., Геращенко С.М.** Метод разделений движений и оптимизации нелинейных систем. М.: Наука, 1975. 296 с.
21. **Ишлинский А.Ю.** Ориентация, гироскопы и инерциальная навигация. М.: Наука, 1967.
22. **Красовский А.А., Белоглазов И.Н., Чигин Г.П.** Теория корреляционно-экстремальных навигационных систем. М.: Наука, 1979.
23. **Понизовкина Е.Е.** В его окне всегда был свет. Газета “Наука Урала”. № 27. 2002. С. 2.
24. **Пугачев В.С.** Теория случайных функций и ее применение к задачам автоматического управления. М.: Физматгиз, 1962.
25. **Степанов О.А.** Методы оценки потенциальной точности в корреляционно-экстремальных навигационных системах. СПб: ГНЦ РФ — ЦНИИ “Электроприбор”, 1993.
26. Суперкомпьтерный центр коллективного пользования ИММ УрО РАН. Параллельные вычисления в УрО РАН. https://parallel.uran.ru/

Поступила 25.12.2025
После доработки 14.01.2026
Принята к публикации 14.01.2026

Бердышев Виталий Иванович
академик РАН
научный руководитель
Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН,
г. Екатеринбург
e-mail: bvi@imm.uran.ru

Костоусов Виктор Борисович
канд. физ.-мат. наук, зав. отд.
Институт математики и механики им. Н. Н. Красовского УрО РАН
г. Екатеринбург
e-mail: vkost@imm.uran.ru

REFERENCES

1. Beloglazov I.N., Dzhandzhgava G.I., Chigin G.P. *Osnovy navigatsii po geofizicheskim polyam* [Fundamentals of navigation in geophysical fields]. Moscow, Nauka Publ., 1985.
2. Berdyshev V.I. Polynomial approximation related to navigation over geodesic fields. *Dokl. RAN*, 1992, vol. 325, no. 6, pp. 1099–1102.
3. Berdyshev V.I., Kostousov V.B. *Ekstremal'nye zadachi i modeli navigacii po geofizicheskim polyam* [Extreme tasks and models of navigation in geophysical fields]. Yekaterinburg, UrO RAN Publ., 2007, 270 p.

