

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ  
«КОСМИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА,  
ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩИЕ  
И ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ»

ИМ. А.Г. ИОСИФЬЯНА»  
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ»)



## ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКИ. ТРУДЫ ВНИИЭМ

### Главный редактор:

генеральный директор,  
д. т. н. Л. А. МАКРИДЕНКО

### Редакционная коллегия:

д. т. н. **В. П. Верещагин**,  
д. т. н. **С. Н. Волков**,  
д. т. н. **В. Я. Геча**  
(зам. главного редактора),  
к. т. н. **А. В. Горбунов**,  
к. ф.-м. н. **Т. Б. Дуйшеналиев**  
(Киргизская Республика),  
д. т. н. **А. Б. Захаренко**,  
к. ф.-м. н. **С. А. Золотой**  
(Республика Беларусь),  
д. т. н. **С. Г. Казанцев**,  
д. т. н. **Н. Д. Карачун**,  
д. т. н. **И. В. Минаев**,  
д. т. н. **М. Р. Нургузин**  
(Республика Казахстан),  
к. в. н. **А. В. Пинчук**,  
д. т. н. **А. П. Сарычев**,  
д. ф.-м. н. **А. П. Тютнев**,  
д. т. н. **А. Ю. Федотов**,  
д. т. н. **В. П. Ходненко**,  
**О. А. Чунихина**  
(отв. секретарь редколлегии)

### Ответственный редактор:

д. т. н. **В. Я. Геча**

ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА 2019 ГОД

## МАТЕРИАЛЫ

Седьмой международной  
научно-технической конференции

АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ  
СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ  
СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО  
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ



МОСКВА 2019

## **ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ**

### **Председатель Оргкомитета**

Л. А. Макриденко – генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

### **Сопредседатели Оргкомитета**

М. Н. Хайлов – заместитель генерального директора  
Госкорпорации «Роскосмос»

А. А. Петрукович – директор ИКИ РАН

Н. Н. Севастьянов – и. о. генерального директора ФГУП ЦНИИмаш

М. Свитинг – генеральный директор SSTL

М. Е. Яковенко – руководитель Росгидромета

П. А. Витязь – руководитель аппарата НАН Беларуси

Е. М. Нургалиев – президент АО «НК «Қазақстан Гарыш Сапары»

### **Оргкомитет**

С. Н. Волков – первый заместитель генерального директора  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

М. В. Новиков – главный конструктор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

В. В. Валько – заместитель генерального директора  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

А. В. Пинчук – ученый секретарь АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

П. А. Солопов – главный инженер АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

И. Ю. Ильина – руководитель пресс-службы АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

Н. Ю. Филькова – специалист по НТИ АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
секретарь конференции

### **Программный комитет**

Л. А. Макриденко – генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

С. А. Золотой – директор УП «Геоинформационные системы» НАН Беларуси

В. В. Хартов – генеральный конструктор по автоматическим аппаратам  
и комплексам, заместитель генерального директора – начальник центра  
системного проектирования ФГУП ЦНИИмаш

Д. А. Баранов – генеральный директор АО «РКЦ «Прогресс»

В. В. Асмус – директор ФГБУ «НИЦ «Планета»

Ю. А. Рой – генеральный директор АО «НПК «СПП»

А. В. Горбунов – заместитель генерального директора  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

В. Я. Геча – заместитель генерального директора  
АО «Корпорация «ВНИИЭМ»

В. А. Колмыков – генеральный директор АО «НПО Лавочкина»

## СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
Методы построения распределенных систем хранения данных для обеспечения функционирования информационных систем космического мониторинга МЧС России для обеспечения принятия управленческих решений <b>Я. В. Алексеенко</b>	6
Проблемы, методы и результаты системного космо-картографического мониторинга арктической зоны Российской Федерации в контексте создания национального атласа Арктики <b>С. К. Белоусов, С. С. Карпухин, Ю. И. Носенко</b>	20
Мониторинг солнечной активности и повышение точности гелиофизического прогноза при наблюдении Солнца космическими средствами из точки Лагранжа $L_5$ <b>С. А. Богачев, А. В. Карелин, С. В. Кузин, В. А. Шувалов, А. А. Яковлев</b>	35
Разработка фоточувствительных КМОП для специализированных систем <b>Г. И. Вишневский, М. В. Четвергов, М. Г. Выдревич, А. Г. Попов, В. С. Лобанов</b>	52
Перспективы создания гравиинерциальной и гравиградиентометрической аппаратуры для космической системы глобального геодезического мониторинга <b>В. В. Дубовской, В. И. Леонтьев, И. А. Боев, В. Г. Жильников, В. Г. Пшеняник</b>	59
Анализ эффективности применения блочно-субполосного алгоритма сжатия в задачах дистанционного зондирования Земли <b>А. А. Дудкин, Д. Ю. Перцев</b>	66
Технология управления живучестью МКА ДЗЗ путем конфигурирования его бортовых систем с использованием бортового функционального модуля <b>Ю. В. Зайченко, А. Н. Черный, В. Г. Поспелов</b>	75
Комплексные исследования межгеосферных связей наземными и космическими средствами <b>С. А. Пулинец, Л. А. Ведешин</b>	86

Стратифицированный телемониторинг в территориально рассредоточенных климатических камерах <b>А. П. Сарычев, Ю. Н. Черкасов, А. В. Рогоза</b>	95
Структурный анализ систем электроснабжения космических аппаратов дистанционного зондирования Земли <b>М. С. Шевцов</b>	107

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) из космоса является перспективным направлением, приносящим существенный экономический выигрыш. Высокая эффективность использования наблюдений из космоса определяется в основном комплексностью решаемых проблем.

Развитие этого направления, связанного с оперативным получением необходимой информации, требует решения технически сложных задач как на борту космического аппарата (КА), так и на Земле в пунктах приема и обработки получаемой информации.

В России задачи дистанционного зондирования Земли отнесены к числу важнейших приоритетных задач космической техники, направленных на решение основных проблем гидрометеорологии, океанологии, геологии, экологии водного и воздушного бассейнов.

Сами КА ДЗЗ должны обладать целым рядом особенностей структуры и конструкции. Иметь, прежде всего, высокую точность ориентации в орбитальной системе координат и стабилизации собственных угловых скоростей движения КА вокруг центра масс. КА ДЗЗ должен обладать высокой надежностью и «живучестью» практически в автономном режиме в отсутствии информационных связей с наземными комплексами управления. Естественно, что последнее требование напрямую связано как с обеспечением высокой надежности бортовой аппаратуры, так и с использованием эффективных автоматических бортовых систем контроля и управления КА.

В мировой космической технике многоцелевые КА дистанционного зондирования считаются наиболее сложными аппаратами.

Результаты дистанционного зондирования играют важную роль для социально-экономического развития всех стран, поэтому наша работа, как и тема нынешней конференции, действительно является актуальной и крайне важной, все больше аспектов нашей жизни непосредственно зависят от наблюдений Земли из космоса.

В целом по отрасли к 2020 г. планируется иметь на орбите двадцать семь действующих космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, а также наращивать группировки радиолокационных спутников, что особенно важно для России, около одной трети территории которой постоянно закрыто облаками.

В связи с этим тема нынешней международной конференции, которая проводится в 2019 году в седьмой раз, является актуальной и крайне важной на сегодняшний день для космической сферы деятельности и для всей страны в целом.

*Генеральный директор АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
доктор технических наук Л. А. Макриденко*

## МЕТОДЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ СИСТЕМ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ КОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА МЧС РОССИИ ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ПРИНЯТИЯ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

**Я. В. Алексеенко**

*Федеральное казенное учреждение  
«Национальный центр управления в кризисных ситуациях»  
МЧС России, г. Москва,  
Санкт-Петербургский университет  
государственной противопожарной службы МЧС России,  
г. Санкт-Петербург*

**Аннотация.** В последнее время наблюдается активное применение данных дистанционного зондирования Земли для решения различных тематических задач. Использование данных ДЗЗ позволяет оперативно получать достоверную информацию о различных объектах и явлениях на обширной территории. Современные информационные технологии позволяют повысить оперативность и качество получения, обработки, хранения и передачи данных ДЗЗ и тематических продуктов, созданных на их основе. В МЧС России данные ДЗЗ активно применяются с 1997 г. для решения задач по прогнозированию и мониторингу чрезвычайных ситуаций. Для эффективного применения данных ДЗЗ для решения различных тематических задач применяются различные модели и методы функционирования информационных систем космического мониторинга (ИСКМ). Анализ показал, что им присущи следующие недостатки: обеспечение гарантированного хранения данных; обеспечение оперативной обработки данных; проведение масштабирования аппаратной составляющей с минимальными простоями ИСКМ; время разработки программного обеспечения для параллельной обработки данных; реализация восстановления задания обработки данных при сбоях; высокая стоимость аппаратной составляющей ИСКМ; высокие расходы времени на передачу данных между элементами ИСКМ. В данной работе автор предлагает методы построения распределенных систем хранения данных для обеспечения функционирования информационных систем космического мониторинга МЧС России для обеспечения принятия управленческих решений. Предлагаемые методы основаны на применении распределенной файловой системы, которая позволяет не только обеспечить эффективное хранение, но и являются инфраструктурой для построения распределенных вычислений.

**Ключевые слова:** система космического мониторинга МЧС России, распределенное хранение данных, надежность хранения данных, мониторинг чрезвычайных ситуаций, хранение данных, передача данных, МЧС России, НЦУКС.

## **Введение**

В МЧС России с 1997 г. активно применяются данные ДЗЗ. Для эффективного использования данных ДЗЗ и тематических продуктов, созданных на их основе, в МЧС России создана и активно применяется для прогнозирования и мониторинга чрезвычайных ситуаций Система космического мониторинга чрезвычайных ситуаций (СКМ ЧС) [1]. В настоящее время СКМ ЧС состоит из 4 центров, расположенных в городах Москва, Вологда, Красноярск и Владивосток. Также СКМ ЧС активно получает данные, передаваемые от Государственной корпорации «Роскосмос», а также из открытых источников информации. Ввиду увеличивающегося объема получаемых данных ежедневно, а также необходимостью хранения полученных данных требуется решение проблем с эффективным хранением данных, а также обработкой. Учитывая задачи, возложенные на МЧС России, необходимо обеспечить максимальную оперативность получения данных о прогнозируемой или возникшей чрезвычайной ситуации или опасном явлении [2 – 4].

Таким образом, необходимо решение следующих проблем, в аспекте хранения данных:

- обеспечение гарантированного хранения данных;
- проведение масштабирования аппаратной составляющей с минимальными простоями СКМ ЧС;
- высокая стоимость аппаратной составляющей СКМ ЧС.

Для решения вышеуказанных проблем автор предлагает использовать для хранения данных в СКМ ЧС распределенные системы хранения данных. На основе анализа проведенных исследований в данной области в Российской Федерации и зарубежными исследователями автор предлагает методы построения распределенных систем хранения данных, обеспечивающих функционирование информационных систем космического мониторинга МЧС России в аспекте обеспечения принятия управленческих решений при прогнозировании и ликвидации чрезвычайных ситуаций.

## **Общее описание**

Для обеспечения функционирования и выполнения возложенных задач в СКМ ЧС используются различные информационные источники. Схема информационного обеспечения СКМ ЧС представлена на рис. 1.

Ежегодно увеличивается не только количество космических аппаратов, но, что немаловажно, качество получаемых данных ДЗЗ. Учитывая необходимость хранить уже полученные данные для проведения ретроспективного анализа, существует проблема взрывного роста данных ДЗЗ [5 – 7]. Для обеспечения хранения данных применяются сервера хранения данных (СХД). Для обеспечения надежности хранения данных применяются избыточные массивы независимых дисков (ИМНД). ИМНД требуют создания избыточности при построении систем хранения данных. Увеличение количества устройств хранения данных (УХД) в ИМНД приводит к росту вероятности выхода из строя УХД. При функционировании ИМНД возможны ситуации, когда они не могут обеспечить сохранность данных. Общие характеристики ИМНД, применяемые в СКМ ЧС, представлены в табл. 1.



**Рис. 1. Информационные источники СКМ ЧС**

Для повышения эффективности в ИМНД реализованы функции «горячей» замены вышедшего из строя УХД, «горячий» резервный УХД (в случае выхода из строя УХД в ИМНД он становится вместо него), проверка на стабильность. Однако ИМНД имеют ряд недостатков:

**1. Коррелированные сбои.**

При создании ИМНД зачастую применяются УХД из одной партии производства и имеют одинаковое количество часов наработки, а также одинаковое воздействие со стороны окружающей среды. Ввиду того, что большая часть отказов УХД происходят из-за механических повреждений, сбои УХД в ИМНД статистически коррелированы. При выполнении восстановления ИМНД возможен выход из строя критического УХД в этом ИМНД, что приведет к выходу из строя всего ИМНД и полной потери данных.

**2. Невосстановимые ошибки чтения при восстановлении.**

Одним из важных параметров любого хранилища данных, в том числе и УХД, является обеспечение надежности хранения данных (в том числе и безошибочного чтения данных). Любое УХД имеет определенную вероятность допуска ошибок чтения данных. Обычно этот параметр указывают как отношение ошибок чтения к числу прочитанных бит данных. Таким образом, существует большая вероятность возникновения этих ошибок при восстановлении ИМНД.



Таблица 1

## Характеристики ИМНД

Уровень	Колич. УХД	Эфф. емкость*	Допустимое кол. вышедших из строя УХД	Надежность	Скорость чтения	Скорость записи	Примечание
0	От 2	$S*N$	Нет	Очень низкая	Высокая	Высокая	Полная потеря данных при выходе из строя любого из УХД
1	От 2	$S$	$N - 1$ диск	Высокая	Высокая	Средняя	$N$ -я стоимость дискового пространства
10	От 4, четное	$S*N/2$	От 1 до $N/2$ дисков**	Средняя	Высокая	Высокая	Двойная стоимость дискового пространства
5	От 3	$S*(N - 1)$	1 диск	Средняя	Высокая	Средняя	
50	От 6, четное	$S*(N - 2)$	От 1 до 2 дисков***	Средняя	Высокая	Высокая	
51	От 6, четное	$S*(N - 2)/2$	От 2 до $N/2 + 1$ дисков****	Высокая	Высокая	Низкая	Двойная стоимость дискового пространства
6	От 4	$S*(N - 2)$	2 диска	Высокая	Высокая	Низкая или средняя*	*Скорость записи в зависимости от реализации
60	От 8, четное	$S*(N - 4)$	От 2 до 4 дисков***	Средняя	Высокая	Средняя	
61	От 8, четное	$S*(N - 2)/2$	От 4 до $N/2 + 2$ дисков****	Высокая	Высокая	Низкая	Двойная стоимость дискового пространства

Примечание:

\*  $N$  – количество дисков в ИМНД;  $S$  – объем наименьшего УХД.

\*\* Данные не будут потеряны в случае выхода из строя УХД в пределах разных «зеркал».

\*\*\* Данные не будут потеряны при выходе из строя одинакового количества УХД в разных «страйпах».

\*\*\*\* Данные не будут потеряны в случае выхода из строя УХД в пределах одного «зеркала».

\*\*\*\*\* Данные будут потеряны в случае одновременного выхода из строя любых двух соседних УХД либо первого с последним, в противном случае – данные не будут потеряны.

Особенно подвержены подобной ситуации ИМНД уровня 5, так как ошибки чтения влияют не только на сектор, в котором они происходят, но и на блоки, которые восстанавливаются и используют этот сектор для вычисления кода четности. Такая ситуация приводит к полному сбою восстановления ИМНД.

### 3. Долгое время восстановления при сбоях.

Развитие УХД привело к быстрому увеличению их объема, однако скорость чтения, записи и передачи УХД значительно не увеличилась. Таким образом, использование в ИМНД УХД с большим объемом приводит к длительному времени восстановления данных с них при сбоях. Помимо проблемы повторного сбоя УХД при восстановлении ИМНД, описанной выше, существует проблема резкого деградирования скорости чтения и записи восстанавливаемого ИМНД.

### 4. Атомность.

При прерывании операции записи, вызванной сбоем либо прерыванием операции записи, может возникнуть ситуация несовместимости кода четности с данными. Это связано с неатомичностью непосредственного процесса записи данных. Ввиду того, что код четности не соответствует данным – невозможно выполнить восстановление данных при сбоях в ИМНД.

Несмотря на данные проблемы, ИМНД применяют для обеспечения сохранности данных. Для этого применяют резервные УХД, осуществляют постоянный контроль за состоянием ИМНД и другие технические и организационные мероприятия [8 – 9].

Таким образом, можно выделить основные проблемы при функционировании СКМ ЧС, рассматриваемые в аспекте реализации процесса хранения данных:

- обеспечение гарантированного хранения данных;
- проведение масштабирования аппаратной составляющей с минимальными простоями ИСКМ;
- высокая стоимость аппаратной составляющей ИСКМ.

Для решения данных проблем автором предлагается применять в СКМ ЧС распределенную файловую систему (РФС).

## **Методы распределенного хранения данных**

Анализ организации хранения данных в различных информационных системах [10 – 20] с учетом задач СКМ ЧС показал необходимость применения РФС в СКМ ЧС. РФС имеет следующие особенности:

- функционирует на кластере серверов;
- для пользователя представляет собой «один большой диск»;
- функционирует поверх файловой системы операционной системы сервера;
- обеспечивает устойчивость к ошибкам при выходе из строя УХД или УзХД;
- применяются обыкновенные аппаратные средства;
- подходит для хранения большого количества файлов с большим объемом;

- реализован паттерн «один раз записал/много раз прочитал»;
- чтение файла производится последовательно для увеличения скорости чтения.

РФС может являться основой функционирования всей СКМ ЧС в аспекте реализации процессов хранения данных ДЗЗ.

Емкость УХД выросла экспоненциально, в отличие от скорости чтения. К примеру, в 1990 г. емкость УХД составляла 1400 Мб, скорость чтения – 4,5 Мб/с (т. е. время чтения всего УХД займет около 5 мин). В 2010 г. средняя емкость составляет 1 Тб, скорость чтения – 100 Мб/с, таким образом, чтение всего объема данных УХД займет порядка 3 часов. При использовании РФС, состоящей из 100 УХД чтение 1 Тб данных займет около 2 мин.

Функционирование РФС обеспечивается несколькими процессами, запущенными на серверах кластера: процессом управления РФС и его реплика, а также процессами узлов хранения данных. Данные процессы будем называть демонами РФС. Демоны РФС – это автономно запущенные процессы на соответствующем узле РФС и выполняющие конкретную задачу по обеспечению функционирования РФС. На рис. 2 представлена архитектура РФС СКМ ЧС.

Для обеспечения функционирования РФС реализованы 3 вида демонов РФС: основной управляющий узел (ОУУ), запасной управляющий узел (ЗУУ) и узел хранения данных (УзХД). ОУУ и ЗУУ в целях обеспечения надежности функционирования РФС запущены на разных физических аппаратных средствах. УзХД на каждом сервере кластера. В РФС взаимодействие организовано между ОУУ (или ЗУУ, в случае выхода из строя ОУУ) с УзХД, а взаимодействия между УзХД нет.

Рассмотрим задачи, которые выполняют каждый из демонов РФС. ОУУ является основным элементом РФС и выполняет главную роль по обеспечению функционирования РФС. ОУУ запускается на отдельном сервере и отвечает за файловое пространство, мета-информацию, расположение блоков файлов. Он не хранит в себе сами файлы, он хранит дерево файловой системы.

Вся информация о файлах хранится в оперативной памяти ОУУ. Это необходимо для повышения эффективности функционирования РФС. В случае выхода из строя ОУУ РФС перестает функционировать. Таким образом, сервер ОУУ должен быть надежен.

Помимо надежности самого ОУУ, для обеспечения бесперебойного функционирования РФС, необходимо реализовать ЗУУ. В штатном режиме за функционирование РФС отвечает ОУУ, ЗУУ проводит периодический опрос ОУУ на наличие новой информации о файлах в РФС. При появлении новых данных он копирует ее к себе. ОУУ и ЗУУ функционирует в режиме репликации, в которой ОУУ является ведущим сервером, а ЗУУ – ведомым.

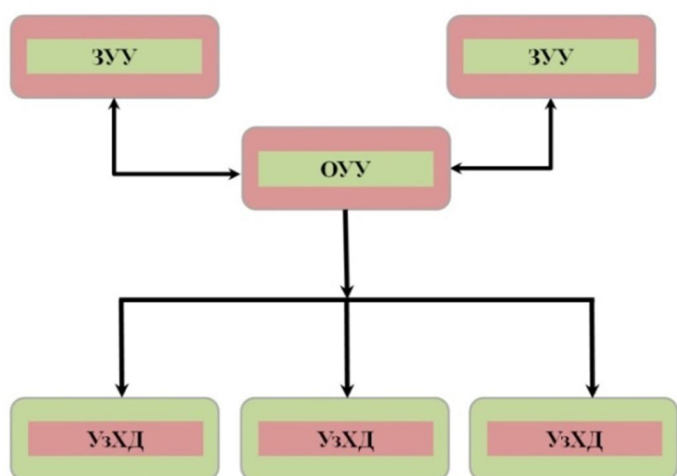


Рис. 2. Схема архитектуры РФС

УзХД отвечает непосредственно за хранение данных РФС. Он периодически отправляет ОУУ служебную информацию о том, что он активен и какие данные хранит. УзХД взаимодействует только с ОУУ.

Рассмотрим, как реализован непосредственно процесс хранения файлов в РФС. Каждый файл в РФС состоит из блоков, таким образом, блок – это единица хранения данных в РФС. Каждый файл, поступающий на запись в РФС, разбивается на блоки одинакового размера (за исключением последнего). Размер блока обычно равен 64 Мб, 128 Мб или больше. После этого все блоки записываются на УзХД с определенным коэффициентом репликации (по умолчанию он равен 3). Коэффициент репликации может выбираться в зависимости от важности того или иного файла. Репликация блоков необходима для обеспечения гарантированного хранения данных в случае выхода из строя УХД или УзХД. Помимо этого репликация позволяет обеспечить высокую скорость доступа к данным, так как реплики каждого блока хранятся на разных УзХД и при необходимости чтения одного файла разными процессами обеспечивается параллельное чтение этого файла. При этом процессы никак не конкурируют между собой. После записи блоков в УзХД информация о блоках передается ОУУ. На рис. 3 проиллюстрирован пример реализации процесса хранения файла в РФС.

Имеем некоторый файл, который был разбит на 2 блока. Информация об этом хранится в ОУУ. Каждый блок реплицирован с коэффициентом репликации, равным 3. При этом блоки распределяются так, чтобы их реплики находились не только на разных УзХД, но и в разных серверных стойках. Такой подход позволяет повысить надежность хранения данных при выходе из строя не только УХД или УзХД, но непосредственно самой серверной стойки. При выходе из строя одного из УзХД, хранящий необходимый блок (реплику), всегда можно взять другую реплику нужного блока (либо из УзХД в той же стойке, либо из УзХД другой стойки).

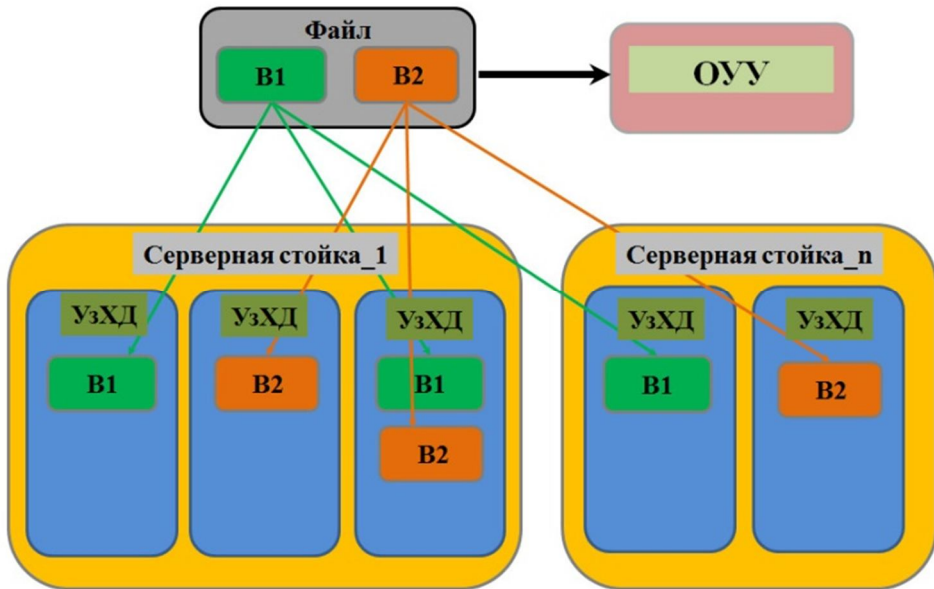


Рис. 3. Реализация процесса хранения файла в РФС

Выбор размера блока РФС (64 Мб, 128 Мб или больше) основан на том, чтобы обеспечить ускорение получения данных. Рассмотрим, за счет чего это происходит. Время чтения данных с УХД ( $T_{\text{чт}}$ ) состоит из суммы времени на перемещение головки УХД на нужное место ( $T_{st}$ ) и непосредственно времени самого чтения ( $T_{tr}$ ). Ввиду того, что время чтения обусловлено техническими возможностями УХД, для уменьшения общего времени чтения необходимо снизить время  $T_{st}$ . Т. е. должно выполняться условие  $T_{tr} \gg T_{st}$ .

Рассмотрим, как размер блока влияет на время чтения данных.

Пусть  $T_{st} = 10$  мс, скорость чтения составляет 100 Мб/с. Предположим, что время  $T_{st}$  должно составлять не более 1% от  $T_{tr}$ . Таким образом, получим, что размер блока должен составлять 100 Мб и общее время, необходимое для чтения одного блока, составит 1,01 с ( $T_{\text{чт}} = 1 \times 0,01 \text{ с} + 1 \text{ с}$ ).

Если размер блока будет составлять 1 Мб, общее время чтения данных составит 2 с ( $T_{\text{чт}} = 100 \times 0,01 \text{ с} + 1 \text{ с}$ ).

Таким образом, разбиение файла на большие блоки увеличивает скорость чтения данных в РФС.

