

РАЗРАБОТКА КОМПАКТНОГО ВЫСОКОНАДЕЖНОГО МОДУЛЯ ДОЛГОВРЕМЕННОГО ХРАНЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ КОСМИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

А. В. Семенов, К. В. Ануфрейчик, С. Е. Моисеев,
А. В. Никифоров, И. В. Чулков

Представлена разработка компактного высоконадежного модуля долговременного хранения информации космического применения. Обсуждаются особенности современных требований к объему и скорости передачи данных в космосе, связанных с увеличением количества научных экспериментов и данных. Ключевым компонентом устройства является интерфейс SpaceWire, обеспечивающий высокую скорость обмена данными (до 600 Мбит/с при использовании двух интерфейсов одновременно) и гибкую сетевую интеграцию, а также использование отечественной электронно-компонентной базы. Описываются методы повышения надежности, включая «горячее» резервирование, использование кодов коррекции ошибок, «зеркалирование» данных и мониторинг состояния памяти. Гибкая архитектура устройства позволяет адаптировать его под различные требования космических миссий, обеспечивая высокую скорость записи и чтения данных.

Ключевые слова: надежное долговременное хранение, интерфейс SpaceWire, файловая система, помехоустойчивое кодирование.

Введение

Современная космонавтика продолжает демонстрировать значительный рост как в количественном, так и в качественном отношении проводимых научных исследований. Ежегодно осуществляется множество длительных и дорогостоящих экспериментов, в рамках которых формируются значительные объемы научных данных. С ростом числа приборов, работающих на борту космических аппаратов, а также с увеличением интенсивности использования методов фото- и видеосъемки, резко возрастают требования к устройствам хранения данных, используемым в космической среде.

Устройства хранения данных на космических аппаратах бывают интегрированы в состав бортовых вычислительных систем, которые управляют научной аппаратурой. Однако доступные объемы памяти на борту часто ограничены, обычно составляя от единиц до сотен гигабайт. Это представляется недостаточным, учитывая не только длительность космических миссий, порой занимающих десятки лет, но и возможную деградацию памяти на основе флеш-технологий, а также потенциальные сбои в работе оборудования в условиях повышенной радиации. Устройства хранения данных для космического применения можно условно разделить на два типа: системы общего назначения, применяемые для решения задач космического аппарата, и системы специализированного назначения, которые используются для хранения научной информации и управляются научными приборами.

При разработке модуля хранения информации для научной аппаратуры необходимо учитывать уникальные особенности функционирования этих приборов, поскольку их основная задача – обеспе-

чение качественного проведения экспериментов. До недавнего времени большинство научных приборов использовали для передачи данных интерфейс UART или производные от него. Этот интерфейс несмотря на то, что уже технически и морально устарел, до сих пор широко распространен благодаря своей простоте и наличию встроенной поддержки в большинстве микроконтроллеров.

Однако с появлением высокоскоростного интерфейса SpaceWire [1] ситуация начала кардинально меняться. Этот интерфейс, предназначенный для космического применения, поддерживается даже в микроконтроллерах начального уровня и обеспечивает передачу данных со скоростью до 400 Мбит/с. SpaceWire обладает высокой надежностью, низким энергопотреблением и относительно простой реализацией, что делает его универсальным решением для коммуникации между приборами. Существенным преимуществом интерфейса SpaceWire является возможность создания сети из нескольких абонентов с использованием специализированных маршрутизаторов. В такой сети устройство хранения данных может функционировать в роли сетевого накопителя, доступного для записи и чтения другим абонентам.

Анализ открытых источников [2 – 4] показывает, что разработка специализированных модулей хранения данных для космического применения является актуальной задачей, однако количество доступных разработок как в отечественной, так и в зарубежной практике ограничено. В существующих решениях, которые были изучены и проанализированы, для передачи данных на высокой скорости и управления устройством применяются два отдельных интерфейса. Это приводит

к ряду ограничений, таких как увеличение числа подключаемых кабелей, что особенно критично в условиях космического пространства, и усложнению архитектуры за счет необходимости интеграции нескольких интерфейсов в одном устройстве.

Как показано в таблице, на текущий момент объем систем хранения составляет порядка десятка гигабайт, но в будущем есть все возможности для его кратного роста, и при разработке перспективного модуля хранения необходимо исходить из того, что потребность в объеме модуля хранения будет выше на порядок.

