

# ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИЯ НАВИГАЦИОННО-БАЛЛИСТИЧЕСКОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ

Бетанов В.В.<sup>1</sup>

**Ключевые слова:** космический аппарат, интеллектуальная система, навигационно-баллистическое обеспечение, технологический цикл, нештатная ситуация, база данных и знаний, экспертные системы, задачи, условия, методы, эффективность, качество.

## Аннотация

**Цель работы:** развитие методов искусственного интеллекта в практике навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления космическими аппаратами (КА).

**Метод:** системный анализ НБО с использованием аппарата цифровизации и систем искусственного интеллекта.

**Результаты:** обоснованы продуктивная прикладная классификация интеллектуальных информационных систем, применяемых и планируемых к применению в практике навигационно-баллистического обеспечения (НБО), и требования высокого уровня автоматизации контура управления КА с применением повышенной степени интеллектуальной составляющей, в частности, комбинированных расчетно-логических и экспертных систем, ориентированных на вычислительные алгоритмы с осуществлением хранения уникальных знаний и данных в области предметной составляющей космической техники; предложенный подход вносит новизну в традиционную схему переработки поступающей информации в навигационной аппаратуре потребителя, что дает возможность значительно улучшить качество решения целевых задач в подсистемах крупномасштабных информационно-аналитических систем типа ГАС РФ «Правосудие», «Выборы», «Управление». Приведены примеры из практики оперативного НБО применения гибридных экспертных систем для принятия решений в процессе технологического цикла выполнения работ. Рассмотрены решения обобщенных некорректных задач НБО, реализация концепции гибридной технологии обеспечения функционирования систем информационно-расчетного обеспечения в случае сбоев этапов решения отдельных задач.

DOI: 10.21681/1994-1404-2023-2-34-43

## Введение

Стратегической целью отечественной программы комплексного развития космических информационных технологий на ближайшее десятилетие является достижение необходимого уровня обеспечения спутниковыми услугами всех отраслей экономики России, создание условий для цифровизации экономических, производственных, образовательных, научных, административных и культурных процессов развития страны с помощью спутниковых технологий, расширение присутствия отечественных космических продуктов на международных рынках, максимальное использование возможностей существующих и пер-

спективных космических систем и комплексов в интересах национальной, общественной и экономической безопасности страны.

В условиях современной космической обстановки эффективность системы оперативного навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления космическими аппаратами (КА) определяется рядом весьма жестких *требований*, основными из которых являются следующие:

- система оперативного НБО должна обладать свойством *универсальности*, так как ее функционирование направлено на осуществление комплекса работ по обеспечению управления

<sup>1</sup> **Бетанов Владимир Вадимович**, доктор технических наук, профессор, заслуженный деятель науки Российской Федерации, член-корреспондент Российской академии ракетных и артиллерийских наук, заместитель начальника центра АО «Российские космические системы», г. Москва, Российская Федерация.

E-mail: vlavab@mail.ru



Экспликация (здесь и на рис. 2): ПНУ — прогнозируемые начальные условия движения; УНУ — уточненные начальные условия движения; ПрО — предварительная обработка; КДУ — корректирующая двигательная установка; ОВС — определение вектора состояний (краевая задача); СБ — баллистический коэффициент; NB — номер витка; НБИ — навигационно-баллистическая информация (t, R, H, B, L — момент времени, модуль радиус-вектора, высота, широта, долгота нахождения КА).

Рис. 1. Ленточный график современного типового технологического цикла оперативного НБО управления КА

КА различного целевого назначения ближнего и среднего космоса;

- навигационно-баллистические задачи должны решаться с высокой *точностью* и *оперативностью*, а оптимизация получаемых решений должна выполняться достаточно *полно*;
- результаты решения навигационно-баллистических задач должны обладать практически абсолютной *достоверностью* [10];
- все баллистические расчеты, анализ получаемых результатов и выработка рекомендаций относительно принятия решений должны выполняться *своевременно* — в сроки, регламентируемые планом управления полетом;
- навигационно-баллистические задачи должны обеспечивать *надежный* расчет требуемых целевых показателей, которые определяются верхним уровнем иерархии управления ракетно-космическими средствами в конкретной обстановке.

Вопросы задействования наземных средств взаимодействия с КА и проведение измерений текущих навигационных параметров (ИТНП) [13, 22] обеспечивают совместно с моделированием и созданием *интеллектуальных систем* [2, 3] (расчетно-логических систем, ориентированных на вычислительные алгоритмы; экс-

пертных<sup>2</sup> и гибридных экспертных систем, комплексов обучения и др.) автоматизированную реализацию технологического цикла НБО и анализа предметной ситуации.

### Организация навигационно-баллистического обеспечения

Типовой ленточный график стандартного *технологического цикла* (ТЦ) оперативного НБО управления КА для варианта обработки совместной выборки ИТНП представлен на *рис. 1*.