Репликация блоков в РФС является механизмом обеспечения надежности хранения данных в РФС. За репликацию блоков в РФС отвечает ОУУ. ОУУ определяет на каком УзХД будет храниться та или иная реплика блока, при этом соблюдается баланс между надежностью и производительностью. Для этого необходимо, чтобы при создании реплики блока нагрузка на канал передачи данных РФС была минимальной, но, в то же время, бы-

ла сохранена высокая надежность хранения данных. Это достигается следующим образом.

Пусть коэффициент репликации равен 3. Первая реплика будет записана локально на тот УзХД, на котором был запущен клиент РФС, выполняющий запись данных. Вторая реплика записывается на УзХД, находящийся в той же серверной стойке. А третья реплика передается УзХД другой серверной стойки. При таком методе организации записи реплик блока выполняется минимальная нагрузка на канал передачи РФС в целом, с сохранением высокой надежности хранения данных.

Клиент РФС – программное обеспечение, которое взаимодействует с данными в РФС. Взаимодействие клиента РФС с РФС состоит из двух этапов: этапа получения данных и этапа записи данных. При этом эти этапы могут быть связаны как с взаимодействием непосредственно с файлом, так и с информацией о файле (права доступа, коэффициент репликации, место расположения и т. п.).

По умолчанию РФС выполняет репликацию каждого блока три раза. Репликация обеспечивает простую и надежную форму резервирования данных для защиты от большинства сбоев. Также она облегчает планирование вычислительных задач для локально хранимых блоков данных, предоставляя множество реплик каждого блока на выбор.

Однако репликация является затратной процедурой: стандартная схема, включающая 3 репликации, предполагает использование 200% емкости хранения и других ресурсов (например, пропускной способности сети в процессе записи данных). В случае наборов данных с относительно низким уровнем ввода-вывода, доступ к дополнительным репликам блоков данных при выполнении операций в обычном режиме осуществляется редко, но они все равно занимают тот же объем дискового пространства.

Таким образом, логичным усовершенствованием является применение вместо репликации кодов избыточности (КИ), использующих значительно меньший объем памяти УХД, при этом обеспечивающих тот же уровень отказоустойчивости. В типовой конфигурации коды избыточности позволяют сократить емкость, необходимую для хранения данных, приблизительно на 50% по сравнению с тройной репликацией [21 – 23].

При сравнении различных схем хранения данных необходимо учитывать два важных параметра: постоянство хранения данных (измеряемое допустимым числом одновременных отказов) и эффективность хранения данных (логический размер блока, поделенный на степень использования необработанных данных).

Репликация (подобная ИМНД или РФС) представляет собой простой и эффективный способ предотвращения отказов УХД за счет использования емкости хранения.  $N$ -ное количество способов репликации способно предотвратить до  $n - 1$  одновременных отказов УХД при значении эффективности хранения данных, равном  $1/n$ . Например, схема с тремя типами репликации, обычно используемая в РФС, предотвращает до двух отказов диска при

значении эффективности хранения данных, равном  $1/3$  (или же 200% емкости хранения).

Наиболее простая форма КИ основывается на операциях типа «исключающее ИЛИ». В то время как «исключающее ИЛИ» может принимать любое количество блоков данных в качестве данных ввода, оно очень ограничено, поскольку оно может производить не более одного блока четности. Таким образом, кодирование при помощи операции «исключающее ИЛИ» с размером группы, равным  $n$ , может предотвратить до одного отказа диска с эффективностью  $n - 1/n$  ( $n - 1$  блоков данных для группы, состоящей из  $n$  числа блоков), но не является достаточным для систем, подобных РФС, которым требуется обеспечить предотвращение множества отказов. Данное ограничение устраняется с помощью кода Рида – Соломона, способного предотвратить большое количество отказов УХД на группу.

При применении кода Рида – Соломона пользователь может гибко настраивать параметры постоянства хранения данных и затрат на хранение данных путем выбора различных значений  $k$  и  $m$ . Число блоков четности ( $m$ ) определяет количество одновременных отказов УХД, которые возможно предотвратить. Отношение количества блоков данных к количеству блоков четности определяет эффективность хранения данных:  $k/k + m$ .

Типовые конфигурации кода Рида-Соломона, такие как RS (6,3) и RS (10,4) обеспечивают превосходные надежность и эффективность хранения данных в сравнении с тройной репликацией, поскольку они могут предотвратить от трех до четырех отказов УХД, соответственно, делают это при использовании <50% емкости хранения. На рис. 4 приведено сравнение показателей отказоустойчивости и эффективности хранения данных репликации, операции «исключающее ИЛИ» и кода Рида – Соломона при использовании типовых параметров.

	Отказоустойчивость	Эффективность хранения
Одинарная реплика	0	100 %
Тройная реплика	2	33 %
XOR с 3 ячейками	1	86 %
RS (6,3)	3	67 %
RS (10,4)	4	71 %

**Рис. 4. Сравнение репликации, операции «исключающее ИЛИ» и кода Рида – Соломона по показателям отказоустойчивости и эффективности хранения данных**

Кодирование/декодирование данных очень сильно загружает процессор и может привести к значительным затратам вычислительных мощностей при использовании КИ. Чтобы максимально уменьшить риск подобных последствий при выполнении КИ в РФС, предлагается использовать интеллектуальную библиотеку Intelligent Storage Acceleration Library (Intel ISA-L) с открытым исходным кодом, которая ускоряет вычисления линейной алгебры, связанные с КИ, за счет использования расширенных наборов аппаратных команд, таких как SSE, AVX и AVX2. ISA-L поддерживает все основные виды операционных систем, включая Linux и Windows.

В системе КИ в РФС автор применил алгоритм кода Рида – Соломона в двух формах: одна основана на коде библиотеки ISA-L, а другая – на коде чистого Java (который подходит для систем без требуемых моделей центрального процессора). Автор сравнил производительность двух указанных реализаций, а также производительность реализации кодировщика аналогичных систем (по результатам публикаций). Во всех тестах, описанных в данном разделе, использовалась схема (6,3). В результате проведенного анализа было выявлено, что реализация кода библиотеки ISA-L в 4 раза превосходит реализацию КИ в РФС среды Java по уровню производительности и приблизительно в 20 раз – реализации кодировщика аналогичных систем. На основании данных результатов рекомендуется ускоренное внедрение кода библиотеки ISA-L для всех видов производственного развертывания.

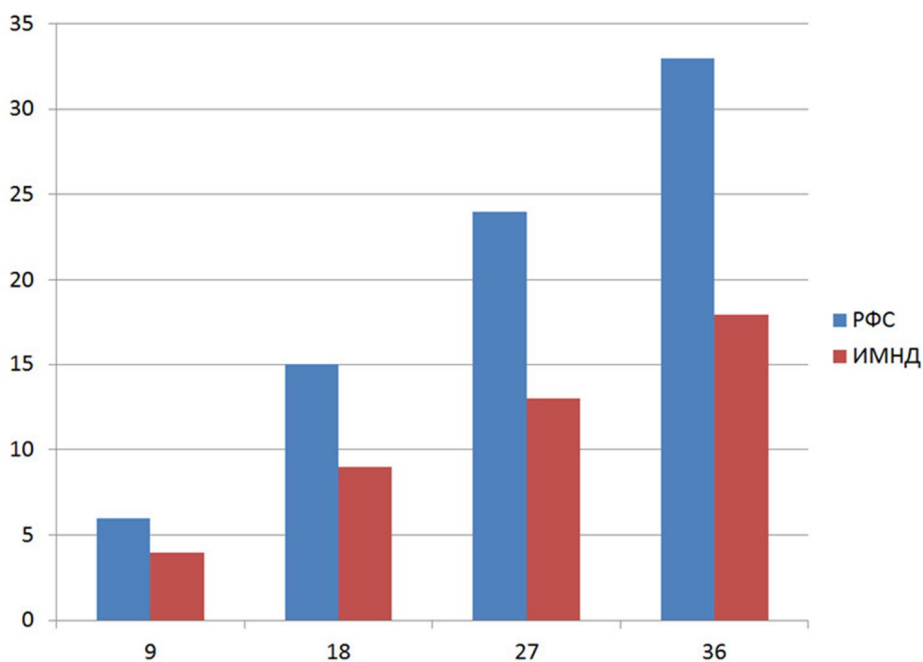
Исходя из вышесказанного, использование КИ может снизить степень использования емкости хранения приблизительно на 50% по сравнению с репликацией, обеспечивая при этом тот же уровень надежности. Это обеспечивает значительную экономию ресурсов памяти в плане сокращения расходов на приобретение дополнительного оборудования, поскольку пользователи могут хранить в два раза больше данных при том же общем объеме памяти.

### **Оценка использования предлагаемых методов**

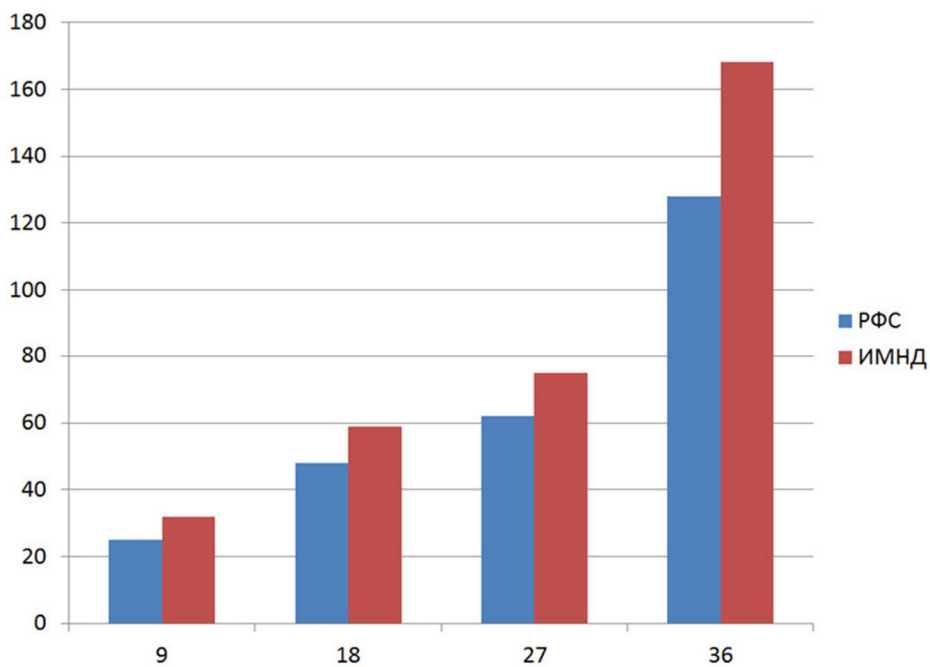
Автором был создан тестовый кластер предлагаемой модели организации процессов хранения данных ДЗЗ в СКМ ЧС. Была проведена оценка применения предлагаемой модели с существующей моделью. Проводилась оценка процессов хранения данных ДЗЗ. Результаты представлены на рис. 5 – 6.

Таким образом, экспериментальные данные показывают, что накладные расходы на организацию «полезного» объема хранения в РФС выше по сравнению с ИМНД, однако, при увеличении количества УХД разница снижается, в то же самое время надежность РФС намного выше ИМНД (количество УХД, которые могут выйти из строя без потери данных). Также РФС позволяет быстрее выполнить восстановление инфраструктуры при выходе из строя УХД.





**Рис. 5. Максимально-допустимое количество «сбойных» УХД**



**Рис. 6. Временные затраты на восстановление при сбое УХД**

## **Заключение**

Автором был проведен анализ существующих моделей и методов организации функционирования информационных систем космического мониторинга в аспекте реализации процессов хранения данных ДЗЗ. На основе данного анализа были проведены исследования и разработки в области программных и информационных аспектов обеспечения функционирования информационных систем космического мониторинга чрезвычайных ситуаций МЧС России и реализации процессов распределенного хранения данных.

Для этого:

1. Проведен анализ подходов к организации функционирования отечественных и зарубежных систем космического мониторинга в аспекте реализации процессов хранения и обработки данных в них.

2. На основе проведенного анализа разработаны модели и методы функционирования СКМ ЧС с обеспечением распределенного хранения данных ДЗЗ.

3. Разработанные модели и методы реализованы в виде программных продуктов.

4. Проведена экспериментальная оценка проведенного исследования.

Проведенное исследование позволяет:

- обеспечить гарантированное хранение данных;
- минимизировать время простоя при масштабировании аппаратных средств;
- снизить финансовые расходы на создание аппаратной составляющей.

Значимость предлагаемых методов организации распределенного хранения данных заключается, помимо вышеуказанного, в том, что РФС может выступать основой для проведения распределенно-параллельной обработки данных ДЗЗ.

## **Литература**

1. Акимов В. А., Краминцев А. П., Курбатов М. Ю., Ротару А. Н., Савельев М. И., Алексеенко Я. В., Епихин А. В., Карташев В.И., Кудинов А. А., Леденцов С. А., Шабуневич А. В., Шабуневич В. И. Наземно-космический мониторинг чрезвычайных ситуаций. – Москва : ФГБЦУ ВНИИЭМ ГОЧС (ФЦ), 2016.
2. Алексеенко Я. В. Организация функционирования Системы космического мониторинга чрезвычайных ситуаций МЧС России в аспекте применения информационных технологий распределенного хранения и многопоточной обработки данных для улучшения качества и эффективности решений, принимаемых при прогнозировании и ликвидации чрезвычайных ситуаций // Сборник тезисов докладов шестнадцатой Всероссийской открытой конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2018. – С. 13.
3. Белкин К. А. Интеграция и практическое применение информационных технологий в системах космического мониторинга МЧС России // Проблемы обеспечения безопасности при ликвидации последствий чрезвычайных ситуаций. – 2015. – №. 2.
4. Железнов М. М., Пономарев В. М. Аэрокосмические методы мониторинга чрезвычайных ситуаций //Мир транспорта. – 2017. – Т. 15. – №. 4. – С. 214 – 227.

5. Исаев Е. А., Корнилов В. В. Проблема обработки и хранения больших объемов научных данных и подходы к ее решению // Математическая биология и биоинформатика. – 2013. – Т. 8. – №. 1. – С. 49 – 65.
6. Лупян Е. А., Балашов И. В., Бурцев М. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Кобец Д. А., Крашенинникова Ю. С., Мазуров А. А., Назиров Р. Р., Прошин А. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А., Флитман Е. В. Создание технологий построения информационных систем дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 53 – 75.
7. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашницкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12. – № 5. – С. 263 – 284.
8. Родионичева Е. Д. Эффективность использования NAS для малого бизнеса // Редакционный совет. – 2018. – С. 131.
9. Dou X., Flinn J., Chen P. M. Toward eidetic distributed file systems // 7th {USENIX} Workshop on Hot Topics in Storage and File Systems (HotStorage 15). – 2015.
10. Фахми Ш. С., Алексеенко Я. В., Костинова Е. В. Интеллектуальные транспортные видеосистемы на основе технологии «система на кристалле» // Вопросы радиоэлектроники. Серия: Техника телевидения. – 2015. – №. 6. – С. 130 – 134.
11. Шокин Ю. И., Питуков И. А., Смирнов В. В. и др. // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. – № 4 (2008 1). – Р. 291 – 314.
12. Шокин Ю. И. и др. Распределенная система приема и обработки спутниковых данных Сибири и Дальнего Востока. Текущее состояние и перспективы развития // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9. – №. 5. – С. 45 – 54.
13. Cantrell T. G. et al. System and method for efficient cache management in a distributed file system : пат. 6119151 США. – 2000.
14. Chang F. et al. Bigtable: A distributed storage system for structured data // ACM Transactions on Computer Systems (TOCS). – 2008. – Т. 26. – №. 2. – С. 4.
15. Jeong Y. S., Kim Y. T. A token-based authentication security scheme for Hadoop distributed file system using elliptic curve cryptography // Journal of Computer Virology and Hacking Techniques. – 2015. – Т. 11. – №. 3. – С. 137 – 142.
16. Mar K. K. et al. Secure cloud distributed file system // 2016 11th International Conference for Internet Technology and Secured Transactions (ICITST). – IEEE, 2016. – С. 176 – 181.
17. Newberry E. E. M. A Caching evaluation of the Hadoop distributed file system. – 2018.
18. Patel S. M. et al. Systems and methods for providing a distributed file system incorporating a virtual hot spare : пат. 7146524 США. – 2006.
19. Shvachko K. V. et al. Distributed file system using consensus nodes : пат. 9747301 США. – 2017.
20. Takatsu F., Hiraga K., Tatebe O. PPFS: A scale-out distributed file system for post-petascale systems // Journal of Information Processing. – 2017. – Т. 25. – С. 438 – 447.
21. Wideman R. B. et al. Data deduplication with adaptive erasure code redundancy : заяв. пат. 15227285 США. – 2016.
22. Wu J. et al. An Erasure Code Based Wireless Distributed Storage System Implementation // 2018 IEEE/CIC International Conference on Communications in China (ICCC). – IEEE, 2018. – С. 730 – 731.
23. Chong Z. K. et al. Systematic rateless erasure code for short messages transmission // Computers & Electrical Engineering. – 2015. – Т. 45. – С. 55 – 67.

## **ПРОБЛЕМЫ, МЕТОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ СИСТЕМНОГО КОСМО-КАРТОГРАФИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ В КОНТЕКСТЕ СОЗДАНИЯ НАЦИОНАЛЬНОГО АТЛАСА АРКТИКИ**

**С. К. Белоусов, С. С. Карпухин, Ю. И. Носенко**

*АО «Научно-исследовательский институт точных приборов», г. Москва*

**Аннотация.** Рассмотрены важнейшие методологические аспекты построения системного космо-картографического мониторинга Арктической зоны Российской Федерации. Показаны пути совершенствования информационно-картографического обеспечения деятельности субъектов управления российской Арктики. Продемонстрированы разработанные оригинальные методы оценивания уровня развития природно-хозяйственных систем по различным тематическим аспектам.

**Ключевые слова:** Арктическая зона Российской Федерации (АЗРФ), Национальный атлас Арктики (НАА), информационно-картографическое обеспечение (ИКО), космический аппарат (КА), дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ), системный космо-картографический мониторинг (СККМ), комплексный космический мониторинг (ККМ) системный картографический мониторинг (СКМ), природно-хозяйственная система (ПХС).

Дальнейшее сбалансированное устойчивое развитие Арктической зоны Российской Федерации (далее – АЗРФ) связано с совершенствованием регионального управления, что немыслимо без организации комплексного космического мониторинга районов интенсивного освоения (так называемых «опорных зон») и модернизации информационного обеспечения органов государственной власти всех уровней. Для этих целей очевидна целесообразность создания специальной географической информационной системы, а на первом этапе – комплексного электронного картографического атласа, как обязательного универсального компонента (первоосновы базы данных и базы знаний) информационно-картографического обеспечения (ИКО) деятельности региональных систем подготовки принятия решений в сфере обороны, безопасности и социально-экономического развития [5, 8].

В соответствии с поручением Президента Российской Федерации В. В. Путина от 29.06.2014 № Пр-1530 и поручением Правительства Российской Федерации от 15.07.2014 № АХ-П9 – 5271 коллективом организаций-соисполнителей под руководством АО «Роскартография» в период 2015 – 2017 гг. был создан Национальный атлас Арктики (далее – НАА). Атлас представляет собой новейшую информационно-картографическую систему, в которой собраны и обобщены самые современные знания о природно-хозяйственной среде российской Арктики. Отличительной особенностью НАА является его междисциплинарный характер [4].

Достоверное, актуальное и подробное *информационно-картографическое обеспечение* (ИКО) является необходимым условием эффективной поддержки принятия управленческих решений. Использование данных космического зондирования Земли и компьютерных технологий в создании информационно-картографической документации повышает объективность и достоверность комплексного анализа природно-хозяйственных систем, надежность региональных обобщений и прогнозов. В свою очередь, ГИС и WEB-технологии позволяют создать единую геоинформационную картографическую пространственно-временную модель территории, обеспечить возможность оперативного интегрирования информации в научных и практических целях и предоставить неограниченный многопользовательский доступ к системно организованным геопространственным ресурсам в интересах устойчивого сбалансированного развития российской Арктики и обеспечения ее безопасности.

В качестве новой системной парадигмы ИКО АЗРФ в контексте создания НАА осуществлена разработка методологических основ системного космо-картографического мониторинга (СККМ) АЗРФ и его важнейших подсистем: космической (ККМ – комплексный космический мониторинг) и картографической (СКМ – системный картографический мониторинг). Отработаны следующие направления:

1. Оценка и прогнозирование вклада формируемой арктической орбитальной группировки спутников.

2. Проведение природно-хозяйственного районирования территории АЗРФ с целью выявления объективно сложившихся природно-хозяйственных систем (ПХС), требующих специфического подхода к их космо-картографическому мониторингу.

3. Системный картографический мониторинг и оптимизация информационно-картографического обеспечения АЗРФ.

4. Конструирование синтетических характеристик оценивания природно-хозяйственной среды и оперативного оборудования АЗРФ.

Рассмотрим некоторые результаты, полученные в ходе реализации вышеперечисленных направлений.

### **Оценка и прогнозирование вклада формируемой арктической орбитальной группировки спутников**

#### ***Основные задачи космического мониторинга***

Необходимость развития российских средств постоянного комплексного космического мониторинга арктических территорий и акваторий особо подчеркивается в тексте Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 г. [7].

Современные отечественные средства дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), позволяют получать цифровые изображения с различными показателями пространственного разрешения (от 1 до 1000 м), в широком диапазоне спектра электромагнитных волн и с различной периодичностью (вплоть до

нескольких раз в сутки). Значительное развитие получили математические методы и технические средства обработки цифровых изображений (пространственно-спектральный анализ, морфометрический анализ, радарная интерферометрия и др.). Все это позволяет комплексно подходить к решению многих научно-прикладных задач, которые можно условно отнести к четырем основным группам:

1. *Атмосфера*: температура, осадки, распределение и тип облаков, концентрации газов и т. д.

2. *Земная поверхность*: топография, температура, альbedo, влажность почвы, тип и состояние растительности, антропогенные нагрузки и т. д.

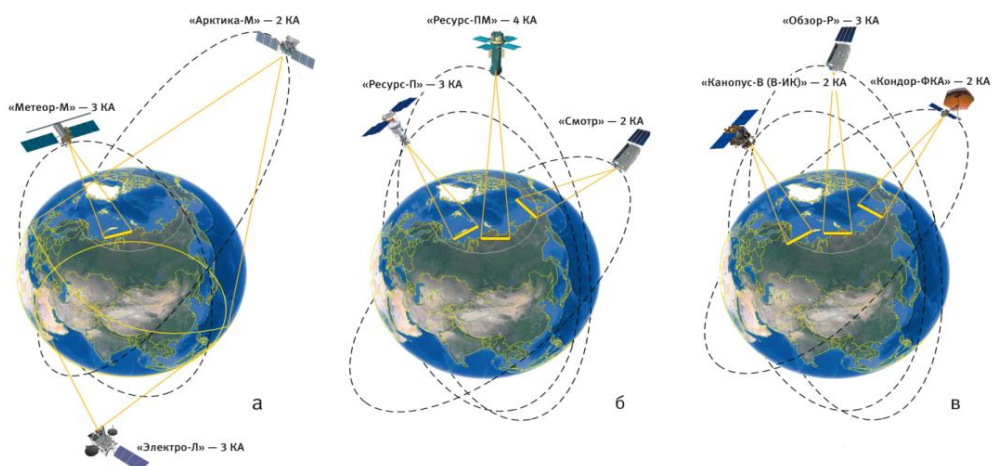
3. *Океан*: температура, топография, цвет водной поверхности и т. д.

4. *Криосфера*: развитие многолетней мерзлоты, распределение, состояние и динамические подвижки снега, морского льда, айсбергов, ледников и т. д.

Особую актуальность для уязвимых арктических регионов имеют задачи оценки и мониторинга: экологического состояния территорий, развития опасных природных, природно-антропогенных и антропогенных процессов, а также навигации, связи, вещания и других задач в интересах министерств, ведомств, хозяйствующих субъектов, контрольно-надзорных органов и служб.

#### ***Состав и структура космических систем комплексного мониторинга***

Комплексный характер ККМ достигается применением космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) различных типов для решения тех классов задач, для которых являются приемлемыми орбитальное построение систем КА, информативные характеристики бортовой аппаратуры наблюдения, включая ее разрешающую способность и состав спектральных диапазонов.



**Рис. 1. Состав и структура космических систем комплексного мониторинга:**  
**а)** система гидрометеорологического, океанографического и гелиогеофизического назначения; **б)** система исследования природных ресурсов Земли; **в)** система оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций

Орбитальное построение систем определяет доступность мониторинга районов АЗРФ, в зависимости от их географической широты, периодичности наблюдения, влияет на условия освещенности наблюдаемого района, а также на возможности оперативной передачи информации с борта КА на наземные центры приема и обработки информации. Надлежащее расположение КА на орбите для КА радиолокационной съемки («Кондор-ФКА», «Обзор-Р», «Смотр») дает возможность интерферометрической съемки рельефа местности (рис. 1, а, 1, б, 1, в).

Динамические характеристики КА по перенацеливанию бортовой аппаратуры, ее апертурные свойства, а также возможности бортовых систем по обработке, накоплению и высокоскоростной передаче информации определяют такие важные показатели, как производительность системы и оперативность предоставления информации потребителям.

В существенной мере эти показатели зависят от возможностей наземной космической инфраструктуры приема, обработки и передачи данных ДЗЗ, комплексного характера планирования съемки и обработки информации.

### **Космическая система «Арктика-М»**

Разрабатываемые и серийно изготавливаемые в соответствии с Федеральной космической программой на период 2016 – 2025 гг. космические аппараты обладают всеми названными возможностями для мониторинга Арктической зоны в целях решения групп задач экономической деятельности и контроля чрезвычайных ситуаций.