Описание

При разработке бортовых систем для космических аппаратов необходимо, чтобы они соответствовали ряду ключевых требований. Важным аспектом является обеспечение надежности, включая устойчивость к экстремальным условиям, таким как перепады температур, радиация и вакуум, а также долговечность и отказоустойчивость. Особое внимание уделяется радиационной стойкости, так как аппараты должны выдерживать воздействие космической радиации и вспышек на солнце, что требует использования радиационно-стойкой элементной базы и применения специализированных алгоритмов обработки и хранения информации. Помимо этого, большую роль играет эффективность энергопотребления и оптимизация массогабаритных характеристик бортовой системы.

Целью нашей разработки было создание высоконадежного, компактного устройства хранения данных, обладающего стандартизированными высокоскоростными интерфейсами, большим объемом энергонезависимой памяти и низким энергопотреблением, что важно для обеспечения долговременной работы на орбите. Ключевым требованием было использование исключительно отечественной элементной базы (за исключением лишь тех компонент, которые отечественной промышленностью не производятся) и стандартов, что позволяют гарантировать надежность работы устройства в условиях космической радиации и иных специальных внешних воздействующих факторов.

В устройстве хранения данных для космического применения можно выделить три ключевых элемента, которые обеспечивают его функциональность и надежность: внешние интерфейсы, физическая реализация и файловая система. Каждый из этих компонентов играет важную роль в общей работе устройства и существенно влияет на его производительность и надежность в условиях космического пространства.

Таблица

Сравнение объема систем хранения научных данных в различных космических аппаратах

Космический аппарат	Объем	Даты
NASA/ESA		
<i>Lunar Reconnaissance Orbiter</i> (NASA)	48 Гбайт	2009 – н. в.
<i>Rosetta</i> (ESA)	3 Гбайт	2004 – 2016
<i>James Webb Space Telescope</i> (NASA/ESA)	68 Гбайт	2021 – н. в.
<i>Sentinel-1</i> (ESA)	175 Гбайт	2014 – н. в.
<i>Perseverance</i> (NASA)	2 Гбайт	2021 – н. в.
Госкорпорация «Роскосмос»		
<i>Trace Gas Orbiter</i> («ЭкзоМарс-2016»)	64 Гбайт	2016 – н. в.
«Луна-25» («Луна-Глоб»)	16 Гбайт	2023 – 2023
«Ионосфера-М» № 1 – 4 («Ионозонд-2025»)	128 Гбайт	2024 – н. в.
«Луна-26», орбитальный аппарат («Луна-Ресурс-1»)	128 Гбайт	
«Луна-27», посадочный аппарат («Луна-Ресурс-1»)	128 Гбайт	

Внешние интерфейсы обеспечивают взаимодействие устройства хранения с другими компонентами космического аппарата, такими как научные приборы и бортовые системы управления. Они определяют скорость и надежность передачи данных, а также способ подключения устройства к бортовой сети космического аппарата, количество и тип кабелей, что в конечном счете сказывается на итоговой массе устройства.

В качестве интерфейса для передачи данных и управления устройством в нашем модуле используется интерфейс *SpaceWire*, реализованный по стандарту *SpaceWire-RUS* [5], что существенно упрощает подключение и управление устройствами в составе космического аппарата.

Физическая реализация устройства хранения данных также имеет решающее значение для его успешной эксплуатации в условиях космического пространства. Компактный и надежный дизайн устройства был одной из ключевых задач разработки.

Модуль хранения представляет собой два полукomплекта, работающих в режиме «горячего» резервирования. Такая архитектура позволяет дублировать все критически важные функции и обеспечивать непрерывную работу в случае отказа одного из компонентов. Общая схема модуля хранения представлена на рисунке.

Основу каждого полукomплекта составляет контроллер памяти с разработанным программным обеспечением, набор микросхем флеш-памяти (модуля памяти), объемом 512 Гбайт, а также один или два интерфейса *SpaceWire* (SPW) в зависимости от конфигурации. Все ключевые компоненты устройства, за исключением

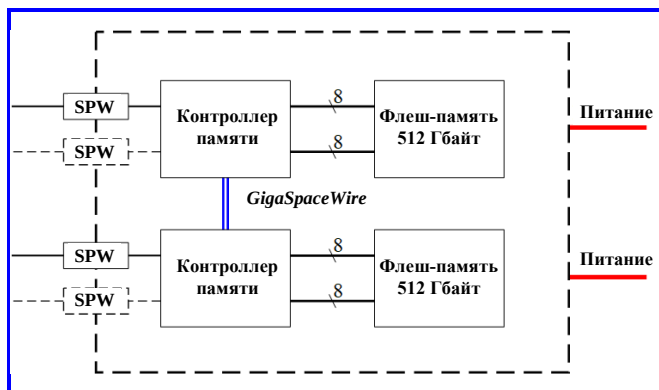


Рисунок. Схема модуля хранения

модулей памяти, выполнены на отечественной компонентной базе, что гарантирует устойчивость к космическому излучению и долгосрочную надежность работы в условиях высоких радиационных нагрузок.