Процесс, состоящий из множества ТЦ, технологических (ТО) и вспомогательных (ВО) операций и обеспечивающий выполнение оперативного плана, обычно называют *технологическим процессом* НБО. Если известно множество  $\{TO_m\} m=1, \dots, M$  технологических операций и определено понятие отношения  $r_{ij}$  между i-й и j-й операциями, то ТЦ можно представить в виде кортежа:

$$ТЦ = \langle \{TO_m\}, r_{ij} \rangle.$$

<sup>2</sup>Элти Дж. Экспертные системы: концепции и примеры. М.: Финансы и статистика, 1987.

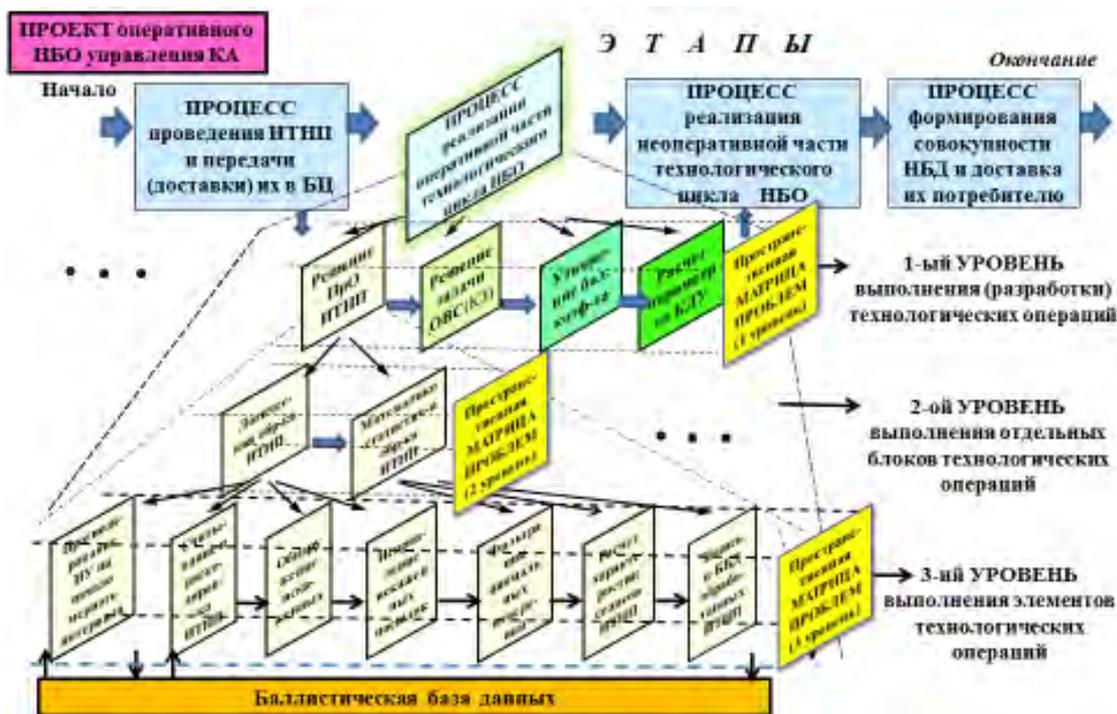


Рис. 2. Пространственные матрицы (тензоры) проблем решения задач типового оперативного НБО

По определению технологический процесс (ТП) управления НБО является композицией ТЦ, ТО и ВО с определяемыми на них отношениями:

$$TP = \langle \{TO_m\}, \{TC_k\}, \{VO_j\}; r_n \rangle,$$

где  $r_n$  — коэффициент (часто матрица), характеризующий отношения между ТО, ТЦ и ВО.

Основная цель системы управления ТЦ НБО как современной эргатической системы [2, 7, 9] — решение актуальных научных задач иерархических интегрированных автоматизированных управляющих подсистем НБО при одновременном уменьшении трудоёмкости их проектирования и внедрения, а также с учетом повышения эффективности разработки, испытаний и эксплуатации КА.

Пространственные матрицы (тензоры) проблем решения задач типового оперативного навигационно-баллистического цикла, акцентирующие внимание разработчиков на создании интеллектуальных (в том числе расчетно-логических, экспертных) систем, представлены на рис. 2.

Адаптация понятий «технологическая операция» (ТО), «цикл» (ТЦ) и «процесс» (ТП) к информационно-расчетному обеспечению (ИРО) управления КА и принципы построения автоматизированной системы ТЦ НБО рассмотрены в ряде работ авторов [15—17]<sup>3</sup>, что

позволяет интерпретировать текущую ситуацию и прогнозировать будущее, а также осуществлять диагностику причин возникновения нестандартных ситуаций, формулировать план действий и контролировать его выполнение. Эти возможности системы управления ТЦ могут быть реализованы только при использовании методов искусственного интеллекта, предполагающих описание знаний о предметной области в базе данных и наличии логического механизма поддержки принятия решения [10, 18, 19].