Вместе с тем действующие КА «Электро-Л» и «Метеор-М» гидрометеорологической системы обеспечивают решение задач в Арктической зоне в ограниченном объеме вследствие конструктивных решений и орбитального построения. Так, система КА «Электро-Л» обеспечивает квазинепрерывное наблюдение (с дискретностью 15 – 30 мин) только до 73° с. ш., система КА «Метеор-М» выполняет наблюдение Арктической зоны в ограниченной полосе съемки 900 км и суточной периодичностью. Принципиально значимое приращение вклада космических средств гидрометеорологического назначения в освещение геофизической обстановки в Арктике будет осуществлено при создании системы «Арктика-М» (рис 1, а).

Два космических аппарата «Арктика-М» с высоты апогея вытянутой эллиптической орбиты обеспечивают поочередное «зависание» над Арктической зоной, и соответственно по 12 часов каждый квазинепрерывный режим наблюдения в течение суток. По составу бортовой аппаратуры и режимам наблюдения КА «Арктика-М» является аналогом КА «Электро-Л». Совместно эти два типа КА образуют полную систему квазинепрерывного наблюдения взаимосвязанных атмосферных, водных и гелиогеофизических процессов в приполярной и экваториальной зонах, в наибольшей степени определяющих погодные условия на планете.

## **Проведение природно-хозяйственного районирования территории АЗРФ с целью выявления объективно сложившихся природно-хозяйственных систем, требующих специфического подхода к их космо-картографическому мониторингу**

В целях корректного формирования территориальной структуры СККМ выявляются однородные по генезису и характеру современного устройства и функционирования природно-хозяйственные системы АЗРФ. Выявляемые в ходе районирования иерархически соподчиненные структурные элементы природно-хозяйственной среды являются важными системообразующими территориальными единицами, на которых базируются требования к технологическим параметрам космо-картографического мониторинга и технологиям создания геопространственной продукции в интересах органов управления развитием АЗРФ и обеспечения обороны и безопасности [2].

Методика природно-хозяйственного районирования страны основана на синтезе существующих схем природного и экономического районирования территории, материалов космической съемки, обеспечивающих возможность контроля границ между выделами на основе критерия фотофизиономической однотипности территорий и иных тематических географических данных. Использование данных ДЗЗ в качестве первичного и основного источника информации о местоположении границ природно-хозяйственных систем позволяет в значительной мере уменьшить субъективизацию процесса районирования. Выявление границ производится непосредственно по спутниковым снимкам с последующим наполнением получившихся контуров природно-хозяйственных систем соответствующей атрибутивной информацией.

Взаимное влияние хозяйственной и военной деятельности и природных компонентов на текущем уровне технологического развития общества формирует единую природно-хозяйственную среду территорий/акваторий АЗРФ. Отличительная особенность в том, что военная деятельность в значительной степени автономна и не столь глубоко, как собственно хозяйственная, учитывает взаимосвязи с природой.

В результате проведенного природно-хозяйственного районирования выделены два иерархических уровня: природно-хозяйственные области и районы (рис. 2). Это сделано в связи с малым разнообразием (в сравнении с Россией в целом) спектра биоклиматических поясов, типов хозяйственного освоения и достаточно небольшим уровнем вовлечения обширных территорий в хозяйственную деятельность человека. Элементы, отражающие антропогенную составляющую природно-хозяйственной среды, не участвуют в формировании природно-хозяйственных областей. В функционировании природно-хозяйственной среды АЗРФ доминируют природные факторы.



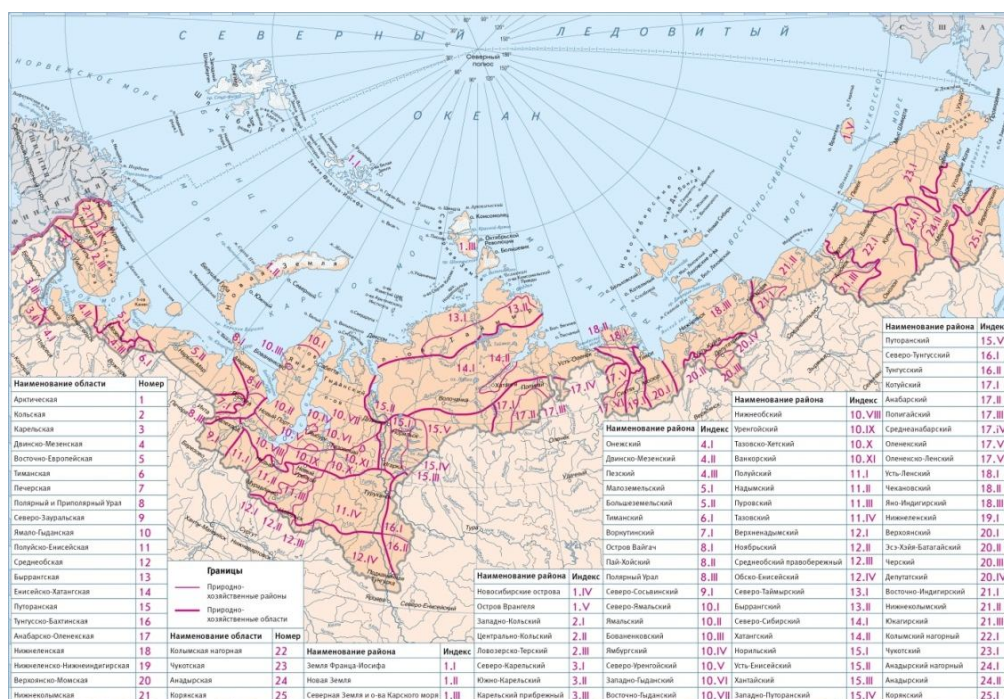


Рис. 2. Карта природно-хозяйственного районирования АЗРФ

## Системный картографический мониторинг и оптимизация информационно-картографического обеспечения АЗРФ

### Определение системного картографического мониторинга

В первую очередь, стоит отметить сугубо концептуальный характер имеющихся на сегодняшний день разработок в данном направлении, порождающий отсутствие четких технологических параметров картографического мониторинга, а также объективных географических оснований для их адаптации к конкретным природным и хозяйственным условиям АЗРФ. Во-вторых, отсутствуют принципы и методы оптимизации ИКО территориального развития, что ставит под сомнение возможность практической реализации картографического мониторинга на основе традиционных подходов в силу значительных трудовых и материальных затрат. Наконец, акцент на приоритетное обеспечение специальными оперативными картами органов управления регионами не является оптимальным для поддержки принятия решений, поскольку требует от управленцев наличия узкоспециализированных знаний и большого опыта в различных сферах территориального развития.

Выбор картографического метода исследования как основного инструмента системного картографического мониторинга (СКМ) определяет реально существующий геопространственный объект исследования – природно-хозяйственные системы (ПХС) различного ранга, – являющийся результатом взаимодействия компонентов природных систем и факторов хозяйственной

деятельности человека. Природа источников данных для составления карт и применения картографического метода исследования подразумевает дискретный анализ определенного временного промежутка в состоянии ПХС. Непрерывное наблюдение недостижимо на современном этапе развития технологии получения данных на территорию АЗРФ. Применение материалов комплексного космического мониторинга позволяет значительно сократить периодичность наблюдения отдельных компонентов ПХС.

Для использования разрабатываемой методики СКМ в интересах поддержки принятия решений предлагается ввести следующее определение системного картографического мониторинга. *Системный картографический мониторинг есть функционирование оптимально организованных в единую систему подсистем сбора исходных геопространственных данных, их геоинформационно-картографической обработки и последующего картографического анализа в целях регулярного наблюдения за состоянием ПХС региона, ретроспективного анализа их (ПХС) эволюции и прогноза дальнейшего развития.*

### **Актуальные проблемы информационно-картографического обеспечения российской Арктики**

Создание Национального атласа Арктики является важной вехой в обеспечении процесса развития российской Арктики фундаментальными научными данными. Однако современные вызовы перспективного освоения приоритетных регионов российской Арктики, обеспечения их безопасности, нашедшие отражение в Государственной программе Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», выдвигают требования, которым классические картографические произведения удовлетворяют не в полной мере [1].

Основные направления государственной политики в российской Арктике включают в себя: формирование опорных зон развития и обеспечения их функционирования, создание условий для ускоренного социально-экономического развития АЗРФ, а также развитие Северного морского пути и обеспечение судоходства в Арктике. Нехватка трудовых ресурсов, особенно высококвалифицированных, требует значительного повышения уровня жизни населения в целях привлечения необходимого контингента специалистов, в том числе вахтовым способом. Развитие территорий, ранее не вовлеченных в хозяйственную деятельность, а также полностью или частично заброшенных, несет в себе ряд рисков и проблем для природы, населения и экономики, заключающихся в нарушениях функционирования экосистем региона, возможных техногенных или индуцированных природных катастрофах, усилении геополитической напряженности, развитии военной инфраструктуры.

Особую роль в ИКО развития территорий АЗРФ играют тематические карты максимального уровня научного обобщения. Природно-хозяйственная среда АЗРФ сложна и многогранна, а для целей поддержки принятия решений, как правило, важна простота и наглядность. Синтетические оценочные

карты обладают свойством обобщенного представления сложных систем, но их составление – сложная научная задача. Подобный подход актуален и для ИКО военной деятельности. Задачи оперативного оборудования региона также требуют подробного анализа природно-хозяйственной среды с учетом специфики военной деятельности, что может вызывать трудности у лиц, принимающих решения без дополнительной научной проработки информации. Подобные карты АЗРФ встречаются очень редко и исключительно фрагментарно, а в сфере военной деятельности не распространены вовсе.

Поддержание актуальности картографических материалов для АЗРФ – одна из наиболее сложных задач. Даже налаженная система топографического картографирования оказывается не в состоянии поддерживать нормативные характеристики обновления карт. Согласно Постановлению Правительства Российской Федерации №1174 от 12 ноября 2016 г. «Об установлении требований к периодичности обновления государственных топографических карт и государственных топографических планов, а также масштабов, в которых они создаются», предельный срок обновления топографических карт составляет 10 лет. Генеральный масштаб топографических карт для территорий с низкой плотностью населения, к которым целиком относится АЗРФ, составляет 1:50 000. Сухопутная территория АЗРФ покрывается 11 200 листами карт генерального масштаба.

Адресное включение приоритетных регионов, отличающихся высоким уровнем хозяйственной освоенности территории, в план покрытия картами масштаба 1:25 000, а остальных слабо освоенных территорий в план обновления картами масштаба 1:100 000 и мельче может дать значительное уменьшение количества листов карт при сохранении необходимой подробности ИКО. Определение перечня приоритетных районов и нахождение местоположения их границ – предмет природно-хозяйственного районирования макрорегиона.

Тематические карты, раскрывающие состояние и функционирование природно-хозяйственных систем имеют различное временное разрешение обновления, но практически всегда это нерегулярное явление. Между созданием фундаментальных российских научных атласных произведений арктического региона России прошло 33 года. Это очень значительный промежуток для обновления различного рода данных о социально-экономических, экологических и некоторых природных процессах и явлениях.

Низкая оперативность обновления всего спектра пространственных данных является одной из основных проблем, требующих безотлагательного решения. Арктика – стратегический регион с низкой освоенностью и высоким потенциалом для развития. Комплексное развитие территорий, отвечающее требованиям устойчивого развития, не может опираться на данные о природно-хозяйственных системах, срок актуальности которых превышает 5 – 10 лет, а в приоритетных регионах – 1 – 2 года.

Сбор данных для арктического региона сопряжен с большим количеством времени и трудозатрат, поскольку регион большей частью слабо заселен, сеть станций наблюдения разрежена, природные условия достаточно суровы для полевого сбора данных, статистические данные соотносятся, как правило, с

территориями, обладающими большими размерами, вследствие чего зачастую оказываются малодостоверными. С этим же фактором связана низкая оперативность поступления данных.

Таким образом, налицо несоответствие потребностей субъектов управления в современных картографических материалах, обладающих свойством обобщенного комплексного отображения сложных природно-хозяйственных и военных систем в простом и наглядном виде, и недостаточностью научно-методических решений, обеспечивающих их составление в условиях технологических и ресурсных ограничений.

### **Состав и структура системного картографического мониторинга российской Арктики**

Основная цель, которую преследует системный картографический мониторинг, – оптимизация ИКО комплексного развития территории АЗРФ. Первоначальным этапом разработки методик и подходов к данной оптимизации является определение ключевых характеристик ИКО, которые могут быть улучшены. Среди них наиболее значимыми и важными являются:

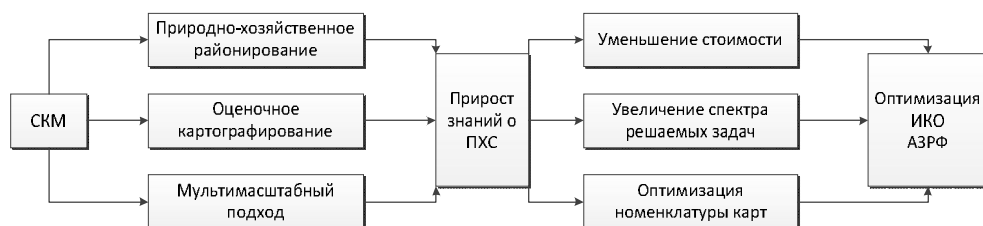
- стоимость создания и поддержки работоспособности системы;
- номенклатура продукции;
- качество продукции;
- оперативность.

Улучшение указанных характеристик системы возможно с помощью применения модернизированных программно-аппаратных средств, оптимизации организационных мероприятий и усовершенствования научно-методических подходов к ИКО. СКМ ориентирован именно на научно-методическую составляющую с использованием картографического метода исследования ПХС макрорегиона. Системный подход в картографии реализуется путем рассмотрения картографируемых явлений как геосистем, либо их компонентов с учетом их взаимосвязей и функционирования [6].

Структура СКМ АЗРФ должна обеспечивать накопление и систематическую верификацию специальных знаний. Помимо природно-хозяйственного районирования для территориальной дифференциации и оптимизации параметров ИКО, определения приоритетных регионов необходимо:

- разработать *интегральные оценочные характеристики* ПХС;
- провести *мультимасштабные итерационные исследования* от макрорегионального до локального уровней (что позволяет точнее определять проблемы в отдельных аспектах развития территорий) (в результате достигается увеличение информативности ИКО при соответствующем уменьшении сложности задачи);

– *автоматизировать построение карт*. Алгоритмы оценивания позволяют, единожды построив модель, производить перерасчет оцениваемых показателей в автоматизированном режиме, тем самым уменьшая трудозатраты на составление карт и объем высококвалифицированного труда специалистов в различных областях развития территорий (рис. 3).



**Рис. 3. Схема оптимизации информационно-картографического обеспечения АЗРФ с помощью системного картографического мониторинга**

### **Конструирование синтетических характеристик оценивания природно-хозяйственной среды и оперативного оборудования АЗРФ**

Оценивание состояния природно-хозяйственной среды и оперативного оборудования региона – важный инструмент выявления проблем в развитии социально-экономической и военной инфраструктуры региона. Задачи оценивания и последующего анализа – ключевая особенность системного подхода к мониторингу. Методы математико-картографического и геоинформационного моделирования в ходе СКМ обеспечивают возможность решения данных задач, а картографическая форма представления результатов позволяет использовать полученные результаты в решении различных вопросов социально-экономического развития и обеспечения обороны и безопасности. Географический синтез – сложный синергетический процесс выявления ключевых взаимосвязей в исследуемых природно-хозяйственных системах. При формировании синтетических характеристик природно-хозяйственной среды систематизируется информация, и добываются новые знания об особенностях взаимодействия природы и общества в ходе хозяйственной и военной деятельности. Эти знания позволяют строить упрощенные модели сложных географических систем.

В настоящее время разработан и апробирован ряд методов географического синтеза и оценивания с использованием геоинформационных технологий [3]. Для обеспечения возможности применения в СКМ, данные методы должны отвечать ряду требований:

- математическая простота;
- максимальное использование исходных данных различного генезиса;
- соответствие доступным исходным данным;
- возможность работы в условиях неполноты данных;
- возможность применения в широком спектре задач на различных масштабах уровнях;
- синтетический характер моделирования, обеспечивающий простоту и понятность для пользователя.

Мониторинговый характер исследования подразумевает автоматизированный характер расчетов синтетических показателей и представление результатов в картографическом виде. Методы геоинформационного моделирования при решении задач СКМ могут использоваться как по отдельности, так и в

сочетании друг с другом. Важно обеспечить их взаимную сочетаемость. Итоговый выбор используемых методов геоинформационного моделирования должен гарантировать качество исследований при минимальных затратах трудовых ресурсов пользователя. К основным, ранее разработанным методам, отвечающим требованиям СКМ, относятся:

*1. Оверлей слоев.*

Метод является стандартной операцией в большинстве современных ГИС-пакетов. Сущность оверлея заключается в применении к различным слоям, характеризующим объект или явление, логических операций объединения и пересечения. В синтетическом картографировании нередко применяется подход индивидуальной классификации, основанный на поиске уникальных сочетаний атрибутивной информации из разных слоев.

*2. Конструирование и расчет интегральных индексов.*

Это один из наиболее математически простых способов синтетического оценивания территории, удовлетворяющий вышеперечисленным требованиям. Интегральные индексы – числовые показатели, являющиеся результатом линейного сжатия многомерной информации об объекте или явлении. Вместе с тем, наряду с простотой, будучи нанесенными на карту, они содержат в себе глубокий географический смысл. С точки зрения мониторинга, математическая простота позволяет нам легко пересчитывать индексы и в автоматическом режиме составлять карты, тем самым обеспечивая необходимую оперативность для поддержки принятия, как стратегических решений, так и решений тактического характера.

*3. Корреляционный анализ.*

Является самым распространенным в географических исследованиях статистическим методом. Его сущность заключается в выявлении взаимосвязи между явлениями. Сфера его применения крайне велика: оценивание исходных данных, обоснование и расчет весов показателей индексов, анализ взаимосвязей промежуточных результатов исследования.

*4. Кластерный анализ.*

Предназначен для классификации и упорядочивания объектов в многомерном пространстве. В контексте диссертационного исследования высока роль кластерного анализа в процессе синтеза промежуточных результатов моделирования содержательных характеристик при значительном генетическом различии исходных факторов. По своей сущности кластерный анализ является выявлением комплексных качественных характеристик объектов и явлений.

Среди указанных методов геоинформационного моделирования природно-хозяйственных и военно-географических систем в структуре СКМ основное место занимает система интегральных индексов, характеризующих различные аспекты социально-экономического развития. Ключевое преимущество интегральных индексов заключается в разнообразии уже созданных и апробированных методик их создания. Однако практически все существующие интегральные индексы сконструированы для использования на основе однородных, в первую очередь, статистических исходных данных. СКМ АЗРФ в

силу специфики исходных данных в своем составе должен содержать систему новых оригинальных интегральных индексов, рассчитываемых с применением разнородных данных на соответствующих масштабных уровнях.

Простота математического аппарата, используемого при разработке и расчете интегральных индексов, скрывает в себе опасность применения формального математического подхода. Важно понимать географическую сущность вычисляемых показателей, для чего необходимо придерживаться основных теоретических принципов построения интегральных индексов:

- количество интегрируемых показателей не должно превышать 6 – 7; дальнейшее повышение количества показателей не добавляет полезной информации, усложняет вычисления и повышает риск смысловых ошибок в расчетах;

- показатели не должны быть зависимы друг от друга, несоблюдение этого правила приводит к многократному учету факторов и искажает смысловое значение индекса; вместе с тем, допускаются значительные по модулю коэффициенты парной корреляции, если удастся доказать системное отсутствие серьезной взаимосвязи между явлениями;

- введение нового индекса требует географического обоснования;

- усложнение математического аппарата (увеличение степени полиномов, введение прочих нелинейных функций) допустимо, но значительно усложняет обоснование географического смысла полученных результатов и повышает вероятность недостоверных результатов исследования;

- необходимо найти «предел интегрирования», то есть максимальную степень семантической классификации интегральных показателей, при которой соблюдаются вышеуказанные требования.

Выбор весовых коэффициентов – сложная и неоднозначная задача. Некоторые исследования говорят о невозможности использования взвешенных сумм в качестве достоверного математического аппарата для комплексного оценивания объектов и явлений. Однако, оценка качества исследований, связанных с разработкой интегральных индексов, основанных на этой методике, показывает ее применимость. В качестве весов могут быть выбраны различные нормативы, стандарты и рекомендации при их наличии, результаты корреляционного анализа, экспертные мнения.

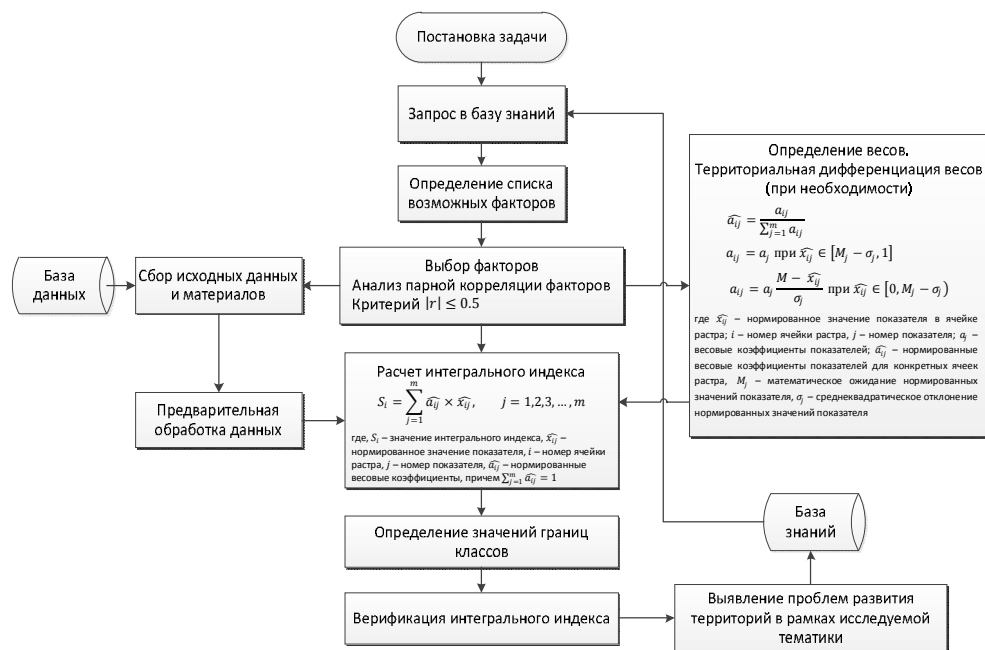
В СКМ применяется принцип непостоянных весовых коэффициентов в зависимости от местоположения исследуемой территории. Использование сеточно-ячейковой модели представления данных делает возможным применение не единого весового коэффициента для конкретного показателя, а матрицы весовых коэффициентов, уникальных для каждой ячейки растра. Преимущество использования принципа изменения весовых коэффициентов при конструировании интегральных индексов реализуется в случаях нелинейного увеличения кумулятивного эффекта при значительных превышениях значений частных факторов естественного фона.

Представленная на рис. 4 расчетно-аналитическая модель интегральной оценки природно-хозяйственной среды АЗРФ определяет алгоритм констру-

ирования интегральных индексов, как для целей социально-экономического развития, так и для обеспечения обороны и безопасности региона. Расчет синтетических оценочных характеристик производится последовательно с мелкого до крупных масштабных уровней. Каждая итерация обеспечивает прирост знаний, уточняющих проблемы социально-экономического развития и обеспечения обороны и безопасности.

На макрорегиональном уровне реализуются интегральные индексы в их классическом понимании – на основе данных государственной статистики. Однако, с точки зрения мониторинга, макрорегиональный уровень не представляется основным, поскольку здесь преимущественно определяются стратегические параметры развития, имеющие долгосрочный характер.

Региональный уровень развития более сложен с точки зрения построения индексов в связи с укрупнением масштаба исследования. Более крупный масштаб предполагает большую детальность, как с пространственной точки зрения, так и с содержательной. Статистические данные не в состоянии обеспечить ни то, ни другое. Специфика развития на региональном уровне предполагает значительно более полное участие показателей, отражающих вклад природных и экологических факторов. В связи с этим для данного уровня мониторинга в диссертационном исследовании предлагается комбинирование статистических данных, данных дистанционного зондирования и физико-географических данных при подсчете интегральных индексов.



**Рис. 4. Расчетно-аналитическая модель интегральной оценки природно-хозяйственной среды и оперативного оборудования российской Арктики**





рии, структуре и территориальной дифференциации явления, районах, нуждающихся в приоритетном развитии и т. д.

СКМ обеспечивает соблюдение основополагающего принципа СППР – максимального использования разнообразной информации об объекте управления. СКМ позволяет реализовать системный подход к процессам управления территорией. Синтез методов и средств картографии, геоинформатики, математики и системного анализа позволяет производить максимально реалистичное моделирование природно-хозяйственных систем этапов их эволюции, сценариев возможного развития и, следовательно, необходимых управленческих решений. Визуализация данных, в том числе картографическими методами, обеспечивает легкость восприятия и значительно облегчает работу лицам, принимающим решения.

### Литература

1. Государственная программа Российской Федерации «Социально-экономическое развитие Арктической зоны Российской Федерации на период до 2020 года», 2014.
2. Карпухин С. С., Белоусов С. К. Природно-хозяйственное районирование российской Арктики для создания комплексного космического ГИС-атласа // Геодезия и картография. – 2013. – № 12. – С. 27 – 32.
3. Лурье И. К. Геоинформационное картографирование: Учебник. – М.: КДУ, 2010. – 424 с.
4. Национальный атлас Арктики. – М.: АО «Роскартография», 2017. – 496 с., ил.
5. Носенко Ю. И., Гомозов О. А., Черненко А. Н., Карпухин С. С., Алтынов А. Е., Белоусов С. К. Концепция создания комплексного космического ГИС-атласа Арктической зоны Российской Федерации // Применение космических технологий для развития арктических регионов: сборник материалов Всероссийской конференции с международным участием. – Архангельск: ИПЦ САФУ, 2014. – С. 153 – 161.
6. Салищев К. А. Картоведение: Учебник. – 3-е изд. – М.: Изд-во МГУ, 1990 – 400 с.
7. Стратегия развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2020 года. 20 февраля 2013 года.
8. Черненко А. Н., Карпухин С. С., Алтынов А. Е., Белоусов С. К. Комплексная космическая мониторинговая атласная ГИС арктического региона России // Проблемы прогнозирования чрезвычайных ситуаций. XIII научно-практическая конференция, 14 – 15 мая 2014: Доклады и выступления. – М.: ФКУ «Антистихия» МЧС России, 2014. – С. 243 – 248.

