

## Внедрение интеллектуальных систем в контур навигационно-баллистического обеспечения управления космическим аппаратом

© В. В. Бетанов

АО «Российские космические системы», г. Москва, Россия

### Реферат

В работе исследуются вопросы создания перспективных космических технологий навигационно-баллистического обеспечения (НБО) управления КА с применением систем искусственного интеллекта. Рассматриваются нештатные ситуации, возникающие в практике управления сложными системами и комплексами в ходе выполнения летных испытаний и технологических циклов НБО при штатной эксплуатации. Требование высокого уровня автоматизации контура управления КА предполагает применение 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.

Приведены примеры из практики оперативного НБО применения гибридных экспертных систем для принятия решений в процессе технологического цикла выполнения работ. В частности, рассмотрено решение обобщенных некорректных задач НБО, реализация концепции гибридной технологии обеспечения функционирования информационных систем информационно-расчетного обеспечения в случае сбоев этапов решения отдельных задач. Обсуждается вопрос задействования средств НКУ при возникновении спорных ситуаций для повышения качества и оперативности планирования применения средств взаимодействия с КА.

**Ключевые слова:** космический аппарат, навигационно-баллистическое обеспечение, интеллектуальная система, технологический цикл, нештатная ситуация.

*Контакты для связи: Владимир Вадимович Бетанов (contact@spacecorp.ru).*

**Для цитирования:** Бетанов В. В. Внедрение интеллектуальных систем в контур навигационно-баллистического обеспечения управления КА // Труды ИПА РАН. 2023. Вып. 64. С. 24–30.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.24-30>

## Implementation of Intelligent Systems into the Navigation and Ballistic Support for Spacecraft Control

V. V. Betanov

“Russian Space Systems” JSC (RKS), Moscow, Russia

### Abstract

The issues of creating advanced space technologies for navigation and ballistic support (NBS) for spacecraft control using artificial intelligence systems are investigated. The contingency situations that arise in the practice of managing complex systems and complexes during flight tests and technological cycles of NBS in normal operation are considered. The requirement of a high-level automating spacecraft control loop involves the use of an increased degree of intellectual component, in particular, combined calculation-logical and expert systems focused on computational algorithms with the storage of unique knowledge and data in the field of the subject component of space technology.

Examples from the practice of operational NBS of using hybrid expert systems for decision-making in the process of the technological cycle of work performance are given. In particular, the author considered the solution of generalized ill-posed NBS problems, the concept of a hybrid technology implementation to ensure the functioning of information systems for settlement support in the event of failures in the stages of solving individual problems. The issue of using ground-based control complex in case of disputes is discussed that requires to improve the quality and efficiency of planning how to use the means of interaction with the spacecrafts.

**Keywords:** spacecraft, navigation and ballistic support, intelligent system, technological cycle, emergency situation.

*Contacts: Vladimir V. Betanov (contact@spacecorp.ru).*

**For citation:** Betanov V. V. Implementation of intelligent systems into the navigation and ballistic support for spacecraft control // Transactions of IAA RAS. 2023. Vol. 64. P. 24–30.

<https://doi.org/10.32876/AplAstron.64.24-30>

## Введение

Стратегической целью отечественной программы комплексного развития космических информационных технологий на ближайшее десятилетие являются: 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 перспективных космических систем и комплексов в интересах национальной, общественной и экономической безопасности страны.

