

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ, УПРАВЛЕНИЕ КОСМИЧЕСКИМИ АППАРАТАМИ,
ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И СИСТЕМЫ ТЕЛЕМЕТРИИ.
ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ**

УДК 621.3;629;681;316 DOI 10.30894/issn2409-0239.2023.10.3.3.11 EDN ANUGDN

**Интеллектуальные системы в контуре
навигационно-баллистического обеспечения управления КА**

А. Е. Тюлин, *д. э. н., к. т. н., член-корреспондент РАРАН, contact@spacecorp.ru*
Коллегия ВПК РФ, Москва, Российская Федерация

В. В. Бетанов, *д. т. н., проф., член-корреспондент РАРАН, contact@spacecorp.ru*
АО «Российские космические системы», Москва, Российская Федерация

Аннотация. 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, рассмотрены 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 наземных 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

**Intelligent Systems in the Circuit of Navigation
and Ballistic Support for Spacecraft Control**

A. E. Tyulin, *Dr. Sci. (Econ.), Cand. Sci. (Engineering), Prof., Corresponding Member*
of Russian Academy of Missile and Artillery Sciences, contact@spacecorp.ru
Collegium of the Military Industrial Commission of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

V. V. Betanov, *Dr. Sci. (Engineering), Prof., Corresponding Member of Russian Academy*
of Missile and Artillery Sciences, betanov_vv@spacecorp.ru
Joint Stock Company "Russian Space Systems", Moscow, Russian Federation

Abstract. The paper investigates the issues of creating advanced space technologies for navigation and ballistic support (NBS) for spacecraft control using artificial intelligence systems. The paper considers the emergencies that arise while controlling sophisticated systems and complexes during flight tests and technological cycles of NBS at normal operation. The requirement for a high level of automation of the spacecraft control loop involves using 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.

The examples from the practice of operational NBS employing hybrid expert systems for decision-making in the process of the technological cycle of work performance are given. In particular, the solution of generalized ill-posed NBS problems, the implementation of the hybrid technology concept for ensuring the functioning of information systems of information and calculation support during failures in the stages of solving individual problems are considered. The issue of using ground-based facilities of the ground control systems during disputable situations to improve the quality and efficiency of planning to apply the means of interaction with the spacecraft is discussed.

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

Введение

Математическая подготовка и решение задач баллистики и навигации космических аппаратов (КА) должны сопровождаться выполнением ряда важных, как правило, необходимых этапов, от корректной реализации которых зависят показатели и целевой эффект решения исследуемой задачи. В большинстве случаев указанные этапы могут включать решение отдельных ее частей, на практике реализуемых в технологических циклах навигационно-баллистического обеспечения (НБО):

- уяснение решаемой задачи,
- подготовку данных для решения,
- анализ методик и методов решения задачи,
- составление алгоритма решения,
- вычисление отдельных составляющих и решение задачи в целом,
- контроль и анализ полученного результата решения.

Особое значение в технологическом цикле НБО управления КА играют системы искусственного интеллекта (ИИ), в том числе экспертные системы (ЭС), которые предназначены для решения 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 задачи НБО;
- большой размерностью пространства решения, т. е. перебор при поиске решения весьма велик;
- динамически изменяющимися данными и знаниями.

Создание новых космических технологий, являющихся совокупностью различного рода элементов логистики и процессов, направленных на создание КА конкретного целевого назначения, получения новых знаний о структуре Земли и космоса, а также формирования услуг на базе этих знаний [1–5], включает рассмотрение ключевых технологических

операций НБО, ассоциируемых как решение отдельных баллистических задач и требующих применения систем ИИ.

Как известно, к системам оперативного НБО управления КА предъявляется ряд весьма жестких требований, основными из которых являются:

- навигационно-баллистические задачи должны обеспечивать требуемую точность, оперативность и надежность результатов решений как в штатных, так и в нештатных ситуациях, которые могут иметь место в практике ОНБО управления КА;

- свойство универсальности, так как их 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 достаточно полно;

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

- все баллистические расчеты, анализ получаемых результатов и выработка рекомендаций относительно принятия решений должны выполняться в сроки, регламентированные планом управления полетом.