## МОНИТОРИНГ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ И ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ГЕЛИОФИЗИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА ПРИ НАБЛЮДЕНИИ СОЛНЦА КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ ИЗ ТОЧКИ ЛАГРАНЖА L5

<sup>1</sup>С. А. Богачев, <sup>2</sup>А. В. Карелин,

<sup>1</sup>С. В. Кузин, <sup>2</sup>В. А. Шувалов, <sup>2</sup>А. А. Яковлев

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
«Физический институт им. П. Н. Лебедева» Российской академии наук, г. Москва,

<sup>2</sup>АО «ЦНИИмаш», г. Королев, Московская область

**Аннотация.** Рассматривается актуальность и целесообразность создания космических средств мониторинга солнечной активности в точке Лагранжа L5 для обнаружения предвестников геоэффективных процессов на невидимой с линии Солнце – Земля поверхности Солнца. Приводится обзор космических миссий для мониторинга Солнца, солнечного ветра и межпланетной среды из окрестностей точек Лагранжа, а также анализ состава и технических характеристик целевой аппаратуры. Отмечается, что воздействие геоэффективных солнечных процессов осуществляется через три основных агента: солнечные вспышки, солнечный ветер, корональные выбросы массы. Обосновывается оптимизированный состав комплекса аппаратуры КА в точке Лагранжа L5, включающий шесть приборов для получения данных о геоэффективных процессах.

**Ключевые слова:** Солнце, солнечный ветер, солнечная активность, гелиофизические параметры, геоэффективные события, космическая погода.

### Введение

Методы формирования геофизических прогнозов основаны на использовании количественных данных, полученных путем измерения параметров геофизических объектов. До появления космических средств измерения производились наземными инструментами (телескопы, ионозонды, магнитометры, спектрометры и др.), которые могли предоставить ограниченное количество данных, более того параметры многих процессов были недоступны измерениям. Естественно, при таких условиях прогнозирование геофизической обстановки («космической погоды») носило вероятностный характер.

Развитие космической техники привело к усовершенствованию методов формирования гелиогеофизических прогнозов. Использование КА позволило существенно расширить диапазон измеряемых параметров геофизической обстановки и, в первую очередь, в областях космического пространства, где прежде измерения были невозможны. Особенно это относится к гелиофизическим измерениям за пределами магнитосферы, где в настоящее время в окрестности точки Лагранжа L1 функционирует несколько КА (ниже приводится краткий обзор и анализ результатов этих миссий).

Тем не менее, и этих данных недостаточно для построения прогнозов геофизической обстановки с необходимой точностью. Требуется заблаговре-

менные данные о признаках формирования геоэффективных событий из тех секторов Солнца, которые невидимы земному наблюдателю, а также из точки Лагранжа  $L1$ . Как показали исследования [1], такую миссию можно выполнить космическими средствами в точке Лагранжа  $L5$ . В работе [2] обосновывается проектный облик космического аппарата (КА) мониторинга солнечной активности в точке Лагранжа  $L5$  и рассматриваются системные вопросы его создания и функционирования КА. В настоящей работе приводится обзор внемагнитосферных солнечных миссий с анализом результативности исследований, выделяются основные воздействующие факторы солнечной активности и их признаки, а также определяется состав и проектные особенности комплекса целевой аппаратуры для обнаружения признаков формирования геоэффективных процессов на Солнце.

### **Миссии в точки Лагранжа системы «Солнце – Земля»**

Первым в истории космическим аппаратом, работавшим в точке Лагранжа системы «Солнце – Земля», был аппарат ISEE-3, запущенный 12 августа 1978 г. и в ноябре этого же года вышедший на постоянную орбиту в точке  $L1$ , где проработал до июня 1982 г., после чего был выведен с гало-орбиты специально проведенным маневром. В 2001 г.  $L1$  был помещен второй космический аппарат НАСА Genesis, предназначенный для сбора образцов солнечного ветра и возврата их на Землю для анализа, и в том же, 2001 г., НАСА впервые в истории разместило научную обсерваторию в точке  $L2$ . Этой обсерваторией стала миссия WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe), предназначенная для изучения микроволнового реликтового излучения Вселенной. В точках  $L4$  и  $L5$ , несмотря на возможность формирования устойчивых равновесных орбит, на настоящий момент происходили лишь транзитные перемещения аппаратов. Так, через точку  $L4$  в 2009 г. прошла обсерватория STEREO-A, располагающаяся на орбите Земли, но движущаяся по ней с небольшим опережением. Вторая обсерватория проекта, STEREO-B, отстающая от Земли, в том же, 2009 г., прошла через точку  $L5$ . С 2013 по 2015 гг. вблизи точки  $L5$  находился космический телескоп «Спитцер» (Spitzer Space Telescope). Точка  $L3$ , расположенная с обратной стороны Солнца, интереса для размещения космических обсерваторий на настоящий момент не представляет.

В области гелиофизических исследований наибольший интерес среди точек либрации до настоящего времени представляла точка  $L1$ , находящаяся на линии «Солнце – Земля». Расположенный здесь космический аппарат постоянно освещен Солнцем, то есть может проводить непрерывные наблюдения, в том числе в режимах мониторинга солнечной активности. Точка расположена на значительном удалении от магнитосферы и радиационных поясов Земли, что позволяет исследовать солнечную радиацию и солнечные космические лучи без эффекта «загрязнения» детектора ложными сигналами, формируемыми частицами радиационных поясов. Удаленность от земной магнитосферы позволяет также проводить на этих орбитах исследования солнечного ветра.

Все эти факторы привели к тому, что в настоящее время (2019 г.) в  $L1$  одновременно функционирует 4 аппарата, осуществляющих исследования в области гелиофизики и физики солнечно-земных связей, а именно космические аппараты SoHO (Solar and Heliospheric Observatory), ACE (The Advanced Composition Explorer), Wind (не расшифровывается) и DSCOVR (Deep Space Climate Observatory).

Аппараты ACE и Wind предназначены для исследования солнечного ветра и межпланетной среды. Аппарат Wind был запущен 1 ноября 1994 г., причем не был сразу выведен в точку Лагранжа и предварительно осуществлял достаточно длительную программу наблюдений по исследованию магнитосферы Земли и окололунного пространства, находясь на промежуточной орбите. В 2004 г. у космический аппарат был размещен на окончательной орбите – на периодической гало орбите около точки Лагранжа  $L1$ . В составе научной аппаратуры Wind в точку Лагранжа были доставлены 6 инструментов для исследования характеристик межпланетной среды и солнечного ветра и 2 инструмента для изучения гамма-вспышек, в том числе российский прибор Конус-Wind, разработанный в ФТИ РАН. Аппарат ACE был запущен 25 августа 1997 г. и в декабре этого же года был выведен на орбиту Лиссажу – квазипериодическую орбитальную траекторию. Так как орбита является не кеплеровской, то ее поддержание требует регулярных маневров двигателями. По прогнозу 2019 г. запасы расходного тела ACE позволяют поддерживать его орбиту как минимум до 2024 г. На борту ACE размещены 9 инструментов для исследования параметров солнечного ветра, включая его гидродинамические характеристики, химический и изотопный состав, а также магнитное поле. Данные ACE поступают на Землю в режиме реального времени и являются одним из основных источников данных, по которым формируется прогноз космической погоды Центром прогноза NOAA (NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration, США).

Аппарат SoHO является старейшей из действующих солнечных обсерваторий, которая была запущена 2 декабря 1995 г. и функционирует в точке  $L1$  с мая 1996 г. При планируемом сроке работы в 3 года, по состоянию на 2019 г. обсерватория проработала уже 23 года. В настоящее время срок ее службы продлен до 2022 г. На борту SoHO в точку  $L1$  доставлены 13 солнечных инструментов, предназначенных как для локальных измерений солнечной радиации и солнечных космических лучей, так и для удаленного получения изображений Солнца в широком диапазоне длин волн, а также измерения солнечного магнитного поля. В настоящее время SoHO, в числе прочего, – основной источник изображений короны Солнца в оптическом диапазоне, получаемых на расстояниях от 1,5 до 6 солнечных радиусов (коронограф LASCO/C2) и на расстояниях от 3,7 до 30 солнечных радиусов (коронограф LASCO/C3). Соответствующие данные являются основным источником информации о корональных солнечных выбросах – крупномасштабных выбросах плазмы из солнечной короны, которые являются одной из главных причин изменений радиационного состояния околоземного космического пространства, а также гео-

магнитных бурь. Оптические коронографы, COR1 и COR2, работают также на космических аппаратах STEREO в составе прибора SECCHI, но поставляют данные в гораздо меньшем объеме, а, кроме того, существенно более низкого качества.

Наконец, аппарат DSCOVR, последний из четырех, работающих в настоящее время в точке  $L1$ , был запущен 11 февраля 2015 г. и выведен в точку Лагранжа примерно через 100 дней после запуска в июне 2015 г. Аппарат несет на борту 3 инструмента, один из которых, PlasMag, предназначен для измерения плазменных параметров и магнитного поля солнечного ветра, а два других, EPIC и NISTAR, осуществляют эксперимент по измерению отраженной от Земли солнечной радиации. Главной целью эксперимента является изучение состава и характеристик верхней атмосферы Земли, а также с целью климатологических исследований теплового баланса в системе «Солнце – Земля».

Можно отметить, что все аппараты, работающие в точке  $L1$ , осуществляют исследования в области гелиофизики и физики солнечно-земных связей. При этом нельзя не обратить внимание, что три из них были выведены в космос более 20 лет назад, изготовлены на частично устаревшей компонентной базе и близки к исчерпанию своего ресурса.

В советской и современной российской истории исследований Солнца и солнечно-земных связей точки Лагранжа в качестве целевых орбит для размещения комплексов аппаратуры ранее не рассматривались. В частности, все три аппарата серии КОРОНАС, а именно КОРОНАС-И (1994), КОРОНАС-Ф (2001) и КОРОНАС-Фотон (2009) выводились на низкие полярные орбиты с высотой в диапазоне 500 – 600 км и наклоном около  $80^\circ$ . Перспективный аппарат «Арка», включенный в Федеральную космическую программу РФ на 2016 – 2025 гг., планируется к размещению на солнечно-синхронной орбите с наклоном около  $5^\circ$  (рассматриваются и иные варианты размещения). В качестве базовой орбиты для еще одного гелиофизического аппарата, «Интергелиозонд», рассматривается гелиоцентрическая эллиптическая орбита с перигелием около 60 радиусов Солнца.

Учитывая объективное устаревание размещенных в точке  $L1$  средств наблюдения, использующихся НАСА и НОАА для прогноза космической погоды, а также ведущуюся дискуссию о необходимости развития в России собственного независимого космического сегмента для контроля солнечной активности и прогноза радиационного состояния околоземного пространства, следует рассмотреть вопрос о возможности реализации такого сегмента на базе космических аппаратов, размещаемых в точках Лагранжа. Выше отмечалось, что в настоящий момент такие аппараты размещаются только в точке  $L1$ . Однако, следует обратить внимание на ряд преимуществ, которыми обладает другая точка Лагранжа –  $L5$ . Такими преимуществами, в частности, являются:

- возможность наблюдения центров солнечной активности за несколько дней до их появления в поле зрения с Земли;

– возможность прямого измерения скорости корональных выбросов массы, направленных на Землю;

– возможность точного измерения характеристик потоков солнечного ветра за несколько дней до достижения ими линии «Солнце – Земля».

В данной работе обсуждаются эти преимущества точки  $L5$  в сравнении с точкой  $L1$ , а также околоземными орбитами, и предлагается оптимизированный комплекс целевой аппаратуры, позволяющий реализовать программу контроля солнечной активности и прогноза состояния околоземного пространства по наблюдениям в точке  $L5$ .

### **Современные методы формирования гелиофизического прогноза**

Методы формирования гелиофизического прогноза претерпели значительные изменения в последние два десятилетия в связи с быстрым развитием космического сегмента (преимущественно зарубежного), позволяющим контролировать значительное число параметров солнечной активности и солнечного ветра, в том числе в режиме реального времени. Некоторые из этих средств, активно используемых в настоящее время НОАА, перечислены выше, в частности, это аппарат ACE, являющийся главным источником данных НОАА по параметрам солнечного ветра, и аппарат SoHO, предоставляющий информацию о выбросах массы из атмосферы Солнца в межпланетное пространство. К этим, уже упомянутым, средствам, можно добавить космический аппарат SDO (НАСА), являющийся в настоящее время основным мировым источником высококачественных изображений короны, хромосферы и поверхности Солнца, а также группировку аппаратов GOES, предоставляющих в режиме реального времени информацию о солнечных вспышках. И SDO и аппараты GOES функционируют на геосинхронных орбитах.

Отметим, что до появления космических средств прямые измерения параметров солнечного ветра были, в принципе, недоступны. Что касается измерения параметров солнечной активности, то наблюдения с Земли возможны лишь в окнах прозрачности земной атмосферы, основным из которых является оптическое окно в диапазоне длин волн от 0,3 до 2 мкм, а также радиодиапазон с длинами волн от 1 мм до 15 – 30 м. В оптической области спектра основным элементом солнечной активности являются солнечные пятна. С Земли также возможно проводить измерения напряженности магнитного поля в пятнах по расщеплению оптических спектральных линий вследствие эффекта Зеемана. Наземные наблюдения солнечных пятен и их магнитных полей показали, что существует связь между конфигурацией пятен и их вспышечной производительностью. Эти наблюдения, в частности, легли в основу магнитной классификации солнечных активных областей, разработанной в обсерватории Маунт-Вилсон (США). Активные области по этой системе делятся на 8 классов. Первым из них является тип «альфа», представляющий собой область с одним или несколькими солнечными пятнами одной магнитной полярности, затем идет тип «бета» – два пятна или группы двух разных полярностей, затем «гамма» – область с пятнами разных полярностей, кото-

рые перемешаны между собой и не могут быть разделены на две простых группы. Остальные 5 классов представляют собой комбинацию этих трех простых групп. Для каждого класса может быть сопоставлена определенная вероятность солнечных вспышек, что длительное время составляло основу прогноза. При этом для классов «альфа» и «бета» эта вероятность находится около нуля, то есть эти области вспышки почти не производят.

В радиодиапазоне солнечные пятна и их магнитные полярности измерены быть не могут. Основным источником радиоизлучения Солнца является циклотронное излучение свободных электронов, вращающихся вокруг линий магнитного поля в короне Солнца. Частота этого вращения зависит только от напряженности магнитного поля  $B$  и составляет

$$\omega = eB/m_e c, \quad (1)$$

где  $e$  и  $m_e$  – заряд и масса электрона;  $c$  – скорость света.

Соответствующие длины волн радиоизлучения могут быть найдены по формуле

$$\lambda = 2\pi c/\omega = 2\pi m_e c^2/eB. \quad (2)$$

Характерными значениями магнитного поля в короне являются  $B = 10$  Гс, что соответствует спокойной короне вне активных областей, и  $B = 1000$  Гс, что соответствует магнитным полям над солнечными пятнами. Для этих двух значений  $B$ , получаем:

$$\begin{aligned} \lambda &= 10,7 \text{ м для спокойной короны и} \\ \lambda &= 10,7 \text{ см для спокойной короны.} \end{aligned}$$

Основное радиоизлучение солнечной короны, таким образом, лежит в диапазоне 10 см – 10 м.

Длина волны радиоизлучения 10,7 см представляет интерес, так как по своей природе должна коррелировать с числом пятен на Солнце, так как формируется магнитными полями над пятнами. Это позволяет в отсутствие оптических наблюдений пятен примерно оценивать их число и общую площадь. Практические измерения подтверждают это – график изменения радиоизлучения Солнца на длине волны 10,7 см хорошо коррелирует с многолетним графиком изменения числа солнечных пятен. По этой причине в отсутствие иных данных этот параметр ранее иногда использовали для оценки числа солнечных активных областей. Такая замена весьма неравнозначна. Прежде всего, величина магнитного потока, с которой коррелирует излучение 10,7 см, не содержит информации о топологии и полярности магнитного поля. Вместе с тем, именно топология поля, как сказано выше, в первую очередь влияет на вероятность солнечных вспышек. В частности, области типа «альфа» и «бета», как отмечалось, не производят вспышек ни при ка-



ких значениях потока и, соответственно, излучения 10,7 см. Кроме того, изменения индекса могут быть связаны с вращением Солнца, в результате которого новые пятна появляются в поле зрения с Земли на восточном краю Солнца, а старые исчезают (уходят на невидимую сторону) на западном крае. Такое появление и исчезновение пятен сопровождается скачками на графике радиоизлучения 10,7 см, которое никак не связано с реальным изменением уровня солнечной активности. По этой причине в настоящее время наблюдения в линии 10,7 см для оценки текущего уровня и для прогноза солнечной активности практически не используется. Одним из немногих исключений является наша страна, где до сих пор, в отсутствие космического сегмента и хорошо развитой наземной оптической службы Солнца, поддерживают и даже пытаются развивать модели на основе радионаблюдений в линии 10,7 см.

Современные модели прогноза являются существенно более физическими и опираются на представления, согласно которым воздействие Солнца на Землю и околоземное пространство осуществляется через три основных агента.

Первым из них являются вспышки на Солнце, являющиеся источником высокоэнергичного излучения с длинами волн короче 10 нм, то есть от вакуумного УФ- до рентгеновского и даже гамма-излучения. Данное излучение оказывает заметное воздействие на верхнюю атмосферу Земли, эффективно разрушая двухатомные молекулы  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO$  в земной атмосфере, и затем ионизируя отдельные атомы. Солнечные вспышки также являются источником частиц очень высоких энергий, в том числе солнечных космических лучей, в состав которых входят тяжелые заряженные частицы. Современный прогноз солнечных вспышек базируется на представлениях, согласно которым вспышке предшествует процесс накопления электрической энергии в солнечной короне. Энергия в свою очередь накапливается в результате движений «источников» магнитного поля на поверхности Солнца в силу закона индукции

$$\text{rot} E = - (1/c) \partial B / \partial t, \quad (3)$$

то есть любые изменения в магнитном поле приводят к формированию электрических полей. Таким образом, аккуратно контролируя изменения магнитных полей на поверхности Солнца, можно отслеживать запасы электрической энергии в солнечной короне и прогнозировать вероятность формирования солнечной вспышки и ее балл. В настоящее время существует достаточно большое число таких моделей, среди которых доминируют линейные и нелинейные модели, основанные на бессиловом приближении. Бессиловой называется конфигурация магнитного поля в короне Солнца, удовлетворяющая условию

$$\text{rot } B \times B = 0. \quad (4)$$

Измерения магнитного поля на поверхности Солнца могут осуществляться с Земли по эффекту Зеемана. Для космической погоды, однако, требуется непрерывность наблюдений, которую не могут полностью обеспечить наземные инструменты, даже при объединении их в сеть. Основным источником данных для прогноза солнечных вспышек в настоящее время является телескоп HMI, работающий на борту спутника SDO. Прибор осуществляет измерения поля в оптической линии нейтрального железа Fe I с длиной волны 6173,3 Å. Альтернативным источником данных является прибор MDI на борту спутника SoHO, работающий в линии Ni I 6767,8 Å.

Вторым фактором воздействия на Землю является солнечный ветер. Солнечный ветер – это поток плазмы, состоящий преимущественно из свободных протонов и электронов, свободно расширяющийся от Солнца во всех направлениях, в том числе и в плоскости эклиптики. Измерения солнечного ветра возможны лишь путем размещения космического аппарата непосредственно в нем, то есть путем прямого зондирования характеристик плазмы. Основным космическим аппаратом для таких измерений в настоящее время является аппарат ACE, расположенный, как уже говорилось в точке *L1*. Соответствующие измерения, однако, почти не приспособлены для прогноза, так как скорости быстрого солнечного ветра составляют от 600 км/с, и время на прохождение потока от точки *L1* до Земли составляет около 40 минут. Для особенно высокоскоростных потоков (более 1000 км/с) оно опускается ниже 25 минут. В целом, большинство потребителей данных заинтересовано в существенно более заблаговременных предупреждениях.

Долгосрочный прогноз солнечного ветра основан на наблюдении его формирования вблизи солнечной поверхности с последующим пересчетом измеренных скоростей на уровень орбиты Земли. Хотя прямые удаленные измерения скорости солнечного ветра невозможны, существует надежно установленная связь между крупномасштабной топологией магнитного поля Солнца и скоростью ветра – так называемая модель Ванга – Шили – Арджа (модель WSA). Формула эта работает до расстояний порядка 2,5 радиусов Солнца над поверхностью. Исходными данными для нее являются синоптические карты магнитного поля Солнца, то есть развертка магнитного поля по всем солнечным широтам и долготам, измеренная на протяжении одного солнечного оборота (27 дней). Как правило, команды солнечных магнитографов, стремящиеся к распространению своих данных среди команд «прогнозистов» сами формируют и публикуют в наши дни такие синоптические карты как стандартный продукт наряду с обычными магнитограммами. В частности, такие карты публикует команда SDO/HMI и обсерватория Маунт-Вилсон. Преобразование скоростей ветра от уровня 2,5 радиуса над Солнцем до орбиты Земли раньше осуществлялось итерационными методами. В наши дни развития вычислительной техники на смену им пришли точные гидродинамические модели, наиболее известной из которых является модель ENLIL, которая, в

частности, используется НАСА для операционной поддержки своих гелиосферных и иных миссий.

Так как солнечный ветер является одним из главных факторов воздействия на магнитосферу Земли, то после прогноза его параметров на уровне орбиты Земли возникает задача пересчета полученных значений скорости и плотности в геомагнитные индексы. Наиболее широко применяемым в наше время является геомагнитный индекс  $K_p$ , представляющий собой логарифмическую шкалу, отражающую амплитуду вариаций магнитного поля, измеренных вблизи поверхности Земли. Индекс имеет 10 градаций от 0 до 9, при этом значения от 0 до 3 считаются спокойным состоянием, значение 4 – возмущениями магнитосферы, а значения от 5 до 9 – магнитными бурями от слабого до наивысшего уровня, соответственно. Крупнейшей в современной истории считается магнитная буря 29 октября 2003 г. Последний же раз магнитная буря высшего 9-го уровня была зарегистрирована 24 августа 2005 г. Пересчет параметров солнечного ветра в геомагнитные индексы осуществляется с помощью эмпирических функций связи (coupling functions), в правую часть которых подставляют характеристики ветра, а в левой рассчитывают прогноз индекса  $K_p$ . Одной из наиболее известных функций является функция Ньюелла, которая, в частности, используется в центре прогноза ФИАН. В целом, современный уровень исследований в этой области достиг состояния, при котором возможна полная автоматизация прогноза на основе высокоточного МГД моделирования. Именно таким способом, в частности, формируется широко известный 27-дневный прогноз индекса  $K_p$ . Число дней, 27, соответствует числу дней, по которым строятся синоптические карты, то есть одному обороту Солнца.

Наконец, последним, третьим фактором солнечно-земных связей являются выбросы массы с Солнца. Именно выбросы вещества являются, в частности, главной причиной магнитных бурь и полярных сияний. Магнитные бури, связанные с солнечным ветром, почти никогда не превышают уровень  $K_p = 6 - 7$ . Наиболее сильные магнитные бури уровня  $K_p = 8 - 9$  всегда связаны с выбросами массы. С точки зрения физики, плазма солнечных выбросов не отличима от плазмы солнечного ветра за исключением существенно более высоких скоростей и плотностей вещества. По этой причине расчет движения выбросов от Солнца к Земле осуществляется в рамках тех же гидродинамических моделей, что и расчет солнечного ветра, например, в рамках модели ENLIL. Точность прогноза при таком подходе зависит от точности определения начальных параметров выброса, в особенности его скорости. Основным способом измерения этих параметров являются изображающие наблюдения Солнца с помощью телескопов и, особенно, коронографов. Как уже упоминалось, для целей прогноза космической погоды в настоящее время применяются данные коронографа LASCO на борту SoHO. Поддержка этих данных осуществляется солнечными телескопами AIA на борту аппарата SDO.

### **Комплекс аппаратуры для КА в точке Лагранжа $L5$**

Размещение аппаратуры в точке  $L5$  может быть более предпочтительным для формирования гелиофизического прогноза, чем традиционное размещение в точке  $L1$ . Точка  $L5$  расположена на орбите Земли в 60 градусах от линии «Солнце – Земля» в направлении, противоположном вращению Солнца. Угловая скорость вращения Солнца при периоде 27 дней составляет  $13,3^\circ/\text{сутки}$ . Это означает, что при вращении Солнца активные области и группы пятен появляются в поле зрения научной аппаратуры в точке  $L5$  на 4,5 суток раньше, чем в поле зрения аппаратуры в точке  $L1$ . Это, в частности, позволяет начать расчет энергии солнечных вспышек существенно раньше, чем по данным наблюдений с линии «Солнце – Земля», что способствует повышению точности их прогноза. Еще одним преимуществом является возможность заблаговременных прямых измерений солнечного ветра. Источники солнечного ветра, как известно, «привязаны» к поверхности Солнца и вращаются вместе с ним. По этой причине потоки быстрого солнечного ветра совершают оборот вокруг Солнца за 27 дней, что, в частности, является причиной так называемых рекуррентных (повторяющихся) магнитных бурь, которые повторяются с таким шагом иногда в течение нескольких оборотов Солнца. При размещении аппаратуры в точке  $L5$  поток солнечного ветра, вращающийся вместе с Солнцем, проходит через аппарат на 4,5 дня раньше, чем он достигнет линии «Солнце – Земля», откуда сможет оказывать воздействие на Землю. Это предоставит принципиально новые возможности для среднесрочного прогноза геомагнитной обстановки, основанные на прямых измерениях, в отличие от текущих моделей, основанных на расчете и прогнозе скоростей солнечного ветра. Наконец, точка  $L5$  является существенно более благоприятной для измерения скоростей выбросов солнечной массы, направленных на Землю. Для аппарата в точке  $L1$  выброс, направленный в сторону Земли, выглядит движущимся на аппарат. При такой ориентации компонента скорости, направленная на Землю, измерена быть не может. В настоящее время она восстанавливается косвенным образом, по измерению тангенциальных компонент скорости и их пересчету в продольную скорость в рамках предположения о форме выброса. Обычно он считается сферическим или эллиптическим. Для аппарата в точке  $L5$  выброс, движущийся к Земле, распространяется почти в картинной плоскости. Это значит, что вектор скорости выброса, направленный на Землю, может быть прямо измерен.