Модуль хранения поддерживает две основные конфигурации: стандартную и высокоскоростную. В стандартной конфигурации устройство обеспечивает общую скорость чтения и записи данных до 300 Мбит/с по одному интерфейсу, при этом используются два порта *SpaceWire* – основной и резервный. В высокоскоростной конфигурации применяется до четырех портов *SpaceWire*, что позволяет организовать параллельную передачу данных с общей скоростью до 600 Мбит/с.

Контроллер памяти подключается к модулю памяти по двум параллельным 8-битным шинам для обеспечения максимальной производительности. Контроллеры памяти основного и резервного полуккомплекта соединены дублированным интерфейсом *GigaSpaceWire*. Этот интерфейс позволяет передавать данные из основного контроллера памяти в резервный модуль памяти, в случае выхода из строя одного из модулей памяти, что дополнительно увеличивает надежность модуля хранения.

Для обеспечения надежности хранения данных в устройстве реализована система кодирования с использованием кода Хэмминга (64, 8), которая позволяет исправлять одну битовую ошибку на 64 байта данных. В будущих версиях устройства планируется переход на более сложные коды коррекции ошибок (*Error correction codes* – ECC), такие как коды Боуза – Чоудхури – Хоквингема (*Bose – Chaudhuri – Hocquenghem* – BCH) [6, 7], которые обеспечат повышенную стойкость к ошибкам.

Таким образом, предлагаемое устройство обладает энергонезависимой памятью объемом 1 Тбайт, от 2 до 4 интерфейсов *SpaceWire* и возможностью выбора конфигурации, обеспечивающей скорость передачи данных до 600 Мбит/с.

Файловая система

В устройстве хранения данных файловая система играет ключевую роль в обеспечении надежно-

го и эффективного доступа к данным. Надежность файловой системы особенно важна для долговременных миссий, где данные должны сохраняться без потери целостности на протяжении длительных периодов.

При создании файловой системы для космических аппаратов необходимо учитывать специфические условия и ограничения, которые делают традиционные решения не всегда подходящими. Основная проблема заключается в ограниченности вычислительных ресурсов. Микропроцессоры, используемые на космических аппаратах, обладают малой вычислительной мощностью и должны быть защищены от радиации, что делает невозможным использование файловых систем, требующих большого количества ресурсов. Например, файловые системы, такие как NTFS, ZFS или EXT [8], несмотря на свои преимущества в защите данных, не подходят для применения в космосе из-за высокой нагрузки на процессор и потребления энергии. Сложные структуры метаданных, которые используются в NTFS, например, для поддержания журнала транзакций и безопасности данных, потребляют значительные ресурсы, что делает их неподходящими для таких условий.

Кроме того, в условиях космоса повышенные требования предъявляются к надежности хранения данных. Радиационное воздействие и физические факторы могут привести к повреждению данных, поэтому необходимо внедрять специальные механизмы для их защиты. Одним из таких механизмов являются ECC, например, коды Хэмминга, которые способны исправлять ошибки в данных и обеспечивать их целостность. Однако стандартные решения, такие как FAT, не предоставляют адекватного уровня защиты, а их алгоритмы восстановления данных недостаточно эффективны для работы в экстремальных условиях космоса.

Использование флеш-памяти в космических системах также требует специальных подходов. Флеш-память склонна к износу, и необходимо эффективно распределять нагрузку на ячейки памяти, контролировать состояние блоков и управлять возникающими дефектами. Таких механизмов в традиционных «настольных» файловых системах нет. Обычно за это отвечает отдельный контроллер флеш-памяти – он абстрагирует физическое распределение данных. Специально разработанная файловая система может предложить решения, которые позволят продлить срок службы памяти, управляя дефектными блоками и реализуя продвинутые алгоритмы мониторинга состояния флеш-памяти (*wear leveling*).