Указанные обстоятельства требуют тщательного анализа возможного успешного решения как отдельных задач, так и общих проблем, возникающих в ходе выполнения технологических циклов НБО. Моделирование данных для подобных исследований возможно осуществить путем априорного матричного и обобщенного тензорного (неклассического математического варианта представления) анализа и разрешения проблем НБО [1, 6].

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 и т. п.) автоматизированную реализацию технологического цикла НБО и анализа предметной ситуации.

Матрицы проблем решения задач типовой технологической операции (предварительной обработки измерений, ПрО) управления КА представлены на рис. 1, а пример условного описания связи между отдельными матрицами проблем решения задач НБО управления КА (в частности, с решением центральной задачи технологического цикла НБО определения вектора состояния) — на рис. 2.



Рис. 1. Матрица проблем решения задач типовой технологической операции (предварительной обработки измерений) управления КА

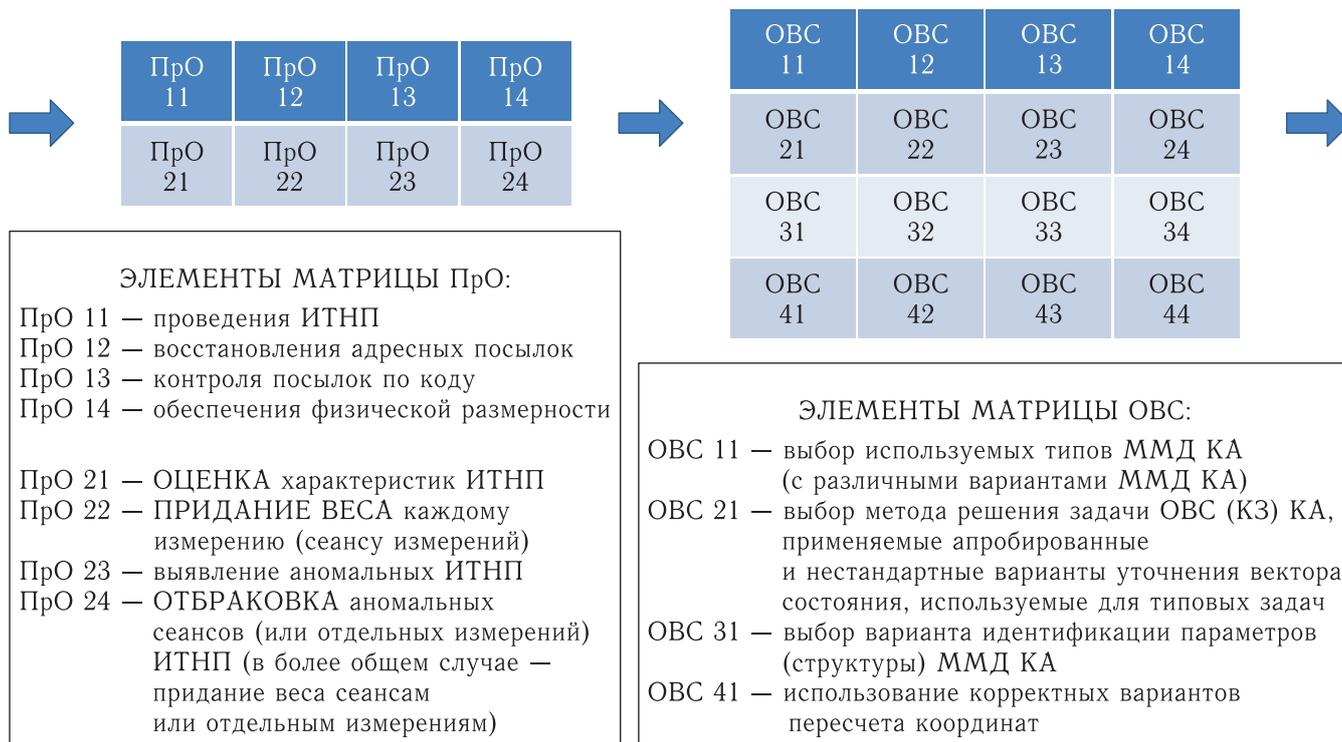


Рис. 2. Условное описание связи между отдельными матрицами проблем решения задач НБО управления КА. **Экспликация:** САО — средняя арифметическая ошибка; СКО — средняя квадратическая ошибка; БЦ — баллистический центр; ОВС (КЗ) — задача определения вектора состояния (краевая задача); ПрО — предварительная обработка ИТНП

Основная цель системы управления технологическим циклом НБО как современной эргатической системы [7, 8] — 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.

Адаптация понятий «технологическая операция», «цикл» и «процесс к информационно-расчетному обеспечению (ИРО) управления КА» и принципы построения автоматизированной системы ТЦ НБО рассмотрены в ряде работ авторов [8]; они 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 (БЗ) и наличии логического механизма поддержки принятия решения» [9, 17].

Управление знаниями НБО при управлении КА

Управление банком знаний предметной области НБО, включающим 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 (НИОКР); моделирование и формирование пространства нормативно-справочной информацией (НСИ); сохранение и использование изобретений, патентов, ноу-хау и др.

Основная программа и задачи системы управления знаниями НБО должны предполагать реализацию выполнения триединого направления: сохранения и защиты, распространения и создания новых знаний данной предметной области.

Детальные аспекты рассматриваемого вопроса представлены на рис. 3.



Рис. 3. Программа и задачи системы управления знаниями НБО