Совокупность описанных преимуществ является достаточным основанием для серьезного рассмотрения вопроса о комплексе средств для размещения в точке  $L5$ .

Комплекс инструментов, необходимый для измерения минимального набора гелиофизических параметров, приблизительно был очерчен выше при описании основных моделей гелиофизического прогноза.

Таблица 1

**Характеристики приборов, использующихся для прогноза НОАА**

<b>Прибор, назначение</b>	<b>Размещение, орбита</b>	<b>Основные характеристики</b>
AIA, солнечный телескоп	Аппарат SDO, геостационарная орбита	Число каналов (спектральных диапазонов) – 10: 450 нм; 170 нм; 160 нм; 33,5 нм; 30,4 нм; 21,1 нм; 19,3 нм; 17,1 нм; 13,1 нм; 9,4 нм. Угловое разрешение – 0,6'' на пиксель. Размер детектора: 4096 × 4096 пикселей.
LASCO, оптический коронограф	Аппарат SoHO, точка L1	Число каналов – 3: C1 – от 1,1 до 3,0 радиусов Солнца; C2 – от 1,5 до 6,0 радиусов Солнца; C3 – от 3,7 до 30 радиусов Солнца. Диапазон – оптический. Размер детектора: 1024 × 1024 пикселей.
HMI, магнитограф	Аппарат SDO, геостационарная орбита	Число каналов – 2: – оптический телескоп; – магнитограф. Угловое разрешение – 0,5'' на пиксель. Размер детектора: 4096 × 4096 пикселей.
SWEPAM, монитор солнечного ветра	Аппарат ACE, точка L1	Диапазоны измерения энергии: ионы – от 0,26 до 36 кэВ; электроны – от 1 до 1350 эВ.
MAG, магнитометр межпланет- ного магнитного поля	Аппарат ACE, точка L1	Число детекторов – 2. Диапазон измерения: от 0 до 65536 нТ. Точность – 0,1 нТ. Способ размещения – штанги на расстоянии 4,2 м от центра КА.
XRS, монитор солнечных вспышек	Аппарат GOES, геостационарная орбита	Число каналов – 2: Канал 1: от 0,5 до 4 Å; Канал 2: от 1 до 8 Å. Временное разрешение – 1 мин. Диапазон классов вспышек: от A0,1 до X20.

Перечислим эти инструменты еще раз:

1. Солнечный телескоп вакуумного УФ-диапазона – получение изображений солнечной короны в режиме реального времени.

2. Солнечный коронограф оптического диапазона – для измерения характеристик корональных выбросов массы на расстояниях до 10 – 30 радиусов Солнца.

3. Солнечный магнитограф оптического диапазона – для получения простых и синоптических карт магнитного поля на поверхности Солнца.

4. Монитор солнечного ветра.

5. Магнитометр межпланетного магнитного поля.

6. Детектор солнечных вспышек.

Приблизительно такой набор инструментов используется в настоящее время НОАА. Ниже, в табл. 1, представлены названия и характеристики фактически использующихся приборов.

Все инструменты работают в режиме непрерывного получения и передачи данных.

Модификация данного набора в приложении к точке  $L5$  производилась с целью упрощения этого комплекса, что связано с тремя основными причинами. Прежде всего, точка  $L5$  является достаточно удаленной орбитой, которая накладывает более жесткие ограничения на массу научной аппаратуры, чем точка  $L1$ . Вторая причина состоит в том, что некоторые из приборов, используемых НОАА, разрабатывались не только для прикладных, но и для фундаментальных научных приложений. По этой причине для прикладного проекта некоторые их характеристики являются избыточными. Наконец, при формировании комплекса учитывался опыт отечественных гелиофизических исследований и показанные в этих экспериментах инструментальные возможности. В некоторых случаях, однако, такое упрощение было необоснованным. Во-первых, часть инструментов в наборе НОАА была выведена на орбиту более 20 лет назад и имеет устаревшую базу. Современные комплектующие (в основном, новые типы детекторов) позволяют реализовать такие же измерения с существенно лучшими характеристиками. Кроме того, в некоторых случаях улучшение характеристик не приводит к повышению стоимости прибора. Например, ПЗС-детектор с размером  $2046 \times 2046$  пикселей отличается по стоимости от детектора  $1024 \times 1024$  пикселей на 10 – 20 тысяч евро, что является незначительным увеличением на фоне характерной стоимости космической миссии, но при этом позволяет повысить детализацию измерений в 4 раза. С учетом всех этих факторов комплекс приборов был определен в следующем виде (табл. 2).

Оптический солнечный коронограф никогда прежде не разрабатывался в истории отечественных гелиофизических исследований. При разработке данного прибора может быть заимствована базовая конструкция телескопа LASCO, который на настоящий момент отработал на борту спутника SoHO в точке Лагранжа  $L1$  уже 23 года при планируемом сроке 3 года. Размер ПЗС-детектора увеличен до  $2048 \times 2048$  пикселей против  $1024 \times 1024$  пикселей на LASCO. Новый размер детектора более соответствует современным комплектующим, а кроме того, совпадает с размером детектора, выбранного для телескопа, что позволяет унифицировать узлы детектора двух инструментов. Ко-

ронограф упрощен за счет исключения канала  $C1$ , работавшего в диапазоне высот от 1,1 до 3 радиусов Солнца. Данный канал не эффективен для задач космической погоды. Отметим, что разработка оптического коронографа ОКА ведется в рамках проекта «Интергелиозонд», включенного в ФКП РФ на 2016 – 2025 гг. (разработчик – ФИАН). Задел соответствующего ОКПР может быть использован в предлагаемой программе.

Таблица 2

**Рекомендованные характеристики приборов для гелиофизического комплекса  $L5$**

Прибор, назначение	Основные характеристики
Телескоп $L5$	Число спектральных диапазонов – 3: 30,4 нм; 17,1 нм; 13,1 нм. Угловое разрешение – $1,7''$ на пиксель. Размер детектора: $2048 \times 2048$ пикселей.
Коронограф $L5$	Число каналов – 2: $C2$ – от 1,5 до 6,0 радиусов Солнца; $C3$ – от 3,7 до 30 радиусов Солнца. Диапазон – оптический. Размер детектора – $2048 \times 2048$ пикселей.
Изображающий магнитограф $L5$	Число каналов – 2: – оптический телескоп; – магнитограф. Угловое разрешение – $1,7''$ на пиксель. Размер детектора: $2048 \times 2048$ пикселей .
Монитор солнечного ветра $L5$	Диапазоны измерения энергии: ионы – от 0,1 до 3,7 кэВ.
Магнитометр межпланетного магнитного поля $L5$	Число детекторов – 2. Диапазон измерения: от 0 до 300 нТ. Точность – 0,1 нТ. Способ размещения – штанги на расстоянии 5 – 10 м от центра аппарата (расчетный параметр, зависящий от характеристик КА).
Монитор солнечных вспышек $L5$	Число каналов – 20: Канал 1: от 0,5 до 4 Å; Канал 2: от 1 до 8 Å. Каналы 3 – 20: устанавливаются программным способом. Временное разрешение – 10 сек. Диапазон классов вспышек: от A0.001 до X20.

Солнечный магнитограф оптического диапазона никогда в отечественной истории не разрабатывался в космическом исполнении. Наземные магнитографы, которыми, в частности, оснащен ряд российских обсерваторий, как правило, не могут быть перенесены на борт космического аппарата из-за существенной разницы в размерах, массе и условиях функционирования.

В рамках ОКР «Интергелиозонд» разрабатывается оптический магнитограф «Тахомаг» (разработчик – ИЗМИРАН), однако его характеристики не позволяют использовать его для гелиофизического прогноза – прибор имеет большую массу (является самым тяжелым прибором комплекса научной аппаратуры «Интергелиозонд»), а главное, имеет ограниченное поле зрения и не позволяет наблюдать весь солнечный диск. Более удачным прототипом является Polarimetric and Helioseismic Imager (PHI), разработанный по заказу европейского космического агентства для космического аппарата Solar Orbiter (планируется к запуску в феврале 2020 г.). Инструмент состоит из двух каналов, один из которых предназначен для детального измерения магнитных полей в узком поле зрения, подобно «Тахомаг», а второй наблюдает полный солнечный диск. Характеристики этого канала приняты нами за базовые для инструмента в точке  $L5$ . При этом поле зрения инструмента было уменьшено с  $2^\circ$  до  $1^\circ$ .

В части детектора плазмы солнечного ветра в качестве прототипа принят прибор БМСВ, разработанный Институтом космических исследований РАН в рамках эксперимента ПЛАЗМА-Ф, проводившегося на борту КА «Спектр-Р». Этот прибор является прототипом для ряда других инструментов, в частности планируется к размещению на КА «Луна-Глоб». Прибор представляет собой плазменный спектрометр на базе детекторов-цилиндров Фарадея. В качестве зарубежного примера одновременного использования цилиндров Фарадея можно привести прибор SWE на аппарате WIND. Инструмент PLS с аналогичным принципом действия, состоявший из двух разнонаправленных детекторов на основе цилиндров Фарадея, был установлен также на аппаратах «Вояджер-1» и «Вояджер-2». Именно на основе данных мониторинга окружающей среды с инструмента PLS на аппарате «Вояджер-2» НАСА в 2018 г. сообщило о выходе аппарата в межзвездное космическое пространство. По отношению к прибору SWEPAM на аппарате ACE прибор для комплекса  $L5$  упрощен за счет исключения канала регистрации электронов и снижения максимальной энергии регистрации ионов.

Для непрерывного измерения межпланетного магнитного поля предполагается использовать хорошо зарекомендовавшие себя в космическом применении феррозондовые датчики магнитного поля. Такие датчики не подвержены воздействию радиации и используются практически в составе каждого космического аппарата либо для определения и поддержания ориентации, либо для научных целей. В нашей стране наибольший опыт разработки и проведения исследований магнитных полей в космосе имеет ИКИ РАН. Соответствующие эксперименты проводились институтом, в частности, в рамках проекта ИНТЕРБОЛ. В настоящее время приборы схожей конструкции и назначения разрабатываются для проектов «Луна-Ресурс ОА» и «Интергелиозонд».

Регистрация солнечных вспышек в мягком рентгеновском диапазоне спектра, аналогичная данным GOES, в нашей стране проводилась на борту аппарата КОРОНАС-ФОТОН с помощью прибора «Сфинкс», разработанного сов-



местно Центром космических исследований Польской академии наук (ЦКИ ПАН) и Физическим институтом им. П. Н. Лебедева Российской академии наук (ФИАН). Детектирующим элементом прибора являлся твердотельный полупроводниковый детектор типа SDD (Silicon Drift Detector). Такой тип детектора имеет ряд преимуществ перед кремниевыми фотодиодами, которые используются в приборе GOES/XRS. Главным преимуществом является более высокая чувствительность, благодаря которой в ходе эксперимента «Сфинкс» регистрировались вспышки, на несколько порядков более слабые, чем порог регистрации GOES. Более высокая чувствительность позволяет более корректно оценивать балл солнечных вспышек, а также общую энергетику вспышечной активности. Данный прибор был выбран в качестве базового прототипа для решения задач мониторинга солнечных вспышек в точке L5.

### **Обсуждение результатов и выводы**

Современные методы исследования космической погоды основываются почти исключительно на космических средствах измерения. Часть этих средств расположена на орбитах, позволяющих проводить непрерывные измерения состояния межпланетного пространства и солнечной активности и передавать соответствующие данные в режиме реального времени. Такими возможностями, в частности, обладают аппараты ACE, SDO, GOES (все – НАСА). Часть космических средств не передает данные в режиме онлайн, но обладает уникальными инструментами, которые не имеют аналогов на других аппаратах. К таким средствам, в частности, относится обсерватория SoHO, на борту которой работает оптический коронограф LASCO – основной мировой источник данных о выбросах массы с Солнца.

Основными потребителями этих данных являются мировые центры прогноза космической погоды, в частности NOAA/SWPC (США), MetOffice (Великобритания), RRA/KSWC (Корея), BOM/IPS (Австралия), ROB (Бельгия), а также центр NASA/CCMC для операционной поддержки космических миссий.

В нашей стране космический сегмент для мониторинга космической погоды отсутствует, хотя много лет ведутся разговоры и необходимости его развития и создания. Можно отметить, что, хотя большинство перечисленных выше зарубежных данных в настоящее время распространяются открыто, в РФ почти не известны и системно не применяются современные методы моделирования космической погоды, в частности модели WSA и ENLIL. Одним из основных способов оценки уровня солнечной активности до сих пор являются наземные радионаблюдения в линии 10,7 см.

Часть зарубежных средств, а именно ACE и SoHO, выведены на орбиту более 20 лет назад и в значительной степени устарели.

Основными орбитами для размещения средств гелиофизического мониторинга в наши дни являются геостационарная орбита и точка Лагранжа L1. Такие орбиты имеют ряд преимуществ, но не свободны от недостатков. В частности, на геостационарной орбите, находящейся внутри магнитосферы Земли, невозможны измерения параметров солнечного ветра и межпланетно-

го магнитного поля. Что касается точки  $L1$ , то из-за близости ее к Земле возможность заблаговременного прогноза по прямым измерениям среды ограничена временами 20 – 40 минут. Кроме того, при расположении аппарата в точке  $L1$  отсутствует возможность прямого измерения вектора скорости выбросов солнечной массы, направленного на Землю.

Данные недостатки могут быть преодолены при размещении комплекса аппаратуры для гелиофизического мониторинга в точке Лагранжа  $L5$ , расположенной в  $60^\circ$  от линии «Солнце – Земля» в направлении, противоположном движению Земли по орбите. В точке  $L5$ , в отличие от  $L1$ , возможно построение равновесной устойчивой орбиты, не требующей корректировки маневрами аппарата. Наблюдения Солнца из этой точки позволяют обнаруживать центры солнечной активности за несколько дней до того, как они появляются в поле зрения с Земли. Выбросы корональной массы, движущиеся на Землю, наблюдаются из точки  $L5$  почти в картинной плоскости, что позволяет надежно измерять компоненту скорости выброса вдоль линии «Солнце – Земля». Кроме того, прямые измерения среды в этой точке позволяют сформировать достоверный прогноз плазменного состояния в окрестностях Земли и состояния земного магнитного поля за 4,5 суток до наступления события.

Полный комплекс гелиофизических измерений в точке  $L5$  может быть реализован шестью инструментами, а именно:

- солнечный телескоп вакуумного УФ-диапазона;
- солнечный коронограф оптического диапазона;
- солнечный магнитограф оптического диапазона;
- детектор плазмы солнечного ветра;
- магнитометр межпланетного магнитного поля;
- детектор солнечных вспышек.

Большинство инструментов имеют отечественные аналоги, ранее использовавшиеся в космических миссиях. Характеристики инструментов для гелиофизического мониторинга в ряде случаев могут быть упрощены по сравнению с их аналогами, разрабатывавшимися для фундаментальных космических исследований. Рекомендованные по итогам такого рассмотрения характеристики инструментов были приведены выше в статье в табл. 2.

Масса комплекса целевой аппаратуры составляет менее 200 кг. Энергопотребление – менее 80 Вт. Важной частью такого проекта являются вопросы вывода аппарата на целевую орбиту. Ранее в 2009 году через точку  $L5$  была проведена обсерватория НАСА «STEREO-B». С 2013 по 2015 г. вблизи точки  $L5$  находился космический телескоп «Спитцер» (Spitzer Space Telescope). По этой причине, хотя вопросы баллистического построения не входят в рамки данной работы, полагаем, что их можно решить, в том числе взяв за основу баллистические схемы двух упомянутых миссий.

Исходя из опыта создания отечественных целевых приборов схожего назначения, можно заключить, что срок разработки представленного комплекса гелиофизических инструментов может составлять от 4 до 5 лет. Сроки

реализации всего проекта могут быть оценены лишь после выбора конкретной космической платформы, а также определения баллистической схемы миссии.

### **Литература**

1. Шувалов В. А., Яковлев А. А. Мониторинг формирования и развития активных областей невидимой стороны Солнца из треугольных точек Лагранжа // Тезисы докладов Четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ». – 2016. – С. 192 – 194.
2. Шувалов В. А., Яковлев А. А., Никитин Е. А. Мониторинг развития активных областей невидимой поверхности Солнца из треугольной точки Лагранжа // Космонавтика и ракетостроение. – 2016. – № 8 (93). – С. 87 – 97.

## РАЗРАБОТКА ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ КМОП ДЛЯ СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ

<sup>1</sup>Г. И. Вишневский, <sup>1</sup>М. В. Четвергов,  
<sup>2</sup>М. Г. Выдревич, <sup>2</sup>А. Г. Попов, <sup>3</sup>В. С. Лобанов  
<sup>1</sup>АО «НПП «ЭЛАР», г. Санкт-Петербург,  
<sup>2</sup>АО «НПП «СИЛАР» г. Санкт-Петербург,  
<sup>3</sup>АО «ЦНИИмаш», г. Королев, Московская область

АО «НПП «ЭЛАР» разрабатывает, изготавливает и поставляет фоточувствительные микросхемы ФПЗС для специальных систем. Вместе с тем бурное развитие технологии и схемотехники КМОП, приводит к постепенному вытеснению ФПЗС-технологии с рынка фотоприемных устройств. В связи с этим в 2015 г. компании АО «НПП «ЭЛАР» и АО «НПП «СИЛАР» создали дизайн-центр, а также организовали участки сборки и тестирования фоточувствительных КМОП-микросхем на основе действующего сертифицированного производства фотоприемников АО «НПП «ЭЛАР».

За прошедший с начала работ период в инициативном порядке было разработано и поставлено несколько видов фоточувствительных КМОП-микросхем.

Характеристики первого разработанного КМОП-фотоприемника приведены в табл. 1 (первый сенсор).

Кристалл разработан в двух модификациях: модификация А с ячейкой с повышенной зарядовой вместимостью и модификация В с ячейкой с повышенными крутизной выходного устройства ячейки и спектральной чувствительностью. Исследованная спектральная зависимость в диапазоне 200 – 1000 нм представлена на рис. 1. На рис. 2 представлены изображения с цифрового и аналогового выходов сенсора.

Первые сенсоры модификации «В» исследовались на устойчивость специальным воздействующим факторам. В рамках этого исследования сенсоры подвергались воздействию протонов и гамма-излучения.

Исследование на устойчивость к воздействию протонов проводилось на двух образцах, размещенных в корпусе без входного окна. Первый опытный образец облучался протонами с энергией 18 МэВ и флюенсом  $6 \times 10^{10}$  частиц/см<sup>2</sup>, второй образец облучался протонами с энергией 18 МэВ и флюенсом  $6 \times 10^{11}$  частиц/см<sup>2</sup>.

В результате воздействия у первого образца зафиксировано изменение среднего темнового сигнала в 15 раз. Количество элементов, сигнал которых отличался от среднего значения сигнала по полю сенсора более чем в 2,5 раза, не зафиксировано. У второго образца средний темновой сигнал увеличился в 75 раз. Количество белых точек, превышающее среднее значение сигнала по полю сенсора более чем в 2,5 раза, не зафиксировано. Также на втором образце после облучения зафиксировано появление белых мерцающих точек (дефект типа «случайный телеграфный сигнал»).

Таблица 1

**Основные характеристики некоторых из разработанных  
фотоприемных КМОП-микросхем**

Название параметра	Тип фотоприемника			
	Первый сенсор	Сенсор для ФПУ	Микросхема для астроориентации	Микросхема для спец. камеры
Формат фотозоны	640 × 480	1280 × 1024	1024 × 1024	720 × 540
Шаг пиксела	14 мкм	14 мкм	16 мкм	14 мкм
Количество транзисторов ячейки	5	5	3	5
Тип затвора	Global	Global	Rolling	Global
Наличие АЦП	12 бит	Нет	12 бит с возможностью получения 14 разрядного сигнала	12 бит
Корпус	Планарный	Без корпуса, входит в состав ФПУ	Герметичный с охлаждением кристалла	Планарный, герметичный
Интерфейс управления	—	—	SPI	SPI
Другие особенности	Аналоговый выход	Октогональный фотодиод, коэффициент заполнения 60%	Динамический диапазон 72 дБ	Коэффициент светозащиты больше 500

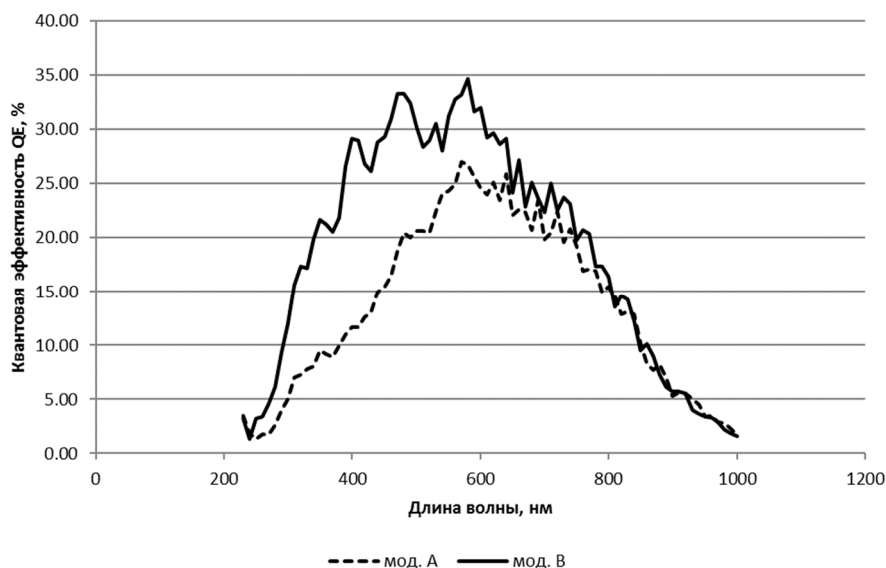
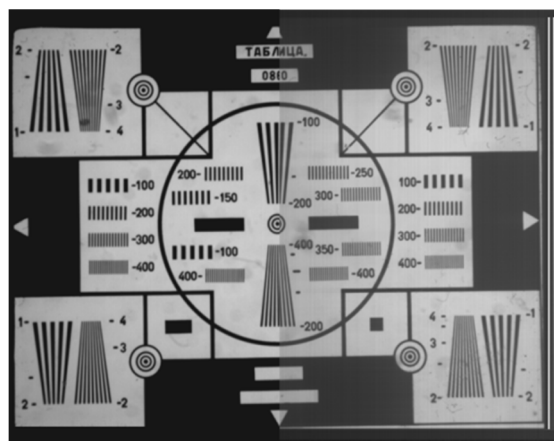


Рис. 1. Квантовая эффективность КМОП-сенсора (2-я версия) мод. А и В



**Рис. 2. Изображение, полученное с первого КМОП-сенсора с цифрового (слева) и аналогового (справа) выходов (06.2017)**

Исследование на устойчивость к воздействию гамма-излучения проводилось в два этапа: на первом этапе три образца подвергались воздействию гамма-излучения с суммарной накопленной дозой  $6 \times 10^4$  рад; на втором этапе два образца с наиболее похожими параметрами после первого этапа подвергались повторному воздействию с дозой  $6 \times 10^4$  рад. Суммарная накопленная доза образцов после второго этапа составила  $1,2 \times 10^5$  рад.

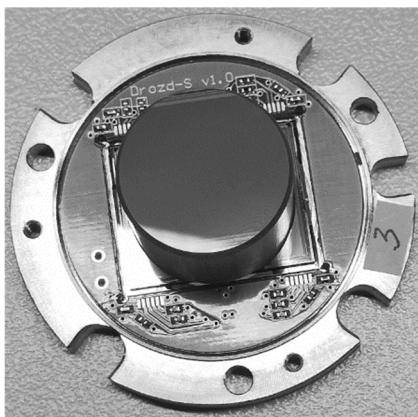
После первого этапа испытаний средний уровень темнового сигнала, относительно значений до облучения, изменился в 20 раз. После второго этапа зафиксировано увеличение среднего уровня темнового тока еще в 3 раза. Белых кластерных дефектов или вновь образовавшихся белых точечных дефектов не зафиксировано.

Испытываемые образцы показывают высокую стабильность после облучения протонами и гамма-излучением. Результаты облучения гамма-излучением показывают, что у экспериментального сенсора, спроектированного с использованием стандартных библиотек, изменение темнового сигнала составляет 850 эл/с на 1 крад. Для сравнения, у сенсора Star1000, спроектированного с использованием специальных решений, направленных на увеличение радиационной стойкости, этот параметр составляет 425 эл/с на 1 крад.

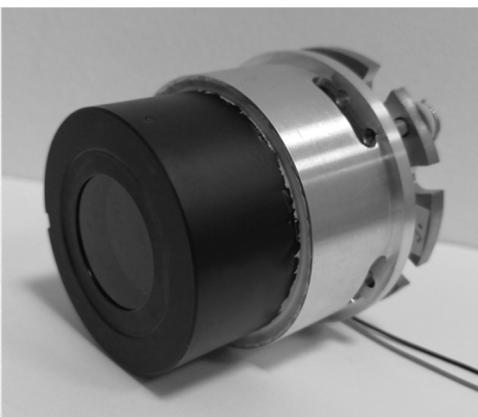
В рамках инициативной работы были разработаны, получены и включены кристаллы для сочленения с ЭОП для работы в составе камеры в условиях низкой освещенности. Конструктивные особенности кристалла приведены в табл. 1 (Сенсор для ФПУ). На рис. 3 представлен кристалл с интегрированной волоконно-оптической шайбой перед сочленением с ЭОП.

На данный момент работа завершена и образцы ФПУ переданы заказчику для создания камер ночного видения.