### Управление знаниями НБО при управлении КА

Управление банком знаний предметной области НБО, включающего алгоритмы решения соответствующих задач, методы проектирования, технические, управленческие решения, системы управления развитием, ключевые заделы в области НБО и др., является ключевым, но не единственным элементом рассматриваемого направления интеллектуальной области знаний.

Управление интеллектуальной собственностью включает также управление конструкторской и технологической документацией (НИОКР); моделированием и формированием пространства нормативно-справочной информации (НСИ) [1, 14]; сохранением и использованием изобретений, патентов, ноу-хау и др. [12].

Основная программа и задачи системы управления знаниями НБО должны предполагать реализацию достижения триединой цели: сохранения и защиты, рас-

<sup>3</sup> Программно-математическое обеспечение АСУ космическими аппаратами : учебник / О. А. Алексеев, В. В. Бетанов, Б. И. Глазов, А. В. Лобан, Д. А. Ловцов. Под общ. ред. Д. А. Ловцова. М. : ВА им. Петра Великого, 1995. 412 с.

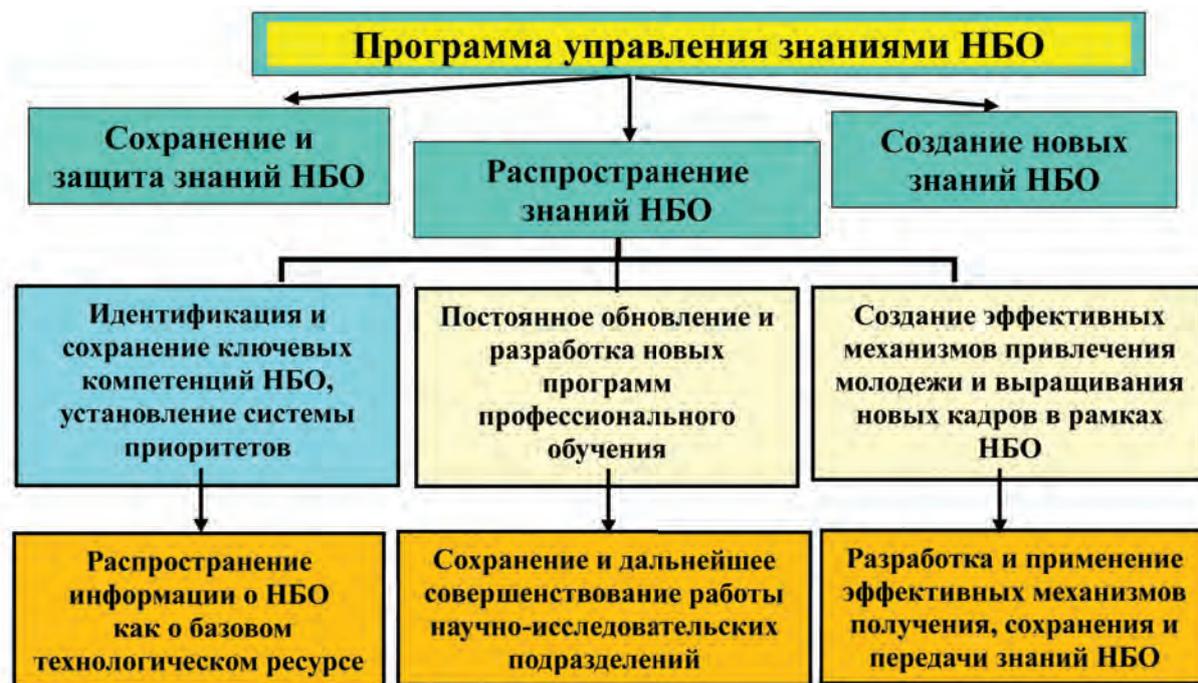


Рис. 3. Программа и задачи системы управления знаниями НБО

пространения и создания новых знаний данной предметной области. Детальные аспекты рассматриваемого вопроса представлены на рис. 3.

Особое место в практике создания *систем искусственного интеллекта* [3] занимают вопросы анализа и использования так называемых *критических (критически важных) знаний* НБО [21]. Основной инструмент выявления таких знаний — *картирование* знаний баллистиков, для чего проводится соответствующий аудит знаний. *Карта знаний* представляет собой инструмент для организации и представления знаний и, как правило, включает направления научных исследований организации и тематики работ отдельных структурных подразделений. При этом исследования проводятся на следующих *этапах*: оценка рисков потери знаний НБО; определение носителей критических знаний; выявление (извлечение) критических знаний; структурирование выявленных критических знаний; формализация критических знаний; сохранение критических знаний (в том числе в банке знаний); передача критических знаний НБО.