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

- система ОНБО должна быть универсальной, т. к. ее функционирование направлено на осуществление комплекса работ по обеспечению управления КА различного целевого назначения ближнего и среднего космоса;

- навигационно-баллистические задачи должны решаться с высокой точностью и оперативностью, а оптимизация получаемых решений должна выполняться полноценно;

- результаты решения навигационно-баллистических задач должны обладать практически абсолютной достоверностью;

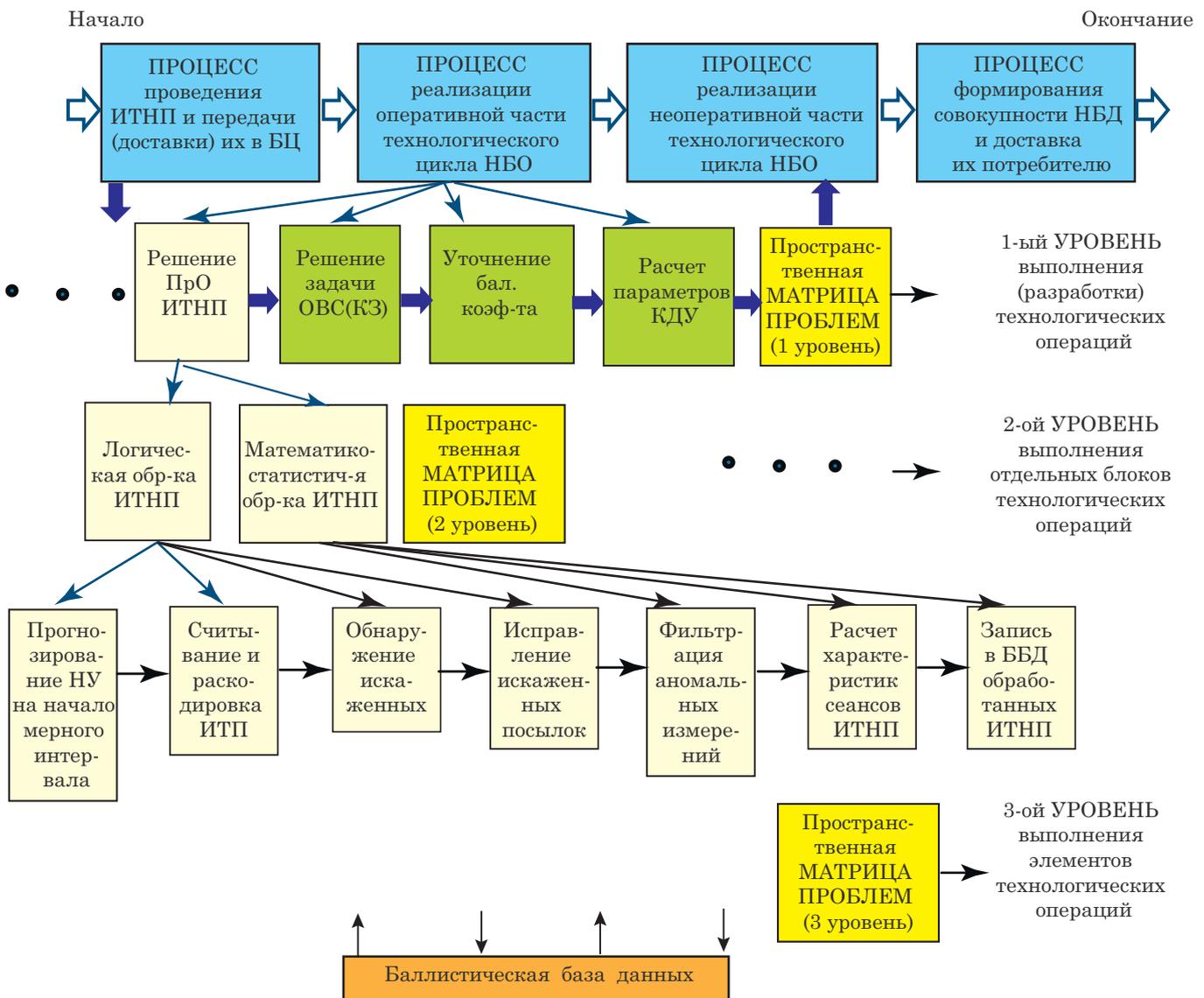


Рис. 1. Пространственные матрицы (тензоры) проблем решения задач типового оперативного навигационно-баллистического цикла

— все баллистические расчеты, анализ полученных результатов и выработка рекомендаций относительно принятия решений должны выполняться 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) обеспечивают совместно с моделированием и созданием интеллектуальных систем (расчетно-логических систем, ориентированных на вычислительные алгоритмы экспертных, гибридных экспертных систем и обучающих комплексов) автоматизированную реализацию технологического цикла (ТЦ) НБО и анализа предметной ситуации.