Особое место в практике создания систем ИИ занимают вопросы анализа и использования так называемых критических знаний НБО. «Основной инструмент 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 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 т. ч. в банке знаний);
- передача критических знаний НБО» [9].

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 [10–13].

Среди специалистов возникают различные точки зрения по вопросам соотношения понятий «данные» и «знания». Д. А. Поспелов в работе [14] 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 особенности информационных единиц определяют ту грань, за которой данные превращаются в знания, а базы данных перерастают в базы знаний (БЗ). Совокупность средств, обеспечивающих работу с знаниями, образуют систему управления базой знаний (СУБЗ)» [14].

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

- «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» [11, 15].

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

Таблица. Отличия систем ИИ от обычных [19]

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

«Самостоятельное направление в исследованиях по искусственному интеллекту, получившее название “экспертные системы” (ЭС), имеющее целью исследований в разработке программ, которые при решении задач, трудных для эксперта-человека, получают результаты, не уступающие по качеству и эффективности решениям, получаемых экспертом» [18].

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 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» [20].

Как отмечалось выше, неформализованные задачи обычно обладают ошибочностью, неоднозначностью, неполнотой и противоречивостью исходных данных НБО и знаний о проблемной области и решаемой задаче, а также другими жесткими ограничениями для нахождения результатов вычисления исследуемого процесса. В этих случаях незаменимым является применение систем искусственного интеллекта.

«Экспертные системы применяются для решения только трудных практических задач. По качеству и эффективности решения экспертные системы не уступают решениям эксперта-человека. Решения экспертных систем обладают “прозрачностью”, т. е. могут быть объяснены пользователю на качественном уровне. Это качество экспертных систем обеспечивается их способностью рассуждать о своих знаниях и умозаключениях. ЭС способны пополнять свои знания в ходе взаимодействия с экспертом. Необходимо отметить, что в настоящее время технология экспертных систем используется для решения

различных типов задач (интерпретация, предсказание, диагностика, планирование, конструирование, контроль, отладка, инструктаж, управление) в самых разнообразных проблемных областях» [21], таких как оперативное навигационно-баллистическое обеспечение сложных динамических объектов.