Языками (моделями) представления знаний (в том числе в области НБО) служат семантические сети, системы фреймов, логические языки, продукционные системы, а также тензорные системы представления знаний<sup>4</sup>.

<sup>4</sup> Евменов В. П. Интеллектуальные системы управления : учебное пособие. М. : Кн. дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 301 с. Искусственный интеллект : справочник. В 3-х кн. Кн. 1: Системы общения и экспертные системы / Под ред. Э. В. Попова. М. : Радио и связь, 1990. 464 с.; Кн. 2: Модели и методы / Под ред. Д. А. Поспелова. М. : Радио и связь, 1990. 304 с.

Среди специалистов возникают различные точки зрения по вопросам соотношения понятий «данные» и «знания». Доминирующая концепция<sup>5</sup> знаний возникла по мере развития исследований в области интеллектуальных систем и включает пять *признаков*, по которым знания отличаются от данных: *внутренняя интерпретируемость, структурированность, связность, семантическая метрика, активность*. Перечисленные пять особенностей информационных единиц определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, а базы данных перерастают в базы данных и знаний. Совокупность средств, обеспечивающих работу со знаниями, образует систему управления БДЗ (СУБДЗ) [10].

Последние достижения науки и практики искусственного интеллекта — это системы, основанные на знаниях (в том числе в области НБО), включая системы<sup>6</sup>, основанные на правилах, автоматическом доказательстве теорем, автоматическом построении гипотез, рассуждениях по аналогии, а также объектно-ориентированные интеллектуальные системы.

На основе данных признаков можно сформулировать отличия систем искусственного интеллекта НБО от обычных программных систем (см. *таблицу*).

Самостоятельное направление в исследованиях по искусственному интеллекту, получившее название «экспертные системы» (ЭС), имеет целью разработку программ, которые при решении задач, трудных для

<sup>5</sup> Поспелов Д. А. Ситуационное управление: теория и практика. М. : Наука, 1986. 288 с.

<sup>6</sup> Там же.

Отличия систем искусственного интеллекта от традиционных систем программирования

Характеристика	Программирование в системах искусственного интеллекта	Традиционное программирование
Тип обработки	Символьный	Числовой
Метод (алгоритм)	Эвристический поиск	Точный
Задание шагов решения	Неявное	Явное
Искомое решение	Удовлетворительное	Оптимальное
Управление и данные	Смешаны	Разделены
Знания	Неточные	Точные
Модификации	Частые	Редкие

эксперта-человека, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемым экспертом.

Важность экспертных систем состоит в следующем:

- технология экспертных систем существенно расширяет круг практически значимых задач, решаемых на компьютерах, решение которых приносит значительный экономический эффект;
- технология ЭС является важным средством в решении общих проблем традиционного программирования: позволяет снизить *длительность и, следовательно, высокую стоимость разработки* сложных приложений; позволяет снизить высокую *стоимость сопровождения* сложных систем, которая часто в несколько раз превосходит стоимость их разработки; позволяет обеспечить низкий уровень повторной *используемости* программ и др.;
- объединение технологии ЭС с технологией традиционного программирования добавляет новые качества к программным продуктам за счет: обеспечения динамичной модификации приложений пользователем, а не программистом; большей «прозрачности» приложения (например, знания хранятся на ограниченном естественном языке, что не требует комментариев к знаниям, упрощает обучение и сопровождение); лучшей графики; интерфейса и взаимодействия.

ЭС предназначены главным образом для так называемых неформализованных задач, однако ЭС не отвергают и не заменяют традиционного подхода к разработке программ, ориентированного на решение формализованных задач. Неформализованные задачи обычно обладают следующими *особенностями*:

- ошибочностью, неоднозначностью, неполнотой и противоречивостью исходных данных НБО;
- ошибочностью, неоднозначностью, неполнотой и противоречивостью знаний о проблемной области и решаемой задаче НБО;

- большой размерностью пространства решения, т. е. перебор при поиске решения весьма велик;
- динамически изменяющимися данными и знаниями.

ЭС применяются для решения только трудных практических задач. По качеству и эффективности решения ЭС не уступают решениям человека-эксперта. Решения ЭС обладают «прозрачностью», т. е. могут быть объяснены пользователю на качественном уровне. Это достоинство ЭС обеспечивается их способностью рассуждать о своих знаниях и умозаключениях.

ЭС способны пополнять свои знания в ходе взаимодействия с экспертами. Необходимо заметить, что в настоящее время технология экспертных систем используется для решения различных типов задач (интерпретация, предсказание, диагностика, планирование, конструирование, контроль, отладка, инструктаж, управление и др.) в самых разнообразных проблемных областях, таких, в частности, как оперативное навигационно-баллистическое обеспечение сложных динамических объектов.