Основная цель системы управления ТЦ НБО, как современной эргатической системы (Тюлин, Бетанов, 2022) — решение актуальных научных задач иерархических интегрированных автоматизированных управляющих подсистем НБО при одновременном уменьшении трудоемкости 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, представлена на рис. 1.

Адаптация понятий технологическая операция (ТО), цикл (ТЦ) и процесс (ТП) к информационно-расчетному обеспечению управления КА и принципы построения автоматизированной системы ТЦ НБО, рассмотренные в ряде работ авторов (Тюлин и др., Ч. I, 2020; Тюлин и др., Ч. II, 2020), позволяют 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 (СУ) ТЦ могут быть реализованы только при использовании методов искусственного интеллекта (ИИ), предполагающих описание знаний о предметной области в базе знаний и наличии логического механизма поддержки принятия решения (Под ред. Першуква, Медовникова, 2012; Гаврилова, 2000).

## 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 т. п.) является ключевым, но не единственным элементом рассматриваемого направления интеллектуальной области знаний.

Управление интеллектуальной собственностью включает также управление конструкторской и технологической документацией; моделированием и формированием пространства нормативно-справочной информацией; сохранением и использованием изобретений, патентов, ноу-хау и др.

В основной программе и задачах системы управления знаниями НБО должна быть предложена реализация выполнения триединого направления — сохранения, защиты, распространения и создания новых знаний данной предметной области. Детальные аспекты рассматриваемого вопроса представлены на рис. 2.

Особое место в практике создания систем ИИ занимают вопросы анализа и использования так называемых критических знаний НБО (Под ред. Першуква, Медовникова, 2012). Основным инструментом выявления критически важных 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 исследование проводится 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 т.ч. в банке знаний);
- передача критических знаний НБО.

Языками (моделями) представления знаний (в т.ч. в направлении НБО) служат семантические сети, системы фреймов, логические языки, продукционные системы, а также тензорные системы представления знаний (Гаврилова, 2000; Поспелов, 1988; Евменов, 2009; Спр. под ред. Попова, кн. 1, 1990).

Среди специалистов возникают различные точки зрения по вопросам соотношения понятий «данные» и «знания». Д. А. Поспелов в работе



Рис. 2. Программа и задачи системы управления знаниями НБО

(Поспелов, 1988) возвращается к теме различия «знаний» и «данных», отмечая, что концепция знаний возникла по мере развития исследований в области интеллектуальных систем, и приводит пять признаков, по которым знания отличаются от данных:

- 1) внутренняя интерпретируемость;
- 2) структурированность;
- 3) связность;
- 4) семантическая метрика;
- 5) активность.

Перечисленные пять особенностей информационных единиц определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, а базы данных перерастают в базы знаний. Совокупность средств, обеспечивающих работу со знаниями, образуют систему управления базой знаний.

Последние достижения науки и практики ИИ — это системы, основанные на «знаниях» (в том числе в НБО) (Поспелов, 1988):

1. Системы, основанные на правилах;
2. Системы, основанные на автоматическом доказательстве теорем;
3. Системы, основанные на автоматическом построении гипотез;
4. Системы, основанные на рассуждениях по аналогии;
5. Объектно-ориентированные интеллектуальные системы.

На основе отмеченных факторов можно сформулировать отличия систем ИИ НБО от обычных программных систем, приведенных в таблице.

Самостоятельное направление в исследованиях по искусственному интеллекту, получившее название «экспертные системы» (ЭС), имеющее целью исследования в разработке программ, которые при решении задач, трудных для эксперта-человека, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемых экспертом.