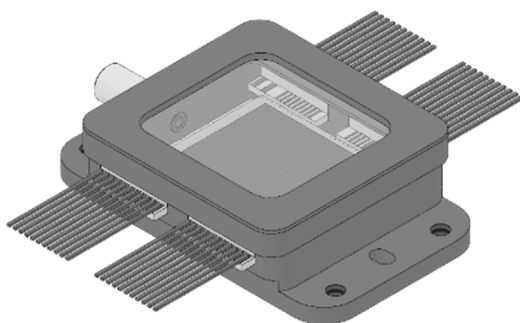
Компании АО «НПП «ЭЛАР» и АО «НПП «СИЛАР» непрерывно совершенствуют и расширяют номенклатуру имеющихся приборов.



**Рис. 3. Фотоприемник со смонтированной оптоволоконной планшайбой для сочленения с ЭОП (03.2018)**



**Рис. 4. Опытный образец ФПУ (06.2018)**



**Рис. 5. Микросхема для аппаратуры астроориентации**

Компании разработали кристалл для работы в составе аппаратуры астроориентации. Одной из особенностей разработанного прибора является возможность включения кристалла в уже имеющемся герметичном корпусе с элементом Пельтье для охлаждения кристалла и дополнительного повышения его радиационной устойчивости. Также конструкция фотоячейки имеет конструкцию, оптимизированную для работы в условиях аппаратуры астроориентации, так как имеет распределенную апертурную характеристику. Основные конструктивные и технические характеристики разработанного кристалла приведены в табл. 1 (микросхема для астроориентации). В 2019 г. АО «НПП «ЭЛАР» был переработан имеющийся в наличии корпус для увеличения угла визирования и уменьшения массы микросхемы.

По запросу от заказчика был разработан кристалл с увеличенным коэффициентом светозащиты (микросхема для спец. камеры).

До сегодняшнего дня в разработанных кристаллах использовался рамповый столбцовый АЦП. Как показывает анализ зарубежной документации и собственный опыт разработки, этот типа АЦП наиболее удобен в большинстве стандартных задач, которые выполняют фотоприемные кристаллы. Однако существуют области, в которых его использование связано с рядом сложностей или требует изменения концепции работы АЦП. В связи с этим компаниями был проработан первый вариант дельта-сигма АЦП, использование которого позволит увеличить кадровую частоту фотоприемников до нескольких сотен кадров в секунду.

Все представленные выше кристаллы были разработаны по технологическому процессу с нормами 350 нм. Этот процесс является достаточно устойчивым к специальным воздействующим факторам, однако накладывает ограничения по размеру используемых логических элементов. В связи с этим в 2019 г. компаниями совместно был проработан тестовый кристалл по технологии с нормами 180 нм. Использование этого технологического процесса позволяет применять логику с уровнем питания 1,8 В, что положительно сказывается на энергопотреблении кристалла и систем обработки, а также позволяет проектировать фоточувствительные ячейки с размером меньше 10 мкм. Разработанный кристалл имеет следующие особенности и характеристики:

Название параметра	Значение
Формат фотозоны	368 × 288 пикселей
Шаг пикселя	6,5 мкм
Количество транзисторов ячейки	4(rolling shutter), 5 (global shutter)
Тип затвора	Rolling/Global
Наличие АЦП	14 бит
Тип АЦП	Дельта-сигма
Корпус	Планарный

Разработка кристалла завершена и на текущий момент проект изготавливается на фабрике. Готовые кристаллы будут получены в первом квартале 2020 г.

Компания АО «НПП «ЭЛАР» активно сотрудничает в области перспективных разработок аппаратов специального назначения. Совместно с АО «ЦНИИмаш» и ООО «НПП Астроориентир» в инициативном порядке был проработан перспективный звездный датчик для малых КА.

Одним из наиболее существенных факторов миниатюризации 3Д является объединение фотоприемного устройства и блока вычислителя в едином корпусе. Блок вычислителя имеет корпус, как правило из алюминиевого сплава, с толщиной стенок от 2 до 3 мм, выступающих в роли экрана для установленных внутри компонент. Внутри корпуса располагаются пассивные элементы для обеспечения функционирования 3Д, корпусированные



процессоры и фотоприемная микросхема. Фотоприемная микросхема монтируется в блок ЗД в собственном вакуум-плотном корпусе, внутри которого установлен элемент Пельтье для охлаждения фотоприемника, и фоточувствительный кристалл. Такая концепция удобна, с точки зрения разработки и изготовления отдельных компонент блока, но приводит к увеличению габаритно-массовых параметров и не подходит для использования в составе микро- и наноспутников. Обсуждаемая концепция разработки более компактной конструкции прибора заключается в том, что в корпус с фотоприемной микросхемой устанавливаются бескорпусные кристаллы вычислительного блока. В таком конструктиве массивный металлический корпус микросхемы с одной стороны увеличится, с другой стороны будет выступать в роли экранирующего элемента для воздействующих на микросхемы частиц космического излучения. Использование бескорпусных микросхем блока вычислителя позволит минимизировать габаритные размеры корпуса прибора.

*Таблица 2*

**Ожидаемые параметры фотоприемного кристалла с обратной засветкой**

Название параметра	Значение
Формат фоточувствительной зоны	2048 × 2048
Шаг пикселя	6,5 × 6,5 мкм
Квантовая эффективность	Не менее 60%
Тип затвора	Скользкий
Зарядовая емкость	Не менее 40 000 электронов
Шум считывания	Не более 5 электронов
Динамический диапазон	Не менее 4000

Другим существенным фактором миниатюризации ЗД является повышение квантовой эффективности ФПУ. Повышение квантовой эффективности приводит к ослаблению требований к объективу в части диаметра входного зрачка и, как следствие, к миниатюризации оптики и бленды ЗД. Наиболее перспективным способом увеличить квантовую эффективность фотоприемника является утонение кристалла для создания фотоприемника с обратной засветкой.

Параметр квантовой эффективности не является предельным, однако для его улучшения требуется серьезная проработка, в том числе развертывание новых производственных площадей, закупка дорогостоящего технологического оборудования, проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. При соблюдении этих условий квантовая эффективность кристалла может быть увеличена до 90%.

### Литература

1. Вишневский Г. И., Четвергов М. В., Чепилко Н. С., Выдревич М. Г., Попов А. Г. Производство фоточувствительных КМОП-микросхем // Материалы 14-й Международной конференции «Телевидение: передача и обработка изображений». – 2017. – С. 38 – 39.
2. Вишневский Г. И., Четвергов М. В., Чепилко Н. С., Выдревич М. Г., Попов А. Г. Фоточувствительные КМОП микросхемы // Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли. – 2017. – С. 289 – 291.
3. Вишневский Г. И., Четвергов М. В. Кадровые и ВЗН фотоприемники для космических систем // Тезисы докладов пятой международной конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – 2017. – С. 75.
4. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.datasheetspdf.com/pdf-down/S/T/A/STAR1000-CypressSemiconductor.pdf>, с. 3.
5. Лобанов В. С. , Тарасенко Н. В. , Зборошенко В. Н. , Шариткин Ю. Н. Зарубежные и отечественные оптико-электронные приборы для систем управления движением и навигации микро- и нано- КА // Материалы XIV научно-технической конференции «Системы наблюдения, мониторинга и дистанционного зондирования Земли». – Москва, 2017. – С. 164 – 169.
6. Minsong Wei, Jingyu Bao. System-on-f-chip based nano star tracker and its real-time image processing approach / Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing, China, August 9, 2016.

## ПЕРСПЕКТИВЫ СОЗДАНИЯ ГРАВИИНЕРЦИАЛЬНОЙ И ГРАВИГРАДИЕНТОМЕТРИЧЕСКОЙ АППАРАТУРЫ ДЛЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ГЛОБАЛЬНОГО ГЕОДЕЗИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

<sup>1</sup>В. Б. Дубовской, <sup>1</sup>В. И. Леонтьев, <sup>1</sup>И. А. Боев,

<sup>1</sup>В. Г. Жильников, <sup>2</sup>В. Г. Пшеняник

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта

Российской академии наук (ИФЗ РАН),

<sup>2</sup>НИИ космических систем им. А. А. Максимова – филиал АО ГКНПЦ  
им. М. В. Хруничева, г. Королев, Московская область

**Аннотация.** В статье рассмотрены возможности создания высокоточной спутниковой гравиинерциальной и градиентометрической аппаратуры на базе акселерометров с маломоментным упругим подвесом, оптическим датчиком перемещений и магнитоэлектрической обратной связью. Приборы, построенные на этом принципе, использовались для мониторинга гравиинерциальной обстановки на пилотируемых космических станциях «Салют-6», «Салют-7», «Мир», «МКС».

**Ключевые слова:** космические исследования, спутниковый акселерометр, космические геодезические системы, градиентометрия, гравитационное поле Земли, пробная масса.

Наиболее амбициозные разработки с использованием высокочувствительных акселерометров были реализованы в трех очень значимых для геодезии зарубежных спутниковых проектах CHAMP, GRACE и GOCE [1], которые позволили достичь небывалой точности в глобальном определении параметров гравитационного поля Земли (ГПЗ). В каждом из этих проектов использовались различные принципы проведения измерений, включающие в себя компенсацию негравитационных ускорений:

1) CHAMP, GRACE – межспутниковое слежение (измерение дальности и скорости изменения дальности между двумя спутниками);

2) GOCE – спутниковая градиентометрия (измерение разностей ускорений силы тяжести в пределах одного спутника).

Все эти проекты позволили существенно уточнить параметры ГПЗ. Причем каждый из них внес вклад в уточнение модели ГПЗ в определенном диапазоне разложения его потенциала в ряд по сферическим функциям.

Для ликвидации отставания в данной области в АО «ИСС им. академика М. Ф. Решетнева» были проведены комплексные исследования по определению проектного облика многоярусной космической геодезической системы (КГС) «ГЕО-ИК-3», включающей среднеорбитальные и низкоорбитальные

космические аппараты (КА), выполняющие задачи, аналогичные функциям спутников CHAMP, GRACE и GOCE.

Проект создания КГС «ГЕО-ИК-3» может быть реализован только при наличии на борту ее КА гравиинерциальной и гравиградиентометрической аппаратуры с уровнем разрешения порядка  $10^{-10} \dots 10^{-12} \text{ м/с}^2$  и 0,1...0,01 Этвеш (Э) соответственно. Завершенных отечественных образцов такой аппаратуры, выполненных на современном технологическом уровне, к сожалению, не существует.

Ключевым моментом, определяющим возможность реализации перечисленных проектов определения ГПЗ, является разработка высокоточных спутниковых акселерометров – гравиинерциальных датчиков с разрешением  $10^{-9} \dots 10^{-12} \text{ м/с}^2$ .

В настоящее время наилучшие результаты в этой области получены на основе использования акселерометров с электростатической схемой датчиков перемещения пробной массы (ПМ) для измерения гравитационных ускорений, а также в системе компенсации возмущающих ускорений негравитационной природы.

История разработки этого типа акселерометров с левитирующей ПМ в западных странах насчитывает более 50 лет. Кроме того, подобные приборы в настоящее время находятся в стадии разработки в китайском Университете науки и технологии Хуачжун (HUST) [2].

Трудности реализации электростатических акселерометров связаны с чрезвычайно сложной технологией их изготовления и невозможностью их полноценного тестирования в наземных условиях, из-за невозможности достигнуть полноценной левитации ПМ при наличии земной гравитации за счет электростатической компенсации.

К ним стоит добавить существенную сложность контроля углового положения акселерометров и направления осей их чувствительности. В частности, в гравиградиентометрах миссии GOCE в каждом акселерометре контролируется более 12 параметров, а работа всей электростатической системы обеспечивается 36 цепями обратной связи, шумы которых воздействуют на ПМ акселерометров и ограничивают их чувствительность. Реализация подобных акселерометров без достаточного опыта потребует значительного времени и существенных затрат.

С учетом этого, предлагается альтернативная схема построения акселерометров, достаточно хорошо освоенная в нашей стране, с применением более простых технологий и позволяющая полноценно тестировать эти приборы в наземных условиях.

Разработанный спутниковый акселерометр компенсационного типа содержит корпус; маятник с инерционной массой; торсионный подвес; датчик перемещений; систему магнитоэлектрической обратной связи и два ограничителя перемещений маятника, расположенных в центре инерционной массы маятника и вдоль оси вращения маятника, обеспечивающих сохранение работоспособности прибора в условиях действия перегрузок при выведении спутника на орбиту и возможность использования торсионного подвеса маятника с минимальным моментом на скручивание.

Таблица 1

**Технический уровень спутниковых акселерометров  
в составе градиентометров**

	Градиентометр	Разрешение (порог чувствительности) акселерометров
	На базе разработки ИФЗ РАН и НИИ КС имени А.А. Максимова (ТА)	$(1 - 5) \times 10^{-10} \text{ g}$
Зарубежные приборы аналогичного назначения	На основе акселерометров типа «Кактус» фирмы ONERA, проект «Градио», Франция, 1982 г.	$2 \times 10^{-10} \text{ g}$
	На основе акселерометров STAR фирмы ONERA, проект CHAMP, 2000 г.	$3 \times 10^{-10} \text{ g}$
	На основе акселерометров STAR фирмы ONERA, Франция, проект GRACE, 2002 г.	$3 \times 10^{-10} \text{ g}$
	На основе акселерометров Super STAR фирм ONERA и Thales Alenia Space, Франция, проект GOCE, 2009 г.	$2 \times 10^{-13} \text{ g}$

Высокие порог чувствительности, точность и надежность прибора позволяют использовать данный акселерометр для работы в космосе на спутниках различного назначения.

Данная конструкция акселерометра позволяет повысить точность измерения предельно малых ускорений спутника на орбите, с сохранением работоспособности прибора после воздействия больших динамических перегрузок при выведении спутника на орбиту.

По этой же системе построены разработанные в ИФЗ РАН модернизированные гравиметры ГАГ-3М [3], имеющие разрешение  $5 \times 10^{-10} \text{ g}$ , и акселерометры типа ИМУ-128 [4, 5], которые последние 10 лет штатно эксплуатируются на МКС.

В настоящее время на базе этих наработок в ИФЗ РАН совместно с НИИ КС имени А. А. Максимова проводится проектирование более чувствительных спутниковых акселерометров [6] и градиентометров на их основе.

Технический уровень современных акселерометров в составе спутниковых градиентометров приведен в табл. 1. Технические характеристики макетного образца акселерометра ТА (торсионный акселерометр) – в табл. 2.

На рис. 1 приведен внешний вид акселерометра ТА. На рис. 2 – макетный образец гравиградиентометра на основе акселерометров ТА.

Таблица 2

## Технические характеристики акселерометра ТА

Параметр	Значение
Диапазон (два диапазона), g	$8 \times 10^{-5}$ и $8 \times 10^{-4}$
Разрешение, g	$(1 - 5) \times 10^{-10}$
Смещение нуля, g	$10^{-7}$
Нелинейность, %	0,1
Частотный диапазон, Гц	0,1 – 0,001
Температурный диапазон, °C	– 20 ... + 50
Температурный коэффициент масштаба, %/°C	0,01
Потребление, Вт	Менее 0,3
Габариты, мм	$115 \times 55 \times 65$
Вес, г	350

Высокое разрешение акселерометров типа ТА ( $10^{-10}$  g) достигается в результате малой упругой связи подвеса ПМ с корпусом приборов, а также максимально возможного разрешения датчиков перемещения ПМ в их составе.

Эти акселерометры, а значит и гравитационные градиентометры, построенные на их основе, имеют ряд преимуществ по сравнению с зарубежными акселерометрами с электростатическим подвесом ПМ. Это – значительно менее затратная технология изготовления, широкие возможности испытаний в наземных условиях, более простая система определения проекций вектора измеряемых ускорений на оси системы координат, связанные с КА.

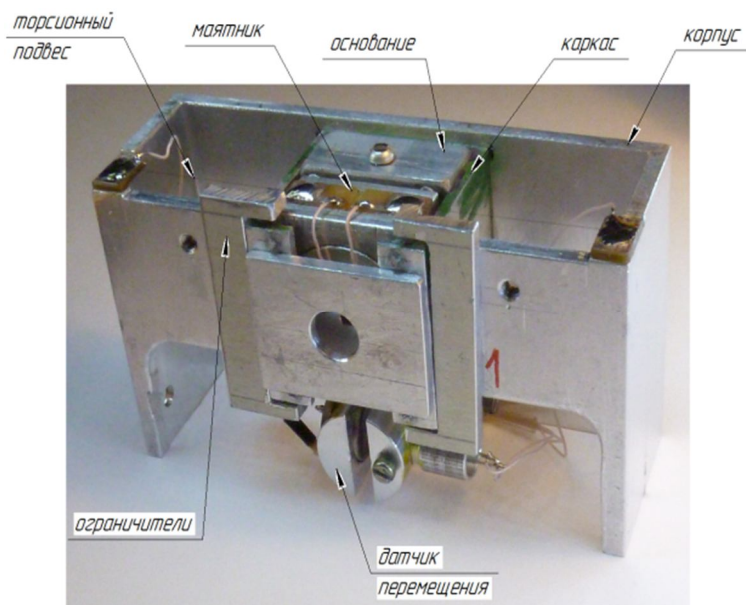
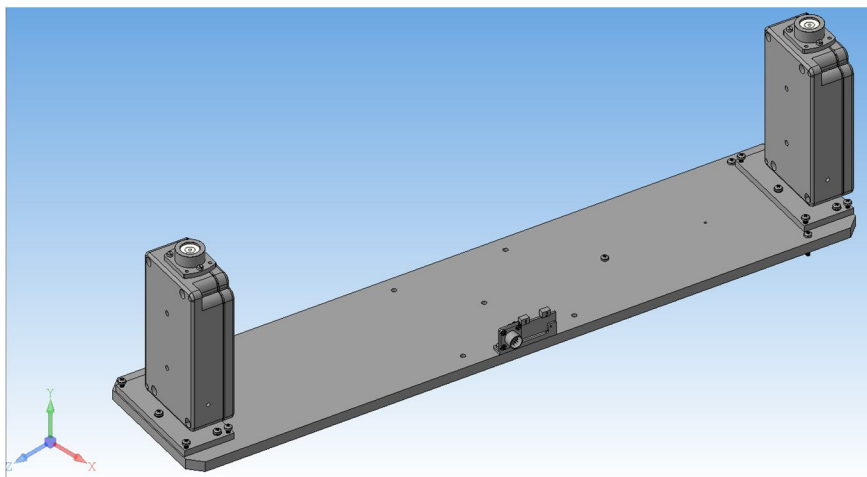


Рис. 1. Акселерометр ТА



**Рис. 2. Макетный образец гравиградиентометра на основе акселерометров ТА**

Для проектируемого акселерометра маятникового типа с торсионным подвесом [6] ТА можно сформулировать два принципиальных условия, не удовлетворив которые невозможно достичь разрешения лучше  $10^{-12}$  g [7].

Первым условием, ограничивающим регистрацию малых ускорений, является ограничение по броуновским шумам, определяемым соотношением:

$$\sigma(x) = \sqrt{\frac{4kT\omega_0\Delta f}{mQ}},$$

где  $\sigma(x)$  – ускорение;  $K$  – постоянная Больцмана ( $1,38 \cdot 10^{-16}$  эрг/°K);  $T$  – абсолютная температура (300 °K);  $\Delta f$  – частота среза регистрируемого сигнала (0,1 Гц);  $m$  – масса пробного тела (60 г);  $\omega_0$  – собственная частота упругой системы, равная 0,01 рад/с, при длине маятника 5 см и удельным упругим моментом торсионной подвески  $W = 0,13$  дн см/рад.

Из приведенного соотношения следует, что шумы акселерометра возможно минимизировать за счет уменьшения собственной частоты колебательной системы и увеличения массы пробного тела.

Для достижения шумов системы до величин менее  $10^{-12}$  g должно соблюдаться условие:  $m > 60$  г при  $\Delta f = 0,1$  Гц.

Другое необходимое условие – достаточное разрешение датчика перемещений ПМ  $\delta x$ , шумы которого не должны провоцировать ускорений более  $10^{-12}$  g. Это условие достигается, когда шумы датчика перемещений не превышают 1 ангстрем (Å).

Теоретические расчеты для основных узлов разрабатываемого акселерометра показали, что их технические характеристики обеспечивают значение порога чувствительности порядка  $10^{-12}$  g.

Торсионный подвес столь малой упругости  $W = 0,13$  дн см/рад и масса пробного тела 60 г обеспечивают возможность полноценного тестирования акселерометра ТА в наземных условиях традиционными методами.

### **Заключение**

Приведенный научно-технический задел позволяет определить перспективы поэтапного создания штатной гравиинерциальной (акселерометров) и гравиградиентометрической аппаратуры для КГС «ГЕО-ИК-3» на базе разработанных спутниковых акселерометров с маломоментной торсионной подвеской маятника, оптическим датчиком перемещений и магнитоэлектрической обратной связи:

- гравиинерциальной аппаратуры с разрешением  $10^{-9}$  м/с<sup>2</sup> среднеорбитального КА (зарубежный аналог – спутник CHAMP) для определения длинноволновых гармоник математической модели ГПЗ – 2021 - 2022 гг.;

- гравиинерциальной аппаратуры с разрешением  $(3 - 5) \times 10^{-10}$  м/с<sup>2</sup> среднеорбитального КА (зарубежный аналог – спутник GRACE) для определения средневолновых гармоник математической модели ГПЗ – 2022 – 2023 гг.;

- гравиградиентометрической аппаратуры с разрешением  $10^{-11} \dots 10^{-12}$  м/с<sup>2</sup> низкоорбитального КА (зарубежный аналог – спутник GOCE) для определения коротковолновых гармоник математической модели ГПЗ – 2024 - 2025 гг.

### **Литература**

1. Touboul P., Willemenot E., Foulon B., and Josselin V. Accelerometers for CHAMP, GRACE and GOCE space missions: Synergy and evolution // Boll. Geof. Tear. App. – 40. – 1999. – P. 321 – 327.
2. Bai Y., Li Z., Hu M., Liu L., Qu S., Tan D., Tu H., Wu S., Yin H., Li H. and Zhou Z. Research and Development of Electrostatic Accelerometers for Space Science Missions at HUST // Sensors. – 2017. – P. 1 – 18.
3. Дубовской В. Б., Леонтьев В. И., Сбитнев А. В. Модернизация гравиметра ГАГ-3 // Гравиметрия и геодезия. – Москва : Научный мир, 2010.
4. Дубовской В. Б. Прецизионное измерение силы тяжести. – Москва : Наука, 1973.
5. Дубовской В. Б. Измерения низкочастотных ускорений. – Москва : Наука, 1981.



6. Патент РФ 2627014. Спутниковый акселерометр / Дубовской В. Б., Леонтьев В. И., Сбитнев А. В., Жильников В. Г., Пшеняник В. Г., заявл. 27.07.2016. Бюл. № 2016130705.

7. Аки К., Ричардс П. Количественная сейсмология: теория и методы. В 2-х т. Пер. с англ. – Москва : Мир, 1983.

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БЛОЧНО-СУБПОЛОСНОГО АЛГОРИТМА СЖАТИЯ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

<sup>1</sup> А. А. Дудкин, <sup>2</sup> Д. Ю. Перцев

<sup>1</sup>Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, г. Минск,

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск

**Анотация.** Представлен блочно-субполосный алгоритм сжатия гиперспектральных данных. Определены основные параметры – зависимость коэффициента сжатия от размера блока в вейвлет-разложении, зависимость коэффициента сжатия от числа кадров между опорными, проведена оценка качества работы алгоритма при сжатии с потерями. При тестировании использовались Фурье-интерферограммы.

**Ключевые слова:** гиперспектральные данные, Фурье-интерферограмма, энтропийное кодирование, вейвлет-разложение, декорреляция.

### Введение

Дистанционное зондирование Земли представляет собой инструмент изучения и постоянного мониторинга планеты, помогающий эффективно использовать и управлять ее ресурсами. Достоинством подхода является возможность получить необходимые данные с больших площадей.

В настоящее время для решения многих научных и прикладных задач ДЗЗ востребованы гиперспектральные спектрометры двух основных типов – дисперсионные и интерференционные. Основным преимуществом применения гиперспектрального оборудования является увеличенное число спектральных каналов, что способствует получению об исследуемых объектах качественно новых и ранее недоступных сведений. Однако увеличение объема передаваемых данных приводит к задаче их сжатия перед отправкой на Землю.

Анализ существующих алгоритмов сжатия, применяемых в ДЗЗ, позволил выделить следующие подходы:

- с применением общеизвестных методик сжатия изображений [1 – 5];
- с адаптацией алгоритмов под заданные условия [6, 7].

В рамках первого подхода чаще всего используются алгоритмы сжатия без потерь и почти без потерь. При этом выделяются следующие основные классы – алгоритмы на основе предсказания [1 – 3], поиск по таблице [4, 5].

Второй подход основан на существенной избыточности получаемых данных и связан с большим спектральным разрешением. Алгоритмы данного класса основываются на следующих упрощениях:

– заведомо известны условия съемки. При этом появляется возможность на борту летательного аппарата удалить неинформативные каналы (например, учесть влияние атмосферы) либо, наоборот, выделить наиболее информативные, т. е. получить мультиспектральные данные;

– выполнить полный либо частичный анализ полученных данных и передавать результат, а не сами данные. Однако реализация данного подхода приемлема на персональном компьютере и затруднена в условиях летательного аппарата из-за вычислительной сложности. В качестве развития данного подхода выделить заведомо определенную область применения, таким образом сужая область применения.

Представленная версия алгоритма относится к первому подходу.

### **Общее описание алгоритма сжатия**

Схема исследуемого алгоритма сжатия представлена на рис. 1 и включает следующие шаги:

**Шаг 1.** Перераспределение потока данных для сжатия.

**Шаг 2.** Выполнение декорреляции по оси  $Z$ .

**Шаг 3.** Выполнение дискретного вейвлет-преобразования.

**Шаг 4.** Выполнение энтропийного кодирования с элементами контекстного моделирования.

**Шаг 5.** Формирование результирующего сжатого потока.

От спектрометра поступает поток сырых данных с восстановлением трехмерной структуры: оси  $X$  и  $Y$  определяют получаемую интерференционную картину, ось  $Z$  – смещение спектрометра в пространстве в результате движения.