С учетом рассмотренных аспектов разработки и применения ЭС можно сформулировать обобщенные характеристики современных ЭС, которые должны (см. рис. 4):

1) быть гибридными (парадигма перспективных гибридных ЭС предусматривает, в частности, наличие интеллектуального интерфейса, БДЗ, решателя, пакета прикладных программ);

2) быть способными к интеграции информации различной модельности;

3) обладать средствами когнитивной графики (*когнитивная графика* — это совокупность приемов и методов образного представления условий задачи, которое позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения). Графика в ЭС не просто способ сделать процесс решения задач нагляднее — ситуация здесь более глубокая, так как она



Рис. 4. Продуктивная прикладная классификация интеллектуальных информационных систем

затрагивает те способы решения задач, которые плохо поддаются переводу в символьные модели или вообще не могут быть сведены к ним;

4) иметь структурированные базы данных и знаний [8] (в том числе с учетом «семантического пространства»: например, с проецированием всех единиц информации на специальные шкалы-оппозиции с последующим обобщением этих шкал либо использованием механизма вероятностного прогнозирования);

5) обладать способностью обучаться профессиональной деятельности путем прямого наблюдения. Важность этого определяется тем, что существенная часть профессиональных видов деятельности не вербализуется. К ним относятся всевозможные профессиональные навыки, умения, опыт. Перенять эти знания можно только в процессе совместной деятельности со специалистом, как это и делают молодые специалисты во время обучения у профессионалов.

Структура традиционной экспертной системы НБО с парадигмой перспективных гибридных структур представлена на рис. 5 [2, 4—6, 20].

Важными примерами из практики оперативного НБО применения ЭС для принятия решений в процессе технологического цикла могут служить следующие задачи.

1. Постоянного предварительного и текущего контроля используемых начальных условий<sup>7</sup> (НУ) движе-

<sup>7</sup> Ловцов Д. А. Определение информационных условий наблюдемости и управляемости космических аппаратов // Труды Всеросс. конф. с междунар. участ. «Современные проблемы теоретической астрономии» в 3-х т. Т. 3 / РАН, Ин-т теор. астрон. СПб. : ИТА РАН, 1994. С. 61—62.

ния КА и их элементов [11], в том числе упрощенной и полной логических шкал сил (ЛШС), признаков размерности, типов и модификаторов типов НУ и др. Данная задача особенно важна на этапе задания исходных данных и их соответствия интегральной ЛШС используемых НУ при решении задач вторичной баллистики.

2. Реализация концепции гибридной технологии [6] обеспечения функционирования информационных систем НБО в случае сбоя этапов решения отдельных задач (диагностическая экспертная система НБО).

3. Решение обобщенных некорректных задач НБО в технологическом цикле в силу:

- ограниченного объема выборки ИТНП при оперативном определении параметров движения КА, обусловленного срывом штатной схемы реализации циклограммы проведения измерений;
- ограниченной выборки ИТНП, обусловленной нештатными ситуациями, в рамках которых имело место реализация штатной схемы измерений;
- несоответствия расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному.

4. Задействование наземных средств взаимодействия с КА (средств наземного комплекса управления) при возникновении спорных (конфликтных) ситуаций для повышения качества и оперативности планирования применения наземных средств взаимодействия с космическими аппаратами (в том числе средств НБО) за счёт принятия обоснованных решений о порядке использования наземных средств взаимодействия и обеспечения автоматизации процесса принятия решений с использованием на этой основе экспертных систем,



Рис. 5. Традиционная структура экспертной системы НБО с парадигмой перспективных гибридных структур

а также решения многих других проблем и задач навигационно-баллистического обеспечения управления космическими объектами.

### Заключение

В работе рассмотрены основные вопросы создания и применения интеллектуальных систем при реализации технологических циклов НБО в практике оперативного информационно-расчетного обеспечения КА.

Обсуждаются определения понятий «данные» и «знания», их связь, предлагаемые различными специалистами. Приведены этапы сохранения критических знаний космической тематики вообще и навигационно-

баллистического обеспечения управления КА в частности. Предложено картирование критических знаний аналогично подходам, использованным в Росатоме.

Акцентируется внимание на вопросах отличия систем искусственного интеллекта от обычных программных систем. Приводится соответствующая классификация интеллектуальных информационных систем, применение которых может быть целесообразным в практике НБО управления космическими аппаратами.

Приведены примеры из практики НБО применения ЭС для принятия решений в процессе технологического цикла, в частности, выполнения технологических операций при решении обобщенных некорректных задач.