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

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 как совокупности приемов и методов образного представления условий задачи, которое позволяет либо сразу увидеть решение, либо получить подсказку для его нахождения» [22]). Графика в ЭС не просто способ сделать процесс 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.

Структура традиционной экспертной системы НБО может быть представлена на рис. 5 [1, 11].

Важными примерами из практики оперативного НБО применения ЭС для принятия решений



Рис. 4. Возможная классификация интеллектуальных информационных систем

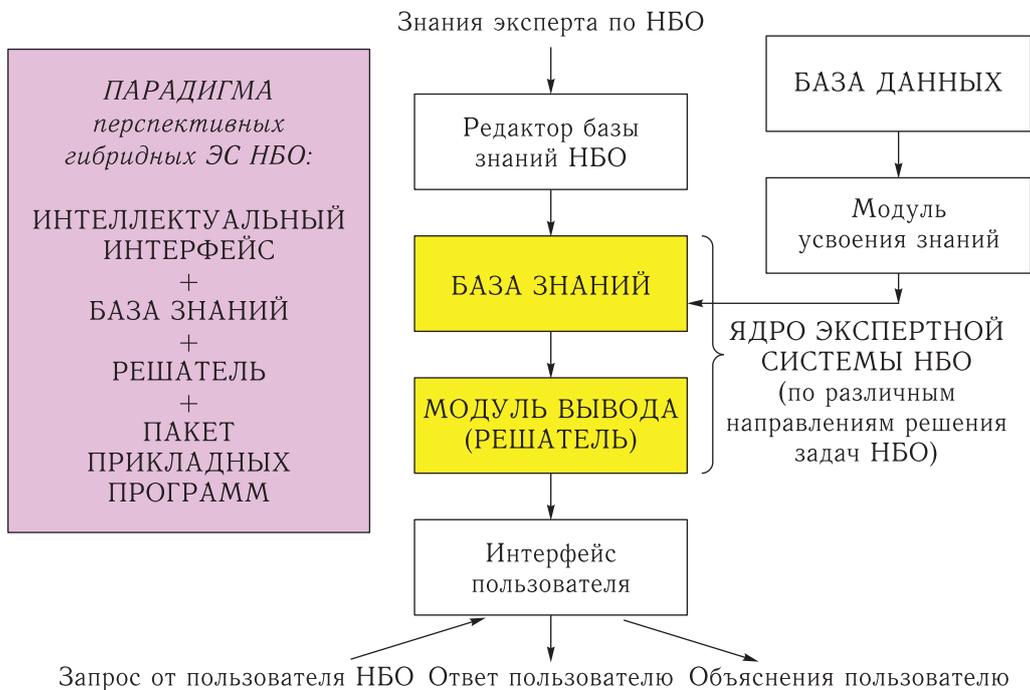


Рис. 5. Традиционная структура экспертной системы с парадигмой перспективных гибридных структур

в процессе технологического цикла могут служить следующие задачи.

1. Задача постоянного предварительного и текущего контроля используемых начальных условий (НУ) движения КА и их элементов, в том числе упрощенной и полной логических шкал сил (ЛШС), признаков размерности, типов и модификаторов типов НУ и др. Отмеченная задача особенно важна на этапе задания исходных данных и их соответствия с интегральной ЛШС используемых НУ при решении задач вторичной баллистики.

2. Реализация концепции гибридной технологии обеспечения функционирования информационных систем НБО в случае сбоев 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 выборки ИТНП, обусловленное 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 космическими аппаратами (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 экспертных систем, 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 передовых организациях страны.

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 космическими аппаратами.