В восстановленном гиперкубе выделяются опорные кадры по оси  $Z$  с шагом  $n$  и в то же время каждый кадр разбивается на квадратные блоки фиксированной размерности, равные  $2^r$ , где  $r$  – некоторое число. Недостающая часть кадра при разбиении на блоки заполняется нулями.

Суммарно формируется  $k$  потоков для сжатия:

$$k = \frac{z}{n} \frac{xy}{block\_size} \quad (1)$$

где  $x, y$ , – пространственное разрешение гиперкуба;  $z$  – число каналов,  $block\_size = 2^r$  – размер блока, на который разбивается канал, в пикселях;  $block\_size < \min(x, y)$ ;  $n$  – интервал между опорными кадрами,  $n \in [1, z]$ .

На следующем шаге выполняется декорреляция данных по оси  $Z$ , в качестве которой используется вычитание опорного кадра из всех кадров в потоке, после которой применяется одно из стандартных вейвлет-преобразований (например, вейвлеты 5/3 и 9/7 [8]).

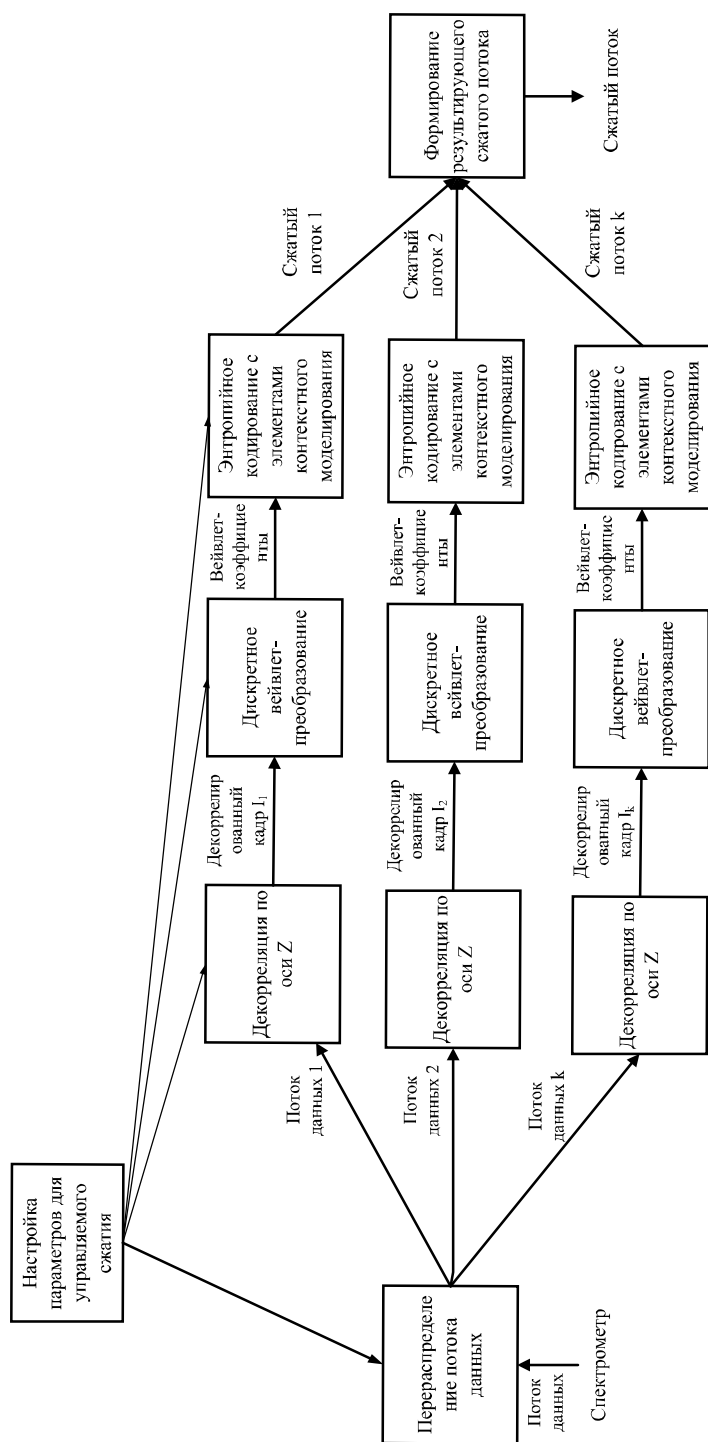
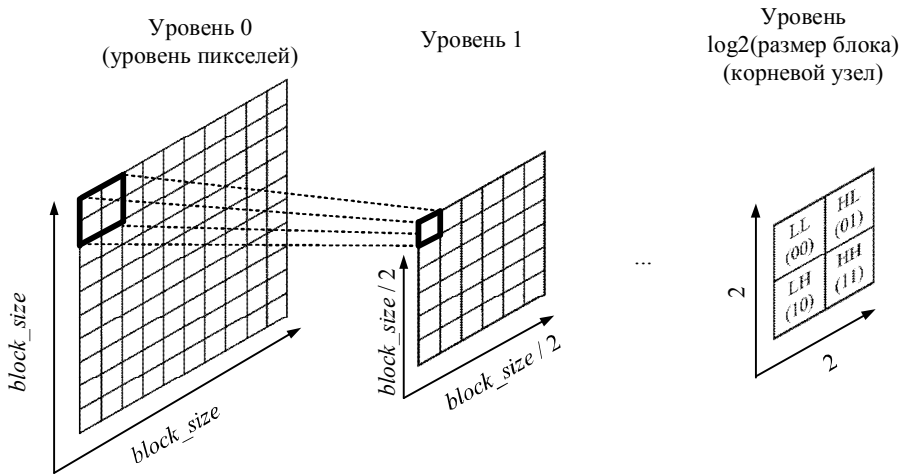


Рис. 1. Схема работы алгоритма сжатия

## Алгоритм энтропийного кодирования с элементами контекстного моделирования

Энтропийное кодирование с элементами контекстного моделирования основано на следующем подходе. Пусть  $C$  – результат вейвлет-преобразования. Для матрицы  $C$  строится пирамида, в которой корневым элементом является самый верхний с размером  $2 \times 2$  элемента. Каждый последующий уровень аппроксимирует и детализирует вейвлет-коэффициенты, расположенные на предыдущих уровнях. В основании пирамиды размещаются оригинальные значения вейвлет-коэффициентов  $\{c_{i,j}\}$ , находящиеся в позиции  $(i, j)$  в преобразованном изображении  $C$  (рис. 2).



**Рис. 2. Структура пирамиды**

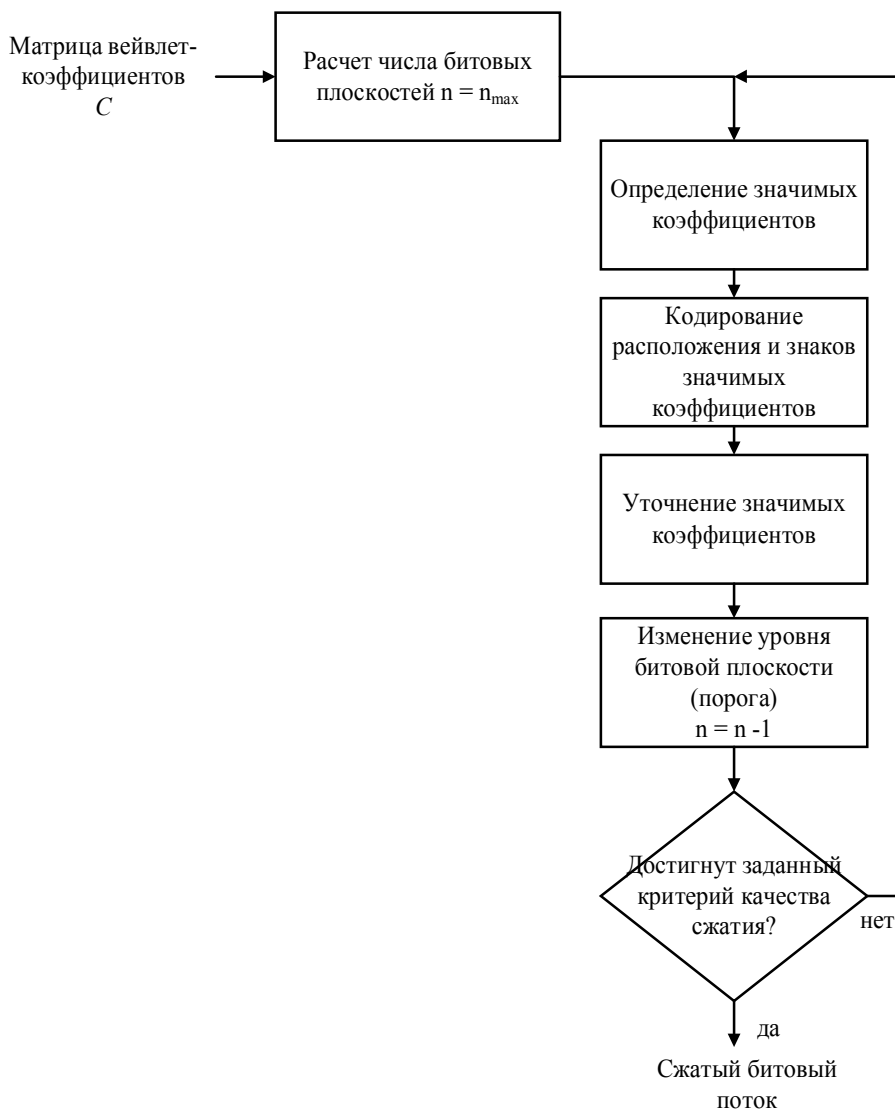
Некоторое множество частотных коэффициентов  $T$  называется значимым по отношению к битовой плоскости  $n$ , если выполняется условие:

$$\max_{(i,j) \in T} \{|c_{i,j}|\} \geq 2^n, \quad (2)$$

где  $c_{i,j}$  – вейвлет-коэффициент с координатами  $(i, j)$ ;  $n = \overline{1, n_{\max}}$  – анализируемый уровень битовой плоскости;  $n_{\max} = \log_2(|c_{i,j}|)$  – максимальное число бит кодового слова вейвлет-коэффициента (максимальный уровень битовой плоскости).

Сущность алгоритма энтропийного кодирования заключается в использовании особенности вейвлет-преобразования – кластеризации энергии. Задача данного этапа – обработка областей с большой энергией, что позволяет закодировать наиболее значимые коэффициенты в первую очередь.

Блок-схема энтропийного кодирования показана на рис. 3.



**Рис. 3. Блок-схема энтропийного кодирования для вейвлет-коэффициентов**

В результате выполнения сжатия формируется битовый поток, соответствующий структуре, показанной на рис. 4.

При этом используются следующие обозначения:

- $n_{\max}$  – максимальный размер битовой плоскости (1 байт);
- $refcount$  – число секций с уточняющими байтами (1 байт);
- $M_k$ ,  $k = [0, refCount]$  – число значащих байт в секции  $k$  (3 байта);
- $sort_k$ ,  $k = [0, refcount]$  – поток значащих байт в секции  $k$ ;
- $N_k$ ,  $k = [0, refcount]$  – число уточняющих байт в секции  $k$  (3 байта);
- $ref_k$ ,  $k = [0, refcount]$  – поток уточняющих байт в секции  $k$ .

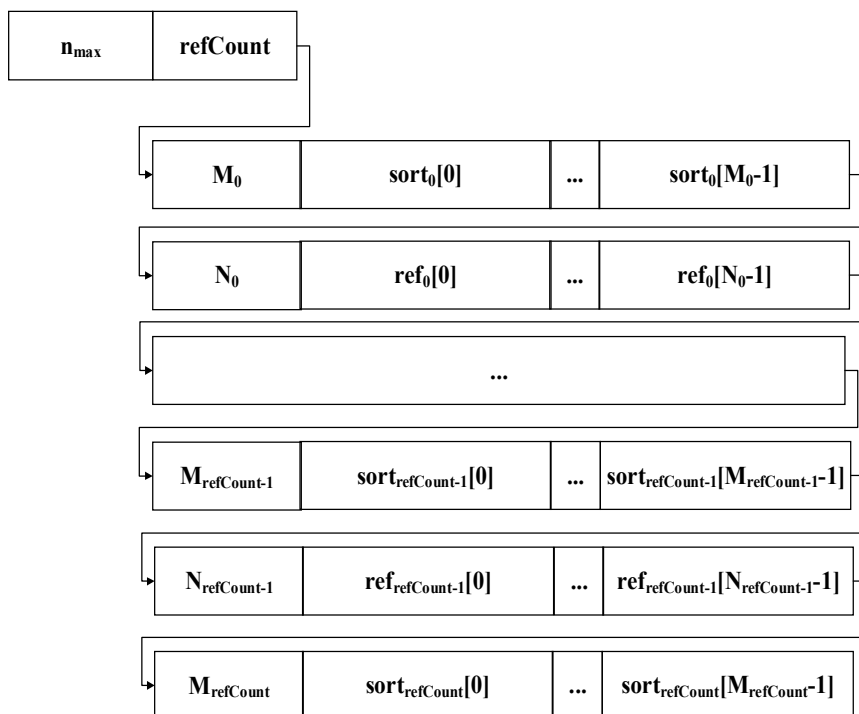


Рис. 4. Структура сжатого потока

### Определение зависимости коэффициента сжатия от уровня вейвлет-разложения и размерности блока

Тестирование разработанного алгоритма сжатия осуществлялось на персональном компьютере со следующими техническими характеристиками:

- Intel© Core i5-3570K (3.40 GHz);
- 12 Gb DDR3 в двухканальном режиме работы;
- SSD диск.

В качестве исходных данных выбраны Фурье-интерферограммы со следующими характеристиками: 256 кадров с пространственным разрешением –  $745 \times 1024$  пикселей, радиометрическое разрешение – 12 бит на пиксель.

Полученный средний коэффициент сжатия в зависимости от размерности блока *block\_size* представлен в табл. 1. Тестирование на других кадрах показывает схожий результат. На основе полученных данных можно сделать вывод, что при сжатии без потерь рекомендуются:

- размер блока  $128 \times 128$  либо  $256 \times 256$  пикселей, так как пропускная способность в этом случае превышает 120 Мбит/с и является максимальной;
- уровень декомпозиции – 4, так как коэффициент сжатия при этом достигает значений, близких к максимально полученному, и в дальнейшем практически не увеличивается.

Таблица 1

**Средний коэффициент сжатия для выборки  
5 подряд идущих кадров (вейвлеты 5/3)**

Уровень вейвлет- разложения	Кадры 1 – 5		Кадры 101 – 105	
	Коэффициент сжатия, раз	Пропускная способность, Мбит/с	Коэффициент сжатия, раз	Пропускная способность, Мбит/с
Размер блока $64 \times 64$ пикселей				
1	1,487	110,300	1,798	119,428
2	1,568	107,814	1,872	116,714
3	1,587	107,071	1,890	116,074
4	1,592	106,935	1,895	115,757
5	1,593	106,162	1,896	115,447
Размер блока $128 \times 128$ пикселей				
1	1,506	127,223	1,820	140,256
2	1,590	124,138	1,896	137,868
3	1,609	123,693	1,915	136,881
4	1,614	121,664	1,920	136,358
5	1,616	122,680	1,922	135,569
6	1,616	122,587	1,922	134,379
Размер блока $256 \times 256$ пикселей				
1	1,512	131,871	1,826	146,013
2	1,596	129,944	1,903	144,450
3	1,616	125,402	1,922	139,676
4	1,621	127,372	1,928	142,700
5	1,622	127,227	1,929	142,648
6	1,622	127,215	1,930	143,009
7	1,623	127,470	1,930	143,224
Размер блока $512 \times 512$ пикселей				
1	1,513	87,066	1,828	98,489
2	1,598	85,272	1,905	95,744
3	1,618	85,611	1,924	97,149
4	1,623	84,752	1,930	95,907
5	1,624	85,565	1,932	94,323
6	1,624	85,166	1,932	96,078
7	1,624	85,232	1,932	95,433
8	1,625	86,114	1,932	95,947



### **Определение зависимости коэффициента сжатия от числа кадров между опорными кадрами**

Для данного теста были выбраны следующие параметры для сжатия: размер блока –  $128 \times 128$ , уровень вейвлет-разложения – 4. Результаты измерения средних коэффициентов сжатия в зависимости от числа кадров между опорными кадрами сведены в табл. 2.

*Таблица 2*

#### **Средний коэффициент сжатия для всего тестового набора в зависимости от числа кадров между опорными кадрами**

Число кадров между опорными кадрами, включая опорный	Коэффициент сжатия для опорных кадров, раз	Коэффициент сжатия всей выборки кадров без учета опорных кадров, раз	Коэффициент сжатия всей выборки кадров с учетом опорных кадров, раз
1	1,503	–	1,503
2	1,503	2,040	1,731
3	1,503	1,985	1,793
4	1,503	1,992	1,842
5	1,503	1,973	1,857
6	1,503	1,968	1,869
7	1,503	1,966	1,882
8	1,503	1,960	1,888
9	1,503	1,956	1,891
10	1,503	1,955	1,898
11	1,503	1,952	1,898
12	1,503	1,951	1,903
13	1,503	1,948	1,903
14	1,503	1,947	1,905
15	1,503	1,945	1,905

Исходя из полученных результатов можно сделать вывод, что межкадровая декорелляция приводит к увеличению коэффициента сжатия до 26% (при числе опорных кадров – 2). При этом рекомендуется обновлять опорный кадр не реже каждого десятого кадра, так как средний коэффициент сжатия всей выборки кадров с учетом опорных кадров достигает значения 1,898 раза и в дальнейшем практически не приводит к увеличению.

#### **Оценка эффективности полученных параметров при сжатии с потерями**

Для тестирования сжатия с потерями использовались вейвлеты 9/7, размер блока –  $128 \times 128$  пикселей, уровень вейвлет-разложения – 4. Результаты тестов представлены в табл. 3 и близки к результатам, полученным при применении вейвлетов 5/3, что положительно сказывается при разработке универсальной версии алгоритма.

Таблица 3

**Средний коэффициент сжатия с потерями для всего тестового набора**

Размер блока	Опорный кадр			Последующие кадры		
	Коэф. сжатия, раз	PSNR, дБ	Пропускная способность, Мбит/с	Коэф. сжатия, раз	PSNR, дБ	Пропускная способность, Мбит/с
128	1,485	82,718	94,08	1,650	82,715	100,46
256	1,508	82,726	96,80	2,062	82,720	110,78

**Заключение**

Проведенный анализ эффективности применения блочно-субполосного алгоритма сжатия показал следующие результаты: достигаемый коэффициент сжатия составляет 1,898 раза для всего тестового набора. При этом использовались следующие параметры:

- размер блока  $128 \times 128$  пикселей;
- уровень декомпозиции – 4;
- число кадров между опорными – 10.

В дальнейшем планируется расширение тестовых наборов данных (предполагается включить тесты AVIRIS, LANDSAT, SPOT-4).

**Литература**

1. Rizzo, F. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via linear prediction / F. Rizzo, B. Carpentieri, G. Motta, J.A. Storer // IEEE Signal Processing Letters. – 2005. – Vol. 12. – Issue 2. – P. 138 – 141.
2. Klimesh, M. Low-complexity lossless compression of hyperspectral imagery via adaptive filtering. Technical Report 42 – 163, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. – 2005. – 10 p.
3. Kiely A. B. Exploiting Calibration-Induced Artifacts in Lossless Compression of Hyperspectral Imagery / A. B. Kiely, M. A. Klimesh // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2009. – Vol. 47. – Issue 8. – P. 2672 – 2678.
4. Mielikainen, J. Lossless compression of hyperspectral images using a quantized index to lookup tables / J. Mielikainen, P. Toivanen // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2008. – Vol. 5. – Issue 3. – P. 474 – 478.
5. Lossless compression of hyperspectral imagery via lookup tables with predictor selection [Electronic resource] / SPIE Digital Library. – Режим доступа: <https://www.spiedigitallibrary.org/conference-proceedings-of-spie/6365/1/Lossless-compression-of-hyperspectral-imagery-via-lookup-tables-with-predictor/10.1117/12.690659.short> (Data of access: 10.10.2018).
6. Pizzolante, R. Visualization, band ordering and compression of hyperspectral images / R. Pizzolante, B. Carpentieri // Algorithm. – 2012. – Vol. 5. – P. 76 – 97.
7. Pizzolante, R. Band clustering for the lossless compression of aviris hyperspectral images / R. Pizzolante, B. Carpentieri // ACEEE International Journal on Signal & Image Processing. – 2014. – Vol. 5. – P. 1 – 14.
8. Cohen, A. (1992). Biorthogonal bases of compactly supported wavelets / A. Cohen, I. Daubechies, J.-C. Feauveau / Communications on Pure and Applied Mathematics. – 1992. – Vol. 45. – P. 485 – 560.

## ТЕХНОЛОГИЯ УПРАВЛЕНИЯ ЖИВУЧЕСТЬЮ МКА ДЗЗ ПУТЕМ КОНФИГУРИРОВАНИЯ ЕГО БОРТОВЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ БОРТОВОГО ФУНКЦИОНАЛЬНОГО МОДУЛЯ

Ю. В. Зайченко, А. Н. Черный, В. Г. Поспелов

«НИИ космических систем имени А. А. Максимова» –  
филиал акционерного общества «ГКНПЦ им. М. В. Хруничева»,  
г. Королев, Московская область

**Аннотация.** Малые космические аппараты на практике наглядно показывают свою эффективность в решении задач, которые еще совсем недавно были прерогативой больших космических аппаратов. На повестке дня стоит решение важной проблемы – обеспечение непрерывности выполнения МКА ДЗЗ целевых задач, что актуализирует задачу обеспечения их живучести. Специалисты склоняются к тому, что для решения этой проблемы целесообразно центр тяжести управления живучестью перенести на борт МКА. В статье предлагается один из вариантов автономного управления живучестью МКА путем конфигурирования его бортовых систем. При этом с учетом того, что нагрузка бортового вычислительного комплекса перспективных МКА существенно увеличится, предлагается наличие на борту специализированного бортового функционального модуля, обладающего возможностями парирования возникающих на борту большинства аномальных полетных ситуаций. Описывается модель и технология управления живучестью МКА. Приводится состав методического обеспечения решения задачи управляемой конфигурации бортовых систем на основе математического аппарата многокритериального структурно-функционального синтеза сложных объектов.

**Ключевые слова:** малый космический аппарат, конфигурирование бортовых систем, технология управления живучестью, бортовой функциональный модуль, структурная динамика, проактивное управление, аномальная полетная ситуация.

В перспективах развития мировой и отечественной космонавтики все отчетливее проявляется тренд, связанный с развитием малых космических аппаратов (МКА), включая МКА ДЗЗ, доказывающих на практике свою эффективность в решении задач, которые еще совсем недавно были прерогативой больших космических аппаратов.

В результате начавшегося и интенсивно продолжающегося процесса миниатюризации, применения новых информационных технологий МКА быстро эволюционируют по своим возможностям. Одновременно наблюдается тенденция к повышению сроков активного существования МКА и совершенствованию технологий их использования. На повестке дня стоит решение важной проблемы – обеспечение непрерывности выполнения МКА ДЗЗ целевых задач, что актуализирует задачу обеспечения их живучести.

В поиске решения этой задачи авторы обратили внимание на разработку проблемы интеллектуального управления живучестью МКА ДЗЗ в аномальных полетных ситуациях, проводимую в ЦСКБ-Прогресс. Используя труды таких из-

вестных ученых в этой области, как А. Н. Кириллина, Р. Н. Ахметова и других (например, [1 – 4]), в качестве направления решения задачи обеспечения живучести МКА был выбран путь повышения способности бортовых средств автоматически парировать возникшие на борту аномальные полетные ситуации (АПС) без прекращения выполнения целевых задач с требуемой эффективностью. Перспективность выбранного пути подкрепляется и разработками головного предприятия Госкорпорации «Роскосмос» – ЦНИИМаш (например, [5, 6]).

Продвижение по этому пути может быть обеспечено за счет разработки информационных технологий интеллектуального управления живучестью МКА с гибким перераспределением функций между бортовыми средствами и наземным комплексом управления, в сторону придания первым больших возможностей по автоматическому парированию АПС.

Методической основой для разработки подобной технологии могут стать научные разработки коллектива ученых СПИИРАН, в том числе профессоров Б. В. Соколова, М. Ю. Охтилева, в области прикладной теории проактивного управления структурной динамикой сложных объектов (СЛО), характерным представителем которых можно рассматривать МКА (например, [7, 8]).

В контексте этой теории можно рассматривать технологию обеспечения живучести МКА путем управляемого конфигурирования его бортовых систем (БС), за счет использования имеющихся или созданных на этапе проектирования внутренних ресурсов БС (структурных, функциональных, информационных, вычислительных и пр.).

При этом следует учитывать, что постоянное совершенствование бортовой целевой аппаратуры ведет к лавинообразному увеличению создаваемого ею информационного ресурса, требующего значительных вычислительных мощностей для его обработки и передачи на наземные пункты приема. Иными словами, бортовой комплекс управления МКА ДЗЗ будет функционировать в условиях высоких нагрузок и в этой связи решение задачи интеллектуального управления живучестью МКА ДЗЗ целесообразно передать специализированному бортовому функциональному модулю (БФМ).

Находясь на борту, такой модуль мог бы автономно вести непрерывный интеллектуальный мониторинг состояния БС МКА и выполняемых им целевых задач с целью установления факта возникновения АПС и оперативного их парирования для снижения возможных последствий их проявления. При этом парирование АПС будет заключаться в изменении рабочей конфигурации БС МКА, которое обеспечит своего рода купирование источника или причины возникновения АПС путем формирования измененной технологической цепочки выполнения целевой задачи.

Безусловно, возможности БФМ ограничены и в ряде ситуаций управление живучестью МКА ДЗЗ будет необходимо передавать на наземные средства разработки решения о конфигурировании (НСВРК). С этой целью с борта будет передаваться не только телеметрическая информация, но и информация о принятых БФМ решениях по парированию АПС.