**Рецензент: Бурый Алексей Сергеевич**, доктор технических наук, эксперт РАН, директор департамента ФГУП «Российский научно-технический центр информации по стандартизации, метрологии и оценке соответствия», г. Москва, Российская Федерация.  
E-mail: a.s.burij@gostinfo.ru

**Литература**

1. Андрюшечкина И.Н. Нормативно-справочная информация в судебных автоматизированных системах // Правовая информатика. 2023. № 1. С. 15—33. DOI: 10.21681/1994-1404-2023-1-15-33 .
2. Бетанов В.В. К вопросу применения интеллектуальных систем в практике оперативного навигационно-баллистического обеспечения космических аппаратов // XLVII Академические чтения по космонавтике. Королёвские чтения 2023 : сборник тезисов (24—27 января 2023 г.) / Роскосмос. М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2023. С. 47.
3. Бетанов В.В. Интеллектуализация технологического цикла навигационно-баллистического обеспечения управления КА // Тр. X Всеросс. конф. «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» («КВНО-2023») (17—21 апреля 2023 г.) / РАН, Ин-т теор. астрон. СПб. : ИТА РАН, 2023. С. 26.
4. Бетанов В.В., Ларин В.К. Построение эффективной экспертной системы баллистика-навигационного обеспечения наземно-космической связи в ГАС РФ «Правосудие» // Правовая информатика. 2017. № 3. С. 50—58. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-3-50-58 .
5. Бетанов В.В., Ларин В.К., Поляева З.А. Алгоритм формирования продукционных правил экспертной системы баллистика-навигационного обеспечения наземно-космической связи в ГАС РФ «Правосудие» // Правовая информатика. 2017. № 4. С. 31—39. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-4-31-39 .
6. Бетанов В.В., Ларин В.К. Концепция гибридной технологии баллистика-навигационного обеспечения наземно-космической связи в ГАС РФ «Правосудие» // Правовая информатика. 2018. № 2. С. 39—46. DOI: 10.21681/1994-1404-2018-2-39-46 .
7. Буренок В.М., Тюлин А.Е., Василенко В.В. Системное обоснование концептуальных положений применения передовых космических технологий : монография / Под ред. В.М. Буренка, А.Е. Тюлина. М. : Инновационное машиностроение, 2023. 371 с.
8. Гаврилова Т.А., Хорошевский В.Ф. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб. : Питер, 2000. 384 с.
9. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем : монография. М. : РГУП, 2021, 314 с. ISBN 978-5-93916-887-8.
10. Ловцов Д.А. Информационная теория эргасистем. Тезаурус : монография. М. : Наука, 2005, 248 с. ISBN 5-02-033779-X.
11. Ловцов Д.А., Андреев Г.И. Прецизионное прогнозирование движения техногенных объектов в околоземном космическом пространстве // Информация и космос. 2015. № 2. С. 103—110.
12. Ловцов Д.А., Богданова М.В. Экономико-правовое регулирование оборота результатов интеллектуальной деятельности предприятий промышленности России // Экономика, статистика и информатика. Вестник УМО. 2013. № 1. С. 53—56.
13. Ловцов Д.А., Карпов Д.С. Динамическое планирование навигационных определений объектов ракетно-космической техники в АСУ лётными испытаниями // Вестник НПО им. С.А. Лавочкина. 2010. № 1. С. 53—60.
14. Негру Д.В., Холкин И.И. Ведение нормативно-справочной информации // Научный альманах МИРЭА. 2015. № 10-3 (12). С. 192—195.
15. Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Матрицы и обобщенные тензоры представления проблем решения задач навигационно-баллистического обеспечения управления КА // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2022. Т. 9. Вып. 2. С. 4—13.
16. Тюлин А.Е., Круглов А.В., Бетанов В.В. Уточнение согласующих коэффициентов математической модели движения КА с использованием понятия «обобщенная наблюдаемость» // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы. 2020. Т. 7. Вып. 4. С. 3—13.
17. Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Технологические основы навигационно-баллистического обеспечения управления КА и примеры применения перспективных космических технологий // Тр. IX Всеросс. конф. «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» («КВНО-2021») (13—17 сентября 2021 г.) / РАН, Ин-т теор. астрон. СПб. : ИТА РАН, 2021. С. 18.
18. Тюлин А.Е., Круглов А.В., Бакицько Р.В. Требования к метрологическому обеспечению как подсистеме АС НБО при реализации космических технологий управления КА // Тр. X Междунар. симп. «Метрология времени и пространства» (6—8 октября 2021 г.) / ФГУП «ВНИИФТРИ». Менделеево, Моск. обл. : ВНИИФТРИ, 2021. С. 8—11.
19. Тюлин А.Е., Бетанов В.В., Яшин В.Г. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Часть I. Орбитальное движение, маневры и методы определения параметров орбит КА / Под ред. А.Е. Тюлина. М. : Инновационное машиностроение, 2020. 336 с.
20. Тюлин А.Е., Дворкин В.В., Бетанов В.В. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Часть II. Космические системы пространственно-временного обеспечения на орбитах различных классов / Под ред. А.Е. Тюлина. М. : Инновационное машиностроение, 2020. 302 с.
21. «Росатом» делится знаниями в высокотехнологичных компаниях / Под ред. В.А. Першукова, Д.С. Медовникова. М. : Росатом, 2012. 146 с.
22. Lovtsov D.A., Panyukov I.I. A New Informational Technology for Computer-Aided Planning of the Determination of the Parameters of Complex Dynamic Objects // Automation and Remote Control, 1995. Vol. 56. No. 12. Part 1. Pp. 1687—1697.