Таблица

Отличия систем ИИ НБО от обычных программных систем

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

Важность ЭС состоит в следующем:

— технология ЭС существенно расширяет круг практически значимых задач, решаемых на компьютерах, решение которых приносит значительный экономический эффект;

— технология ЭС является важнейшим средством в решении глобальных проблем традиционного программирования: позволяет снизить длительность и, следовательно, высокую стоимость разработки сложных приложений; высокую стоимость сопровождения сложных систем, которая часто в несколько раз превосходит стоимость их разработки; низкий уровень повторной используемости программ и т.п.;

— 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 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 качество ЭС обеспечивается их способностью рассуждать о своих знаниях и умозаключениях.



Рис. 3. Возможная классификация интеллектуальных информационных систем

ЭС способны пополнять свои знания в ходе взаимодействия с экспертом. Необходимо отметить, что в настоящее время технология ЭС используется для решения различных типов задач (интерпретация, предсказание, диагностика, планирование, конструирование, контроль, отладка, инструктаж, управление) в самых разнообразных проблемных областях, таких как ОНБО сложных динамических объектов.

С учетом отмеченных аспектов разработки и применения ЭС можно сформулировать обобщенные характеристики современных ЭС, которые должны:

1) быть гибридными (парадигма перспективных гибридных ЭС: интеллектуальный интерфейс + база знаний + решатель + пакет 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 про-

цесс решения задач нагляднее — ситуация здесь более глубокая, так как она затрагивает те способы решения задач, которые плохо поддаются переводу в символьные модели, или вообще не могут быть сведены к ним;

4) иметь структурированные базы знаний (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 выучки у профессионалов (рис. 3).

Структура традиционной экспертной системы НБО может быть представлена на рис. 4 (Поспелов, 1988).