В таких ситуациях НСВРК по полученной информации, а также с использованием дополнительной информации, будут самостоятельно в автоматизированном режиме решать задачу выбора варианта конфигурирования БС МКА с целью парирования АПС. Кроме этого, НСВРК будут осуществлять мониторинг состояния БС МКА и оценивать эффективность проведенного БФМ парирования АПС. При необходимости на борт будут передаваться соответствующие корректирующие работу БФМ управляющие команды.

Таковы основные предпосылки, определившие замысел создания БФМ, автономно управляющего конфигурированием БС МКА в зависимости от возникшей на борту АПС и ее специфики.

Несколько слов в отношении классификации АПС.

Естественно, АПС имеет довольно размытое понятие. Авторами аномальная полетная ситуация трактуется как нарушение функционирования БС МКА, проявляющееся в снижении эффективности выполнения целевой задачи в конкретный момент времени. При этом нарушение функционирования может быть связано с отказами элементов БС и их взаимосвязей, со сбоями в работе программного обеспечения, а также с проявлением отрицательных синергических эффектов. Этим как бы определятся место возникновения АПС, но помимо этого важно учитывать и такой фактор, как скорость распространения АПС внутри системы, которая существенно может усугубить последствия. И здесь возникает противоречие между скоростью распространения АПС и оперативностью системы обеспечения живучести (в нашем случае это БФМ) по выявлению факта возникновения АПС, прогнозированию тенденции ее развития и выработки мер по парированию АПС. Иными словами, необходимо обеспечить превышение оперативности реагирования БФМ на возникшую АПС над скоростью ее распространения. Следовательно, в арсенале БФМ должны быть алгоритмы, различные по оперативности выбора решений на парирование АПС.

В развитии МКА отечественная космонавтика уже имеет определенную статистику в отношении причин, возникавших на борту МКА АПС, специфики их проявления и развития, а также форм и способов их парирования. В этой связи и с учетом того, что задача по созданию высокоинтеллектуальной системы идентификации АПС авторами не ставится, были введены следующие условности:

- для АПС с высокой скоростью распространения имеется достаточная статистика, позволяющая сформировать и заложить в бортовую базу знаний некую совокупность вариантов их парирования. Таким АПС был присвоен классификационный признак «расчетные рассмотренные»;

- для АПС с меньшей скоростью распространения в бортовой базе знаний заложены лишь векторы, определяющие направления поиска вариантов их парирования. Таким АПС был присвоен классификационный признак «расчетные нерассмотренные»;

- остальные АПС рассматриваются как нерасчетные, статистика о них невелика, или ее интерпретация не позволяет определить даже вектор направления их парирования. Применительно к таким АПС для поиска варианта их парирования необходимо будет применять более сложные и вычислительно-затратные

алгоритмы. При этом предполагается, что совокупность таких АПС довольно большая, а последствия их проявления могут отрицательно сказаться на эффективности, вплоть до прекращения, выполнения некоторых целевых задач и даже МКА в целом. Поэтому для обеспечения непрерывности выполнения задач по предназначению БФМ должен обладать способностью парировать и такие АПС, пусть даже часть из них. Парирование остальной части нерасчетных АПС возлагается на НСВРК, которые будут использовать как информацию, поступающую с борта МКА, так различную дополнительную информацию в отношении МКА, его бортовых систем и элементов, отсутствующую в бортовой базе знаний.

В рамках таких условностей авторами рассматривается некий МКА, состояние которого определяется совокупностью параметров ( $X$ ), отображающихся во множество телеметрической информации ( $Y$ ) (рис. 1). Ресурсами БФМ проводится непрерывный ее мониторинг с целью идентификации технического состояния БС МКА ( $E_B$ ) и фиксирования факта возникновения АПС.

При фиксировании такого факта запускается процесс парирования АПС, включающий процедуры идентификации класса ( $i$ ) АПС и выбор способа поиска оптимального варианта конфигурирования БС МКА для ее парирования. При этом, в зависимости от типа АПС ( $АПС_i$ ) этот процесс разделяется на имеет две ветви, обладающие спецификой вычислительных процедур:

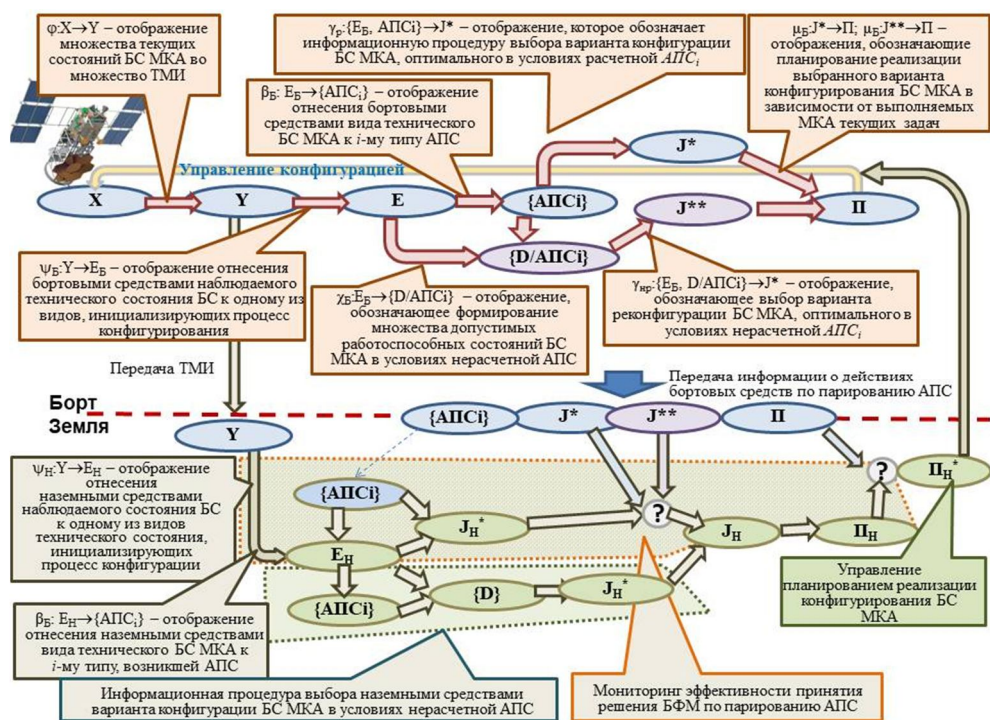


Рисунок 1 - Модель информационно-технологического процесса управления живучестью МКА

Рис. 1. Модель информационно-технологического процесса управления живучестью МКА

– автоматического поиска варианта конфигурации БС в условиях расчетной АПС ( $J^*$ );

– автоматического режима поиска варианта реконфигурации в условиях нерасчетных АПС ( $J^{**}$ ). При этом предварительно с учетом технического состояния  $E_B$  формируется некоторое множество допустимых работоспособных многоструктурных макросостояний БС МКА – проводится **структурно-функциональный синтез допустимого множества новых работоспособных реконфигураций БС МКА**, соответствующих складывающейся (прогнозируемой) обстановке  $\{D/АПС_i\}$ . Затем из этого множества выбирается оптимальный в условиях  $АПС_i$  вариант реконфигурации БС МКА  $J^{**}$ .

Принимая, что МКА, даже в условиях возникшей АПС, должен продолжать выполнение целевых задач, кроме выбора оптимального варианта конфигурации, необходимо предусмотреть процедуру планирования его реализации (П), которая, в конечном итоге, приведет к изменению рабочей конфигурации БС и парированию возникшей АПС с учетом программы полета.

Как уже отмечалось, возможности БФМ все же ограничены и, следовательно, предусматриваются ситуации, при которых БФМ передает управление живучестью на НСВРК.

Авторы предполагают, что БФМ будет передавать управление живучестью на НСВРК при:

- идентификации на борту сложной нерасчетной АПС;
- невозможности реализации выбранного варианта конфигурации бортовых средств.

В этой связи, предусматривается, что периодически в соответствии с сеансами связи с борта на Землю сбрасывается телеметрическая информация ( $Y$ ), а также информация об идентифицированной АПС и проведенном конфигурировании БС ( $АПС_i$ ,  $J^*$ ,  $J^{**}$ ).

С использованием этой информации НСВРК проводится мониторинг состояния БС МКА и оценивание эффективности парирования АПС БФМ. Если будет принято решение о неэффективности его действий, НСВРК с использованием имеющихся информационных и вычислительных ресурсов проводят выбор оптимального, с учетом «собственной» системы предпочтений, решения о конфигурировании БС МКА в условиях идентифицированной АПС ( $J_H^*$ ), формируют план его реализации с учетом программы полета ( $\Pi_H$ ) и передают на борт корректирующие команды ( $\Pi_H^*$ ).

При передаче управления живучестью МКА на НСВРК они по аналогии с работой БФМ самостоятельно оценивают техническое состояние БС МКА ( $E_H$ ), идентифицируют АПС, проводят оптимизацию варианта парирования АПС путем соответствующей реконфигурации БС МКА ( $J_H^*$ ), формируют план реализации и соответствующие управляющие команды для передачи на борт космического аппарата ( $\Pi_H^*$ ).

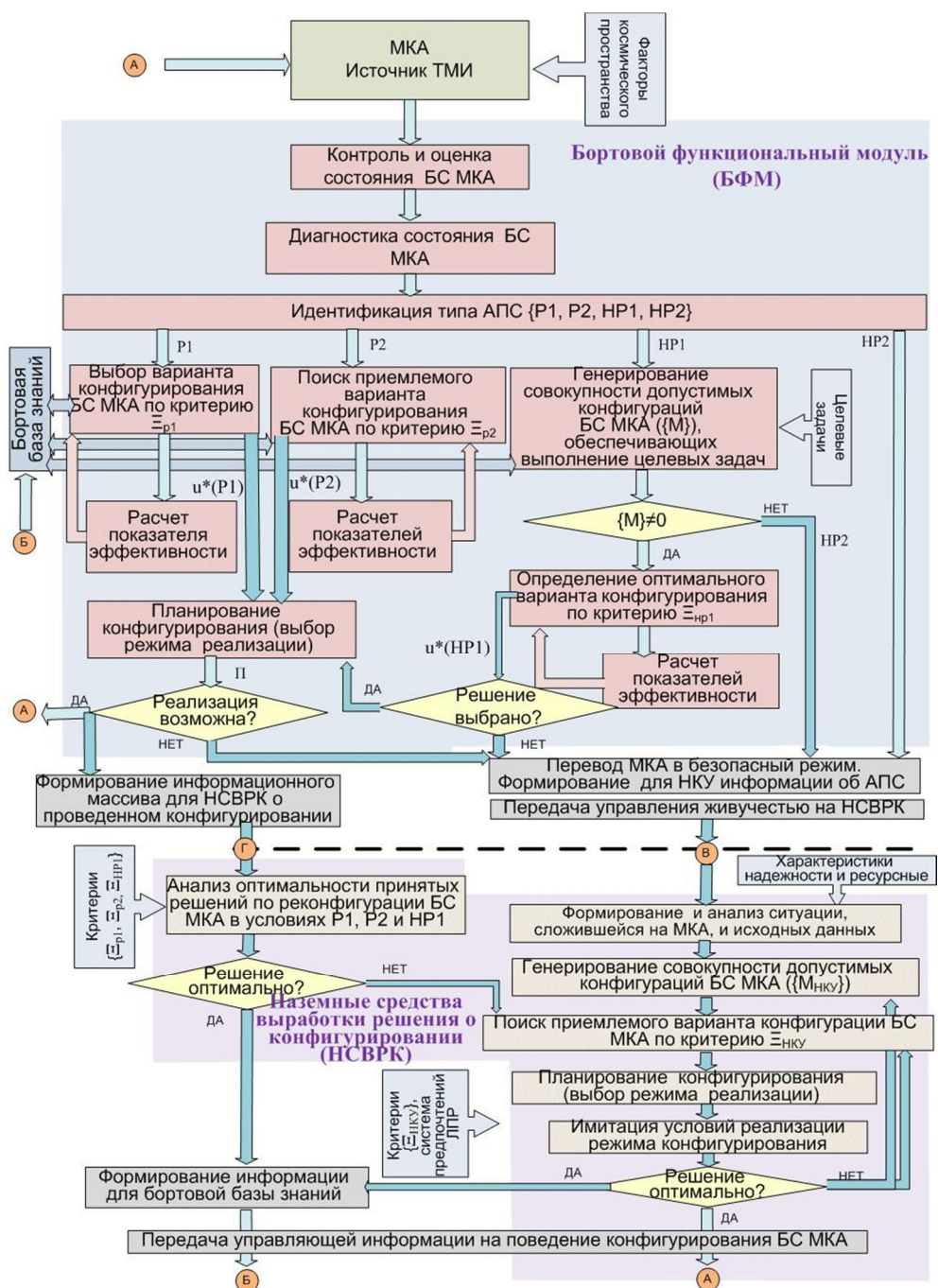


Рис. 2. Функциональная схема технологии управления живучестью МКА



Применительно к такой модели была разработана технология управления живучестью МКА (ТУЖ МКА), представляющая собой информационно-технологический процесс интеллектуального мониторинга состояния БС МКА и качества выполнения целевых задач, выработки оптимальных вариантов парирования БФМ расчетных АПС в автоматическом режиме и с гибким перераспределением задач по парированию нерасчетных АПС между БФМ и НСВРК.

ТУЖ МКА предусматривается, что применительно к типам АПС формируются обобщенные критерии  $\Xi_i$ , выбора стратегии конфигурации БС МКА ( $ui$ ), которая может реализовываться на аппаратном или программном уровнях в виде определенной последовательности логически обусловленных управлений, приводящих к восстановлению штатных функций БС. Например, это управление может проводиться посредством переключения на структурный или функциональный резерв, изменения режимов работы и др. Выбор стратегии реконфигурации  $ui$  индивидуален для каждой из бортовых систем и АПС.

Функциональной схемой ТУЖ МКА (рис. 2) предусматривается, что БФМ непрерывно решается задача контроля, оценивания и диагностирования состояния бортовых систем с целью выявления факта возникновения АПС и последующий ее идентификации.

Идентификация типа АПС является инициирующим событием для запуска процедуры поиска вариантов восстановления работоспособности МКА – парирования АПС.

С учетом ранее приведенного подхода к классификации АПС технологией предусмотрено четыре информационно-технологических процедуры поиска вариантов конфигурирования БС МКА, отличающихся сложностью и быстродействием алгоритмов, а также используемыми показателями и критериями, что определяет оперативность выработки решения.

При идентификации АПС как «рассмотренная расчетная» ( $i = P1$ ) задача БФМ будет заключаться в оперативном выборе из хранящейся в бортовой базе знаний совокупности возможных вариантов конфигурирования БС МКА наиболее оптимального из них по критерию  $\Xi_{P1} u^*(P1)$ . Безусловно, эта совокупность ограничена, чем обеспечится, практически, мгновенный выбор оптимального варианта, если он, конечно, будет найден.

При идентификации АПС как «нерассмотренная расчетная» ( $i = P2$ ) задача БФМ будет заключаться в формировании с использованием более сложных алгоритмов оптимизации приемлемого варианта изменения рабочей конфигурации БС МКА  $u^*(P2)$  по критерию  $\Xi_{P2}$ , обеспечивающего парирование АПС, возможно даже с некоторым снижением эффективности выполнения целевой задачи. При этом оперативность парирования АПС по сравнению с  $P1$  будет, безусловно, несколько ниже.

При идентификации АПС как «нерасчетная» ( $i = HP1$ ) в БФМ также инициализируется процесс ее парирования, на первом этапе которого в ходе решения задачи структурно-функционального синтеза как бы восстанавливают-

ся возможные состояния БС МКА ( $E_B$ ), соответствующие возникшей ситуации, определяемой параметрами  $Y$ .

Затем проводится синтез (генерирование) допустимого множества работоспособных конфигураций БС МКА  $\{M\}$ , обеспечивающих выход из АПС. Для этого используются логико-динамические модели, описывающие процесс функционирования БС МКА и позволяющие смоделировать варианты перехода БС МКА в работоспособные состояния.

Если это множество оказалось пустым (т. е. возникла сложная нерасчетная АПС –  $i = HP2$ ), МКА переводится в безопасный режим и управление живучестью передается НСВРК (выход В).

Затем на совокупности множества  $\{M\}$  проводится выбор оптимального по критерию  $\Xi_{HP1}$  варианта конфигурирования БС МКА  $u^*(HP1)$ .

Во всех вышеописанных ситуациях, по завершению процедуры выбора  $u^*(P1)/u^*(P2)/u^*(HP1)$  решается задача планирования конфигурации БС МКА (выбор программы реализации) и проверяется реализуемость выбранного режима (П).

Если режим П реализуем, то формируются соответствующие управления для парирования АПС (выход А).

В противном случае МКА переводится в один из безопасных режимов, а управления живучестью передается НСВРК (выход В).

В ходе идентификации АПС она сразу же может быть идентифицирована как  $HP2$  (например, аварийная ситуация), что также предполагает перевод МКА в один из безопасных режимов и передачу управления живучестью НСВРК (выход В).

НСВРК при получении информации по входу Г проводят анализ оптимальности принятого БФМ решения по парированию АПС типа  $P1$ ,  $P2$  и  $HP1$  и варианта его реализации с точки зрения ЛПР.

Если с точки зрения ЛПР, принятые БФМ решения окажутся оптимальными, то на борт передается только информация для пополнения базы знаний результатами проведенного парирования АПС (выход Б).

Если же с точки зрения ЛПР, принятые БФМ решения будут признаны не оптимальными, то НСВРК самостоятельно с использованием своих программно-алгоритмических средств и дополнительной информации проводят выбор варианта парирования АПС по критериям  $\Xi_{HKY}$ .

При передаче управления по входу В НСВРК проводят выбор вариантов конфигурирования на основе решения оптимизационной задачи с использованием критерия  $\Xi_{HKY}$ .

При выборе НСВРК оптимального варианта конфигурирования на борт передаются соответствующие управляющие команды (выход А) и информационный массив для пополнения бортовой базы знаний новым вариантом парирования АПС (выход Б).

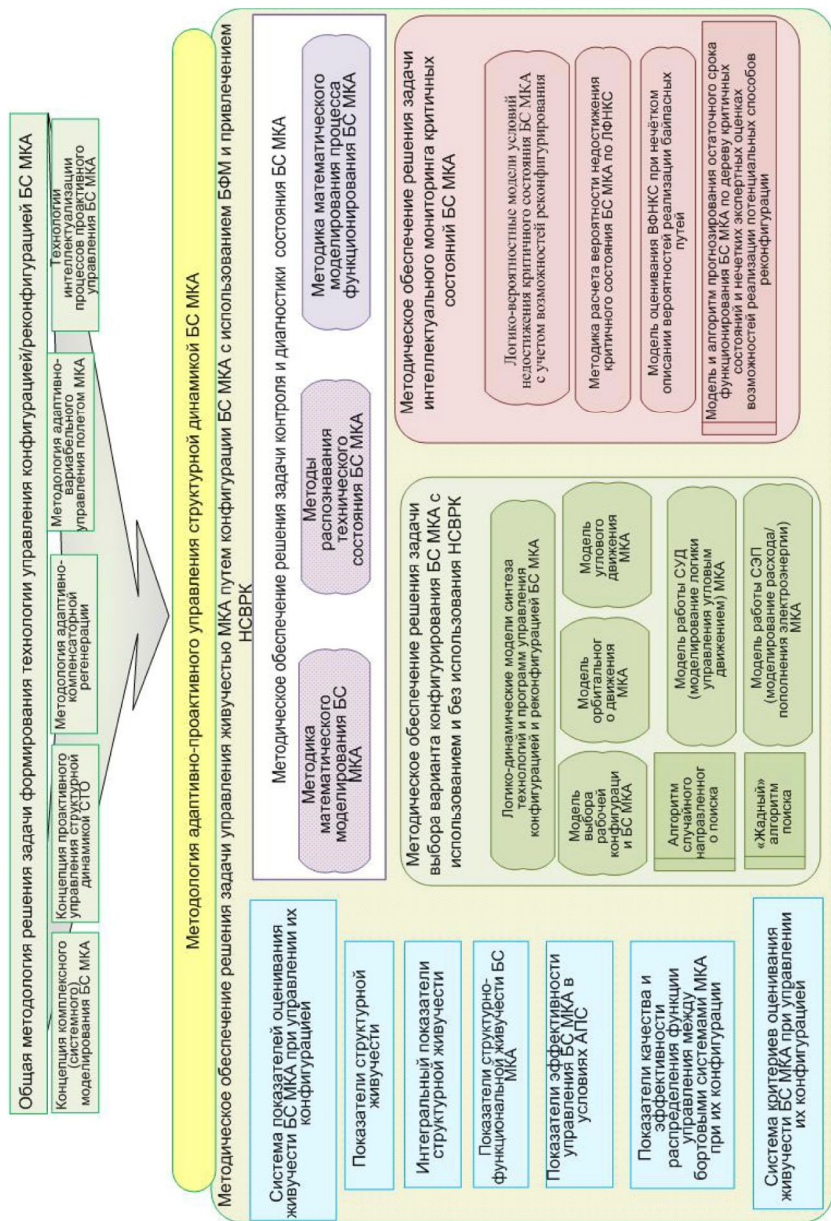


Рис. 3. Методическое обеспечение технологии управления живучестью МКА путем конфигурирования его бортовых систем

Реализации такой технологии предполагается с использованием нового методического обеспечения, разработанного на основе развития теории проактивного управления структурной динамикой СЛО в направлении ее применимости к решению задач анализа и синтеза технологий и программ управляемой конфигурации БС МКА (рис. 3) [9].

Разрешение данной задачи проводится с использованием математического аппарата многокритериального структурно-функционального синтеза СЛО на различных этапах их жизненного цикла. Алгоритм решения этой задачи является центральным звеном ТУЖ МКА [10 – 12].

Авторы предполагают, что наличие на борту специализированного БФМ, функционирующего в соответствии с ТУЖ МКА, за счет автономного управления живучестью МКА ДЗЗ путем конфигурирования его бортовых систем положительно скажется на обеспечении непрерывности выполнения МКА целевых задач с требуемой эффективностью в течение всего срока активного существования. Следует отметить, что выбор варианта конфигурирования будет проводиться с учетом текущего технического состояния БС МКА, равномерности расходования ресурсов элементами бортовых систем, их работоспособности в различных режимах функционирования МКА и прогноза влияния проведенной конфигурации на выполнение программы полета МКА в целом.

*Статья написана по материалам исследования, проводимого по программе Союзного государства «Технология-СТ» в рамках СЧ НИР «Технология-СТ-3.3.3»[13].*

### Литература

1. Ахметов Р. В., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Проблемы реинжиниринга автоматических космических аппаратов в аномальных полётных ситуациях и пути их решения на основе базы знаний // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2014. – № 1 (48). – С. 9 – 21.
2. Ахметов Р. В., Макаров В. П., Соллогуб А. В. Особенности управления живучестью космических аппаратов мониторинга Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2012. – № 4 (35). – С. 18 – 28.
3. Кирилин А. Н. Методы обеспечения живучести низкоорбитальных автоматических КА зондирования Земли: математические модели, компьютерные технологии / А. Н. Кирилин, Р. Н. Ахметов, А. В. Соллогуб, В. П. Макаров. – М.: Машиностроение. – 2010. – 384 с.
4. Ахметов Р. Н. Концепция автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли в аномальных ситуациях / Р. Н. Ахметов, В. П. Макаров, А. В. Соллогуб // Известия Самарского научного центра РАН. – 2009. – Т. 11. – № 3. – С. 165 – 176.
5. Ахметов Р. Н. Методы и модели автономного управления живучестью автоматических космических аппаратов дистанционного зондирования Земли // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. – 2008. – № 2. – С. 194 – 210.
6. Соколов Н. Л., Селезнева И. А., Корниенко Ю. А. Использование интеллектуальных систем в управлении космическими аппаратами // Лестной вестник. – 2015. – № 3. – С. 29 – 36.

7. Соколов Н. Л. Основные принципы диагностики работоспособности бортовой аппаратуры автоматических КА и выработки рекомендаций по устранению нештатных ситуаций // Успехи современного естествознания. – 2007. – № 6. – С. 16 – 20.
8. Охтилев М. Ю., Мустафин Н. Г., Миллер В. Е., Соколов Б. В. Концепция проактивного управления сложными объектами: теоретические и технологические основы // Изв. ВУЗОВ. Приборостроение. – 2014. – Т. 57. – № 11. – С. 7 – 15.
9. Дубровин М. Г., Глухих И. Н. Модели и методы проактивного мониторинга ИТ-систем // Моделирование, оптимизация и информационные технологии. Научный журнал. – 2018. – Т. 6. – № 1. – С. 314 – 324.
10. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Интеллектуальные технологии мониторинга состояния и управления структурной динамикой сложных технических объектов. – М. : Наука, 2006. – 410 с.
11. Охтилев М. Ю., Соколов Б. В., Юсупов Р. М. Теоретические и технологические основы концепции проактивного мониторинга и управления сложными объектами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1(162). – С. 162 – 174.
12. Кулаков А. Ю., Павлов А. Н., Потрясаев С. А., Соколов Б. В. Методы, алгоритмы и технологии реконфигурации бортовых систем маломассоразмерных космических аппаратов // Изв. вузов. Приборостроение. – 2018. – Т. 61. – № 7. – С. 596 – 603.
13. Разработка технологии и создание экспериментальных программных комплексов управления конфигурацией бортовых систем маломассогабаритных КА в интересах повышения их живучести: Научно-технический отчет о СЧ НИР «Технология-СГ-3.3.3.1» (промежуточный) / СПИИРАН: рук. Б. В. Соколов; исполн.: А. Ю. Кулаков [и др.]. – СПб., 2018. – 583 с.

# КОМПЛЕКСНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ МЕЖГЕОСФЕРНЫХ СВЯЗЕЙ НАЗЕМНЫМИ И КОСМИЧЕСКИМИ СРЕДСТВАМИ

<sup>1,2</sup>С. А. Пулинец, <sup>1,2</sup>Л. А. Ведешин

<sup>1</sup>Институт космических исследований РАН, г. Москва,

<sup>2</sup>АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва

## Введение

Неустойчивое состояние окружающей