4. Gasilov V.L. Zur Frage der Stabilität einer Klasse von Relaissystemen *Differ. Uravn.*, 1967, vol. 3, no. 8, pp. 1240–1247 (in Russian).
5. Gasilov V.L. A method for the approximate realization of a motion along a given trajectory. *Differ. Uravn.*, 1967, vol. 3, no. 10, pp. 1718–1724 (in Russian).
6. Gasilov V.L. On minimizing the operator norm of a discrete control system. *Dokl. Akad. Nauk BSSR*, 1967, vol. 11, no. 11 (in Russian).
7. Gasilov V.L. Implementation of programmed movements under constant disturbances: Abstract of a candidate's dissertation. Sverdlovsk, Sverdl. otd. Matematicheskogo Inst. AN SSSR, 1968.
8. Gasilov V.L. To the problem of implementing movement along a given trajectory. In: *Appl. Math. Cybern.*: Collection of scientific papers, M.: Nauka, 1973.
9. Gasilov V.L. On the adaptive implementation of programmed movements. In: *Issues of analysis of nonlinear automatic control systems*: Collection of scientific papers. Sverdlovsk, 1973.
10. Gasilov V.L. Implementation of optimal programs in automatic systems. In: *Issues of automation of nonlinear automatic control systems*: Collection of scientific papers. Sverdlovsk, 1975.
11. Gasilov V.L., Kukushkin A.P. Implementation of optimal program movements of mechanical systems. In: *Abstracts of the Fourth All-Union Conference on the Qualitative Theory of Differential Equations*, Irkutsk, 1986.
12. Gasilov V.L., Krasovskii N.N., Osipov Yu.S. Tasks of improving the accuracy of navigation of moving objects. In: *Abstracts of the All-Union School on the Problems of Mathematical Support and Architecture of Onboard Computing Systems*, Tashkent, 1988.
13. Gasilov V.L., Kostousov V.B., Kukushkin A.P. Implementation of programmed movements of mechanical systems based on observations of external information fields. *Abstracts of the Seventh All-Union Conference "Control in Mechanical Systems"*, Sverdlovsk, 1990.
14. Gasilov V.L., Safronovich E.L. Image analysis in problems of moving object control. *Abstracts of the Seventh All-Union Conference "Control in Mechanical Systems"*, Sverdlovsk, 1990.
15. Gasilov V.L., Kostousov V.B. The problem of identifying the parameters of a moving object based on processing the image of an external information field. *Izv. Ros. Acad. Nauk, Ser. Techn. Cybern.*, 1994, No. 3.
16. Gasilov V.L. Modeling of lithospheric dynamics on a multiprocessor computing system. *Issues in Atomic Science and Technology. Ser.: Mathematical Modeling of Physical Processes*, 1997, No. 1. 1997.
17. Gasilov V.L., Dumsheva T.D., Zenkova E.S. Parallel processes in problems of numerical modeling of three-dimensional dynamics of block structures and in fracture mechanics. In: *Algorithms and software for parallel computing*: Collection of scientific papers. № 2. Yekaterinburg: Publ. UrO RAN, 1998. P. 61–76.
18. Gasilov V.L., Kublanov V.S., Kazakov Ya.E. Features of the frequency-time distributions of the intensity of electromagnetic radiation fluctuations in the deep structures of the human brain. *Biomedical Radioelectronics*, 1999, no. 2, pp. 48–52.
19. Gasilov V.L., Kostousov V.B., Kukushkin A.P. Identification of the state of a moving object by observation of geophysical fields, *Proc. Steklov Inst. Math.*, 2006, vol. 255, suppl. 2, pp. S54–S65. https://doi.org/10.1134/S0081543806060058
20. Gerashchenko E.I., Gerashchenko S.M. *Metod razdelenii dvizhenii i optimizatsii nelineinykh sistem* [Method of separation of motions and optimization of nonlinear systems]. Moscow, Nauka Publ., 1975, 296 p.
21. Ishlinsky A.Yu. *Orientatsiya, giroskopy i inertsial'naya navigatsiya* [Orientation, gyroscopes and inertial navigation]. Moscow, Nauka Publ., 1967.
22. Krasovsky A.A., Beloglazov I.N., Chigin G.P. *Teoriya korrelyatsionno-ehkstremal'nykh navigatsionnykh sistem* [Theory of Correlation-Extreme Navigation Systems]. Moscow, Nauka Publ., 1979.
23. Ponizovkina E.E. *There was always light in his window*. Newspaper "Science of the Urals 2002, December, no. 27, p. 2.
24. Pugachev V.S. *Teoriya sluchainykh funktsii i ee primenenie k zadacham avtomaticheskogo upravleniya* [Theory of random functions and its application to automatic control problems]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962.
25. Stepanov O.A. *Metody otsenki potentsial'noi tochnosti v korrelyatsionno-ehkstremal'nykh navigatsionnykh sistemakh* [Methods for assessing potential accuracy in correlation-extreme navigation systems]. St. Petersburg: State Scientific Center of the Russian Federation — Central Research Institute "Elektropribor", 1993.

26. Supercomputer Center for Collective Use of the Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. Parallel Computing at the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. https://parallel.uran.ru/

Received December 25, 2025
Revised January 14, 2026
Accepted January 14, 2026

Vitalii Ivanovich Berdyshev, RAS Academician, Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620077 Russia,
e-mail: bvi@imm.uran.ru .

Viktor Borisovich Kostousov, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Krasovskii Institute of Mathematics and Mechanics of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, 620077 Russia,
e-mail: vkost@imm.uran.ru .

Cite this article as: V. I. Berdyshev, V. B. Kostousov. To the 85th anniversary of the birth of Vitaly Leonidovich Gasilov. *Trudy Instituta Matematiki i Mekhaniki UrO RAN*, 2026, vol. 32, no. 1, pp. 7–26.