# INTELLECTUALISATION OF NAVIGATION AND BALLISTIC SUPPORT FOR SPACECRAFT CONTROL

**Vladimir Betanov**, Dr.Sc. (Technology), Professor, Honoured Scientist of the Russian Federation, corresponding member of the Russian Academy of Rocket and Artillery Sciences, Deputy Head of the AO "Rossiiskie kosmicheskie sistemy" (Russian Space Systems JSC) Centre, Moscow, Russian Federation. E-mail: [vlavab@mail.ru](mailto:vlavab@mail.ru)

**Keywords:** spacecraft, intelligent system, navigation and ballistic support, technological cycle, non-routine situation, knowledge and database system, expert systems, problems, conditions, methods, efficiency, quality.

## Abstract

*Purpose of the work:* developing artificial intelligence methods in the practice of navigation and ballistic support (NBS) for spacecraft control.

*Method used:* system analysis of NBS using the apparatus of digitalisation and artificial intelligence systems.

*Study findings:* a justification is given for a productive applied classification of intelligent information systems used and planned for use in the practice of NBS and requirements for high-level automation of the spacecraft control circuit using an enhanced intelligent component, in particular, combined computing & logical and expert systems oriented towards computational algorithms with storage of unique knowledge and data in the field of subject component of spacecraft equipment. The proposed approach adds new features to the traditional procedure of processing incoming information by the consumer's navigation equipment which makes it possible to considerably improve the quality of solving target tasks in subsystems of large-scale information and analytical systems, such as the Government Automated Systems "Pravosudie" [Justice], "Vyборы" [Elections], "Upravlenie" [Administration]. Examples taken from the practice of operational NBS for using hybrid expert systems for decision-making in the course of the technological cycle are given. Solutions for generalised ill-posed problems of NBS as well as the implementation of the concept of hybrid technology for ensuring the functioning of information and computation support systems in cases of faults during some stages in solving individual tasks are considered.

## References

1. Andriushechkina I.N. Normativno-spravochnaia informatsiia v sudebnykh avtomatizirovannykh sistemakh. Pravovaia informatika, 2023, No. 1, pp. 15–33. DOI: 10.21681/1994-1404-2023-1-15-33 .
2. Betanov V.V. K voprosu primeneniia intellektual'nykh sistem v praktike operativnogo navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniia kosmicheskikh apparatov. XLVII Akademicheskie chteniia po kosmonavtike. Korolyovskie chteniia 2023 : sbornik tezisev (24–27 ianvaria 2023 g.). Roskosmos. M. : MGTU im. N. E. Baumana, 2023, p. 47.
3. Betanov V.V. Intellektualizatsiia tekhnologicheskogo tsikla navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniia upravleniia KA. Tr. X Vseross. konf. "Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie" ("KVNO-2023") (17–21 apreliia 2023 g.). RAN, In-t teor. astron. SPb. : ITA RAN, p. 26.
4. Betanov V.V., Larin V.K. Postroenie effektivnoi ekspertnoi sistemy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniia nazemno-kosmicheskoi sviazi v GAS RF "Pravosudie". Pravovaia informatika, 2017, No. 3, pp. 50–58. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-3-50-58 .
5. Betanov V.V., Larin V.K., Poziaeva Z.A. Algoritm formirovaniia produktsionnykh pravil ekspertnoi sistemy ballistiko-navigatsionnogo obespecheniia nazemno-kosmicheskoi sviazi v GAS RF "Pravosudie". Pravovaia informatika, 2017, No. 4, pp. 31–39. DOI: 10.21681/1994-1404-2017-4-31-39 .
6. Betanov V.V., Larin V.K. Kontseptsii gibridnoi tekhnologii ballistiko-navigatsionnogo obespecheniia nazemno-kosmicheskoi sviazi v GAS RF "Pravosudie". Pravovaia informatika, 2018, No. 2, pp. 39–46. DOI: 10.21681/1994-1404-2018-2-39-46 .
7. Burenok V.M., Tiulin A.E., Vasilenko V.V. Sistemnoe obosnovanie kontseptual'nykh polozhenii primeneniia peredovykh kosmicheskikh tekhnologii : monografiia. Pod red. V.M. Burenka, A.E. Tiulina. M. : Innovatsionnoe mashinostroenie, 2023. 371 pp.
8. Gavrilova T.A., Khoroshevskii V.F. Bazy znaniia intellektual'nykh sistem. SPb. : Piter, 2000. 384 pp.
9. Lovtsov D.A. Informatsionnaia teoriia ergasistem : monografiia. M. : RGUP, 2021, 314 pp. ISBN 978-5-93916-887-8.
10. Lovtsov D.A. Informatsionnaia teoriia ergasistem. Tezaurus : monografiia. M. : Nauka, 2005, 248 pp. ISBN 5-02-033779-X.
11. Lovtsov D.A., Andreev G.I. Pretsizionnoe prognozirovanie dvizheniia tekhnogennykh ob'ektov v okolozemnom kosmicheskom prostranstve. Informatsiia i kosmos, 2015, No. 2, pp. 103–110.