Также космические миссии часто требуют высокой скорости записи данных, особенно для науч-

ных экспериментов, которые могут генерировать большие объемы информации за короткие промежутки времени. Здесь стандартные файловые системы могут не удовлетворять требованиям по скорости и надежности доступа к данным. К примеру, файловые системы NTFS и FAT склонны к дефрагментации, что сильно снижает скорость чтения и записи данных. Поэтому разработка специализированной файловой системы, адаптированной под особенности космической миссии, учитывающей ограниченность ресурсов контроллеров космического назначения, позволяет достичь более высокой производительности и надежности при минимальных потерях.

В нашем устройстве реализована файловая система, поддерживающая ЕСС, возможность гибкого резервирования и сканирования данных на наличие ошибок. Все эти механизмы направлены на то, чтобы обнаруживать и исправлять ошибки, возникшие под воздействием космической радиации, а также минимизировать риск потери информации в случае сбоя одного из элементов устройства.

Архитектура надежности файловой системы состоит из следующих пунктов:

- *Использование кодов коррекции ошибок.*

Как уже говорилось, для обеспечения целостности данных в системе применяется код Хэмминга, что гарантирует базовую защиту от радиационно-индуцированных сбоев, возникающих в процессе хранения данных в энергонезависимой памяти.

- *Резервирование данных (RAID0 и RAID1).*

Файловая система поддерживает возможность «зеркалирования» данных (аналог RAID1 в системах хранения) между двумя полукompлектами модуля, работающими в горячем резерве. Это означает, что критически важные данные могут одновременно записываться на два независимых комплекта памяти, что исключает потерю информации в случае выхода из строя одного из полукompлектов. В этом режиме за счет повышения надежности хранения данных естественным образом увеличивается нагрузка (снижается ресурс) на микросхемы флеш-памяти. Но это может быть обосновано для особенно важных данных.

Дополнительно поддерживается возможность использования технологии RAID0, которая позволяет разбивать данные по нескольким комплектам памяти для повышения скорости записи и чтения.

- *Мониторинг состояния памяти (wear leveling).*

Важной частью надежного хранения данных является механизм мониторинга состояния блоков памяти и равномерного распределения нагрузки на них (wear leveling). Это предотвращает преждевременный выход из строя отдельных блоков памяти из-за неравномерной записи данных. Файло-

вая система ведет статистику использования блоков и автоматически исключает блоки, которые показывают признаки сбоя, из процесса записи.

- *Периодическая проверка целостности данных.*

Файловая система имеет возможность автоматической проверки целостности данных, хранящихся в резервированных блоках. Это позволяет заранее обнаруживать и устранять ошибки, прежде чем они повлияют на критические данные. Проверка целостности данных осуществляется путем периодического сканирования «зеркальных» данных и их сравнения между двумя полукompлектами.

- *Обнаружение и блокировка сбойных блоков.*

Если в ходе эксплуатации флеш-памяти выявляются блоки, в которые запись невозможна (сбойные блоки), файловая система исключает их из использования и динамически переназначает области для хранения данных, таким образом избегая потери информации.

- *Механизм защиты от несанкционированного доступа.*

Для предотвращения несанкционированного или случайного доступа к данным, файловая система поддерживает разграничение прав доступа. Каждому абоненту системы присваивается определенная роль: управляющий, записывающий или читающий данные. Управляющие абоненты могут выполнять низкоуровневые команды управления файловой системой, абоненты записи имеют доступ только к операциям записи, а абоненты чтения могут только считывать данные, без возможности модификации или удаления.

Файловая система поддерживает несколько категорий команд для управления данными:

1. Команды управления файловой системой.

Эти команды позволяют абонентам с правами управления выполнять низкоуровневые операции:

«Создание файла» – инициализация нового файла с указанием начального и конечного блоков для записи данных.

«Удаление файла» – удаление файла с освобождением соответствующих блоков памяти.

«Копирование файла» – создание дубликатов файлов как в пределах одного полукompлекта, так и между двумя резервными модулями.

«Перемещение файла» – перенос данных из одного участка памяти в другой, что может быть полезно для оптимизации использования блоков или резервирования.

«Очистка файлов» – полное стирание данных в выбранных файлах или на всей файловой системе.

2. Команды записи и чтения данных.

Эти команды предоставляют доступ к основным операциям работы с данными:

«Запись данных» – запись информации в указанный файл с проверкой целостности на уровне кодов Хэмминга.

«Чтение данных» – считывание данных из одного или нескольких выбранных файлов, с возможностью автоматического восстановления информации при обнаружении исправимых ошибок.

3. Команды проверки целостности.

«Проверка целостности данных» – команда инициирует проверку состояния данных на уровне блоков памяти, а также сверку данных в «зеркальных» копиях.