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

Список литературы

1. Бетанов В.В., Тюлин А.Е. Интеллектуальные системы в контуре навигационно-баллистического обеспечения управления КА. Материалы XI Всероссийской научно-технической конференции, АО «Российские космические системы», 6–8 июня 2023 г., с. 73–74.
2. Буренок В.М., Тюлин А.Е., Василенко В.В. и др. Системное обоснование концептуальных положений применения передовых космических технологий. Монография под ред. президента РАН В.М. Буренка и чл.-корр. РАН А.Е. Тюлина, РАН, АО «РКС». М.: Инновационное машиностроение, 2023. 371 с.
3. 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.
4. 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.
5. Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Технологические основы навигационно-баллистического обеспечения управления КА и примеры применения перспективных космических технологий. Труды IX Всероссийской конференции «Фундаментальное и прикладное координатно-временное и навигационное обеспечение» (КВНО-2021), ИПА РАН, г. Санкт-Петербург, 13–17 сентября 2021 г.
 6. Тюлин А.Е., Круглов А.В., Бакитько Р.В. и др. Требования к метрологическому обеспечению как подсистеме АС НБО при реализации космических технологий управления КА. Труды X Международного симпозиума «Метрология времени и пространства», Московская область, Солнечногорский район, г.п. Менделеево, ФГУП «ВНИИФТРИ», 6–8 октября 2021 г., с. 8–11.
 7. 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. чл.-корр. РАН А.Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 336 с.
 8. Тюлин А.Е., Дворкин В.В., Бетанов В.А. Орбитальные сегменты космических систем пространственно-временного обеспечения. Часть II. Космические системы пространственно-временного обеспечения на орбитах различных классов. Под ред. чл.-корр. РАН А.Е. Тюлина. М.: Инновационное машиностроение, 2020. 302 с.
 9. «Росатом» делится знаниями в высокотехнологичных компаниях. Под ред. В.А. Першукова и Д.С. Медовникова. М.: ГК «Росатом», 2012.
 10. Гаврилова Т.А. Базы знаний интеллектуальных систем. СПб.: Питер, 2000.
 11. Поспелов Г.С. Искусственный интеллект — основа новой информационной технологии. М.: Наука, 1988.
 12. Евменов В.П. Интеллектуальные системы управления. Учеб. пособ. М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. 301 с.
 13. Искусственный интеллект: Справочник. В 3-х кн. Кн. 1: Системы общения и экспертные системы / Под ред. Э.В. Попова. М.: Радио и связь, 1990.
 14. Искусственный интеллект. Справочник. В 3-х кн. Кн. 2: Модели и методы / Под ред. Д.А. Поспелова. М.: Радио и связь, 1990. 304 с.
 15. Искусственный интеллект: Справочник. В 3-х кн. Кн. 3: Программные и аппаратные средства / Под ред. В.А. Захарова, В.Ф. Хорошевского. М.: Радио и связь, 1990.
 16. Тюлин А.Е., Бетанов В.В. Нетрадиционная оценка проблем решения задач навигационно-баллистического обеспечения управления космическими аппаратами // Правовая информатика, 2022, № 1. С. 32–43.
 17. Баллистика и навигация космических аппаратов: Учеб. для вузов, обучающихся по направлению подгот. «Ракетостроение и космонавтика» / Н.М. Иванов, Л.Н. Лысенко. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Дрофа, 2004. 544 с.
 18. Остроух А.В. Введение в искусственный интеллект. Красноярск: Научно-инновационный центр, 2020. 250 с.
 19. Малинин М.Ю. Построение динамических иерархических моделей и инструментальных средств для исследования экономических систем: дисс.... канд. экон. наук: 08.00.13. Волгогр. гос. техн. ун-т. Волгоград, 2007. 18 с.
 20. Гаянова М.М. Информационная поддержка принятия решений при анализе университетских образовательных программ: дисс.... канд. техн. наук: 05.13.10. Уфа, 2006. 143 с.
 21. Козлов А.Н. Интеллектуальные информационные системы: Учеб. Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2013. 278 с.
 22. Чижова И.А. Теоретические основы разработки гибридных экспертных систем для прогноза и оценки рудных месторождений. Автореферат дисс.... доктора геолого-минералогических наук: 25.00.35. Ин-т геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН. Москва, 2010. 50 с.

Дата поступления рукописи
в редакцию 29.03.2023
Дата принятия рукописи
в печать 01.08.2023