12. Lovtsov D.A., Bogdanova M.V. Ekonomiko-pravovoe regulirovanie oborota rezul'tatov intellektual'noi deiatel'nosti predpriatii promyshlennosti Rossii. Ekonomika, statistika i informatika. Vestnik UMO, 2013, No. 1, pp. 53–56.
13. Lovtsov D.A., Karpov D.S. Dinamicheskoe planirovanie navigatsionnykh opredelenii ob'ektov raketno-kosmicheskoi tekhniki v ASU letnymi ispytaniiami. Vestnik NPO im. S.A. Lavochkina, 2010, No. 1, pp. 53–60.
14. Negru D.V., Kholkin I.I. Vedenie normativno-spravochnoi informatsii. Nauchnyi al'manakh MIREA, 2015, No. 10-3 (12), pp. 192–195.
15. Tiulin A.E., Betanov V.V. Matritsy i obobshchennye tenzory predstavleniia problem resheniia zadach navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniia upravleniia KA. Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy, 2022, t. 9, vyp. 2, pp. 4–13.
16. Tiulin A.E., Kruglov A.V., Betanov V.V. Utochnenie soglasuiushchikh koeffitsientov matematicheskoi modeli dvizheniia KA s ispol'zovaniem poniatii "obobshchennaia nabliudaemost". Raketno-kosmicheskoe priborostroenie i informatsionnye sistemy, 2020, t. 7, vyp. 4, pp. 3–13.
17. Tiulin A.E., Betanov V.V. Tekhnologicheskie osnovy navigatsionno-ballisticheskogo obespecheniia upravleniia KA i primery primeneniia perspektivnykh kosmicheskikh tekhnologii. Tr. IX Vseross. konf. "Fundamental'noe i prikladnoe koordinatno-vremennoe i navigatsionnoe obespechenie" ("KVNO-2021") (13–17 sentiabria 2021 g.). RAN, In-t teor. astron. SPb. : ITA RAN, 2021. S. 18.
18. Tiulin A.E., Kruglov A.V., Bakit'ko R.V. Trebovaniia k metrologicheskomu obespecheniiu kak podsisteme AS NBO pri realizatsii kosmicheskikh tekhnologii upravleniia KA. Tr. X Mezhdunar. simp. "Metrologiia vremeni i prostranstva" (6–8 oktiabria 2021 g.). FGUP "VNIIFTRI". Mendeleevo, Mosk. obl. : VNIIFTRI, 2021, pp. 8–11.
19. Tiulin A.E., Betanov V.V., Iashin V.G. Orbital'nye segmenty kosmicheskikh sistem prostranstvenno-vremennogo obespecheniia. Chast' I. Orbital'noe dvizhenie, manevery i metody opredeleniia parametrov orbit KA. Pod red. A.E. Tiulina. M. : Innovatsionnoe mashinostroenie, 2020. 336 pp.
20. Tiulin A.E., Dvorkin V.V., Betanov V.V. Orbital'nye segmenty kosmicheskikh sistem prostranstvenno-vremennogo obespecheniia. Chast' II. Kosmicheskiiye sistemy prostranstvenno-vremennogo obespecheniia na orbitakh razlichnykh klassov. Pod red. A.E. Tiulina. M. : Innovatsionnoe mashinostroenie, 2020. 302 pp.
21. "Rosatom" delitsia znaniiami v vysokotekhnologichnykh kompaniiakh. Pod red. V.A. Pershukova, D.S. Medovnikova. M. : Rosatom, 2012. 146 pp.
22. Lovtsov D.A., Panyukov I.I. A New Informational Technology for Computer-Aided Planning of the Determination of the Parameters of Complex Dynamic Objects. Automation and Remote Control, 1995. Vol. 56. No. 12. Part 1. Pp. 1687–1697.