«Проверка износа блоков» – команда позволяет провести аудит состояния блоков памяти, чтобы оценить, какие из них находятся на грани сбоя.

4. Команды обновления и восстановления данных.

«Обновление прошивки» – возможность обновления программного обеспечения файловой системы, что позволяет в будущем улучшать её функции, такие как защита от ошибок и оптимизация работы с памятью.

«Восстановление данных» – команда, используемая для восстановления данных при наличии резервных копий или на уровне блоков памяти.

Заключение

Предложенное решение по разработке компактного высоконадежного модуля долговременного хранения данных для космического применения обладает уникальными особенностями как в аппаратной, так и в программной реализации. Применение стандартизированного интерфейса *SpaceWire*, сертифицированного для космических миссий, а также использование отечественной компонентной базы является одним из ключевых преимуществ устройства. Интерфейс *SpaceWire* обеспечивает высокую скорость передачи данных при минимальных затратах энергии и позволяет интегрировать устройство в сложные сети с несколькими абонентами, что значительно упрощает взаимодействие между научной аппаратурой и системами управления. Возможность использования специализированных роутеров и разделение каналов на основной и резервный обеспечивают высокую надежность и устойчивость сети.

Отличительная особенность решения также заключается в гибкой архитектуре модуля, поддерживающего различные конфигурации в зависимости от требований конкретной космической миссии. Устройство может работать как в стандартной конфигурации с максимальной скоростью до 300 Мбит/с, так и в высокоскоростной конфигурации с возможностью передачи данных до 600 Мбит/с. Это позволяет адаптировать модуль хранения под задачи небольших космиче-

ских экспериментов, с малой информативностью, так и для больших исследовательских миссий, с десятками научных приборов и высокими скоростями обмена.

Программная часть устройства включает в себя файловую систему, обеспечивающую защиту данных на основе ECC, что гарантирует целостность информации даже в условиях воздействия космической радиации. Функции резервирования данных (RAID0, RAID1), мониторинг износа блоков памяти и возможность автоматической проверки целостности данных добавляют надежности к решению, обеспечивая долговременное сохранение критически важных данных.

Кроме того, в будущих разработках планируется использовать более современные контроллеры флеш-памяти с увеличенной скоростью работы, что обеспечит еще более быструю передачу данных и возможность применения интерфейсов со скоростями от 1 Гбит/с. Для повышения устойчивости к ошибкам в будущих версиях устройства будут применяться более совершенные алгоритмы коррекции ошибок, такие как коды BCH. Эти усовершенствования позволят значительно повысить надежность и производительность модуля хранения.

В целом, устройство сочетает в себе гибкость, компактность, высокую производительность и надежность, что делает его оптимальным решением для длительных космических миссий, требующих надежного хранения и передачи данных.

Литература

1. SpaceWire [обзор технологии SpaceWire] / MiT. Научно-производственный центр «Микропроцессорные Технологии» : [сайт]. – URL : <https://spacewire.ru/spacewire>.
2. Lunar Reconnaissance Orbiter Mission Overview / NASA : [website]. – 2020. – URL : <https://science.nasa.gov/mission/lro/>.
3. Sentinel-1 Mission Data Handbook / European Space Agency : [website]. – 2020. – URL : <https://sentinel.esa.int>.
4. James Webb Space Telescope Team. JWST Data Storage and Transmission System / NASA : [website]. – 2021. – URL : <https://jwst.nasa.gov>.
5. ГОСТ Р 70020-2022. Космическая техника. Интерфейсы и протоколы высокоскоростного межприборного информационного обмена и комплексирования бортовых систем космических аппаратов. SPACEWIRE-RUS : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 17 февраля 2022 г. № 80-ст : введен впервые : дата введения 2022-06-01 / разработан Акционерным обществом «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (АО «ЦНИИмаш»). – Москва : Российский институт стандартизации, 2022. – 110 [2] с.
6. Трифонов, П. В. Основы помехоустойчивого кодирования : учебное пособие / П. В. Трифонов. – Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2022. – 231 с.
7. Nabipour, S. Enhancing Data Storage Reliability and Error Correction in Multilevel NOR and NAND Flash Memories

through Optimal Design of BCH Codes / S. Nabipour, J. Javidan. – DOI : 10.2139/ssrn.4627833 // SSRN. – 2023. – URL : <https://ssrn.com/abstract=4627833>.

8. Некоторые направления развития файловых систем / Хабр : [сайт]. – 2006 – 2025. – URL : <https://habr.com/ru/companies/mws/articles/276295/>.