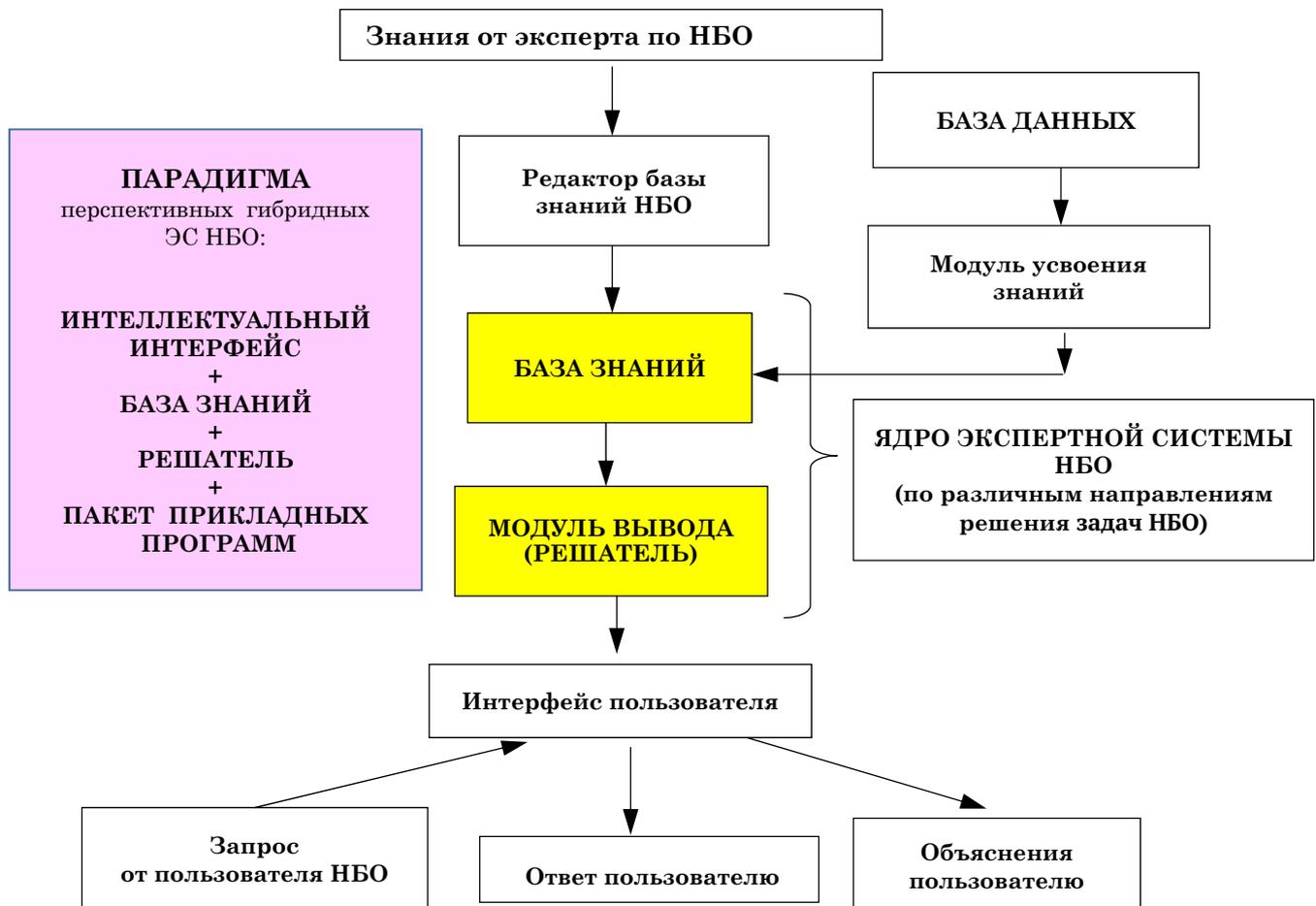


Рис. 4. Традиционная структура экспертной системы с парадигмой перспективных гибридных структур

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

1. Постоянный предварительный и текущий контроль используемых начальных условий (НУ) движения КА и их элементов, в том числе упрощенной и полной логических шкал сил, признаков размерности, типов и модификаторов типов НУ и др. Отмеченная задача особенно важна на этапе задания исходных данных и их соответствия с интегральной логической шкалы сил используемых НУ при решении задач вторичной баллистики.

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

3. Решение обобщенных некорректных задач навигационно-баллистического задач в технологическом цикле в силу:

— ограниченного объема выборки ИТНП при оперативном определении параметров движения КА, обусловленного срывом штатной схемы реализации циклограммы проведения измерений;

— ограниченной объема выборки ИТНП, обусловленного нештатными ситуациями, в рамках которых имело место реализация штатной схемы измерений;

— несоответствия расчетного пространственно-временного перемещения центра масс КА реальному.

4. Решение вопроса задействования наземных средств взаимодействия с КА (средств НКУ) при возникновении спорных (конфликтных) ситуаций для повышения качества и оперативности планирования применения наземных средств взаимодействия с КА (в том числе средств НБО) за счет принятия обоснованных решений о порядке использования наземных средств взаимодействия и обеспечения автоматизации процесса принятия решений с использованием на этой основе ЭС, 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 ГК «Росатом».

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 навигационно-баллистического обеспечения управления КА.

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

## Литература

Гаврилова Т. А. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000.

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.

Евменов В. П. Интеллектуальные системы управления. Уч. пос. М.: Книжный 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.

Поспелов Г. С. Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988.

«Росатом» делится знаниями в высокотехнологичных компаниях / Под ред. В. А. Першукова, Д. С. Медовникова. М.: ГК «Росатом», 2012.

Тюлин А. Е., Бетанов В. В., Яшин В. Г. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Ч. I. Орбитальное движение, маневры и методы определения параметров орбит КА / Под ред. чл.-корр. РАН А. Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 336 с.

Тюлин А. Е., Дворкин В. В., Бетанов В. А. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Ч. II. Космические системы пространственно-временного обеспечения на орбитах различных классов / Под ред. чл.-корр. РАН А. Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 302 с.