Поступила в редакцию 10.02.2025

Александр Викторович Семенов, начальник лаборатории, т. 8 (495) 333-11-56, e-mail: asemenov@cosmos.ru.
Константин Владимирович Ануфрейчик, начальник лаборатории, т. 8 (495) 333-45-78, e-mail: kos@cosmos.ru.
Станислав Евгеньевич Моисеев, программист лаборатории, т. 8 (495) 333-11-56, e-mail: stanislav-moiseev@mail.ru.

Андрей Владимирович Никифоров, ведущий инженер, т. 8 (495) 333-11-56, e-mail: nikiforov@cosmos.ru.
Илья Владиленович Чулков, заместитель директора по приборостроению, т. 8 (495) 333-11-44, e-mail: chulkov@cosmos.ru.
 (Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт космических исследований Российской академии наук (ИКИ РАН)).

DEVELOPMENT OF A COMPACT, HIGHLY RELIABLE LONG-TERM STORAGE MODULE FOR SPACE APPLICATIONS

**A. V. Semenov, K. V. Anufreychik, S. E. Moiseev,
A. V. Nikiforov, I. V. Chulkov**

The article presents the development of a compact, highly reliable long-term data storage module for space applications. The features of modern requirements for the volume and speed of data transfer in space, associated with the increase in the number of scientific experiments and data, are discussed. The key component of the device is the SpaceWire interface, which provides a high data exchange rate (up to 600 Mbit/s when using two interfaces simultaneously) and flexible network integration, as well as the use of a Russian component base. Methods for increasing reliability are described, including hot backup, the use of error correction codes, data mirroring and memory status monitoring. The flexible architecture of the device allows it to be adapted to various space mission requirements, providing high data writing and reading speeds.

Key words: reliable long-term storage, spacewire interface, file system, error-correcting coding.

References

1. SpaceWire [technology overview SpaceWire] / MiT. Research and Production Center «Microprocessor Technologies» : [website]. – URL : <https://spacewire.ru/spacewire>.
2. Lunar Reconnaissance Orbiter Mission Overview / NASA : [website]. – 2020. – URL : <https://science.nasa.gov/mission/lro/>.
3. Sentinel-1 Mission Data Handbook / European Space Agency : [website]. – 2020. – URL : <https://sentinel.esa.int>.
4. James Webb Space Telescope Team. JWST Data Storage and Transmission System / NASA : [website]. – 2021. – URL : <https://jwst.nasa.gov>.
5. GOST R 70020-2022. Space products. Interfaces and protocols of high-speed interunit information exchange and integration of spacecrafts onboard systems. SpaceWire-RUS : national standard of the Russian Federation : official publication : approved and put into effect by Order of the Federal Agency for Technical Regulation and Metrology dated February 17, 2022 № 80-st : introduced for the first time : date of introduction 2022-06-01 / developed by a Joint Stock Company «Central Research Institute for Machine Building» (JSC «TsNIIMash»). – Moscow : Russian Standardization Institute, 2022. – 110 [2] c.
6. Trifonov, P. V. Basics of noise-resistant coding: tutorial / P. V. Trifonov. – Saint Petersburg : ITMO UNIVERSITY, 2022. – 231 c.
7. Nabipour, S. Enhancing Data Storage Reliability and Error Correction in Multilevel NOR and NAND Flash Memories through Optimal Design of BCH Codes / S. Nabipour, J. Javidan. – DOI : 10.2139/ssrn.4627833 // SSRN. – 2023. – URL : <https://ssrn.com/abstract=4627833>.
8. Some directions of development of file systems / Habr : [website]. – 2006 – 2025. – URL : <https://habr.com/ru/companies/mws/articles/276295/>.

Aleksandr Viktorovich Semenov, head of laboratory, t. 8 (495) 333-11-56, e-mail: asemenov@cosmos.ru.
Konstantin Vladimirovich Anufreychik, head of laboratory, t. 8 (495) 333-45-78, e-mail: kos@cosmos.ru.
Stanislav Evgen'evich Moiseev, laboratory programmer, t. 8 (495) 333-11-56, e-mail: stanislav-moiseev@mail.ru.
Andrey Vladimirovich Nikiforov, lead engineer, t. 8 (495) 333-11-56, e-mail: nikiforov@cosmos.ru.
Il'ya Vladilenovich Chulkov, deputy director for instrumentation, t. 8 (495) 333-11-44, e-mail: chulkov@cosmos.ru.
 (Space Research Institute (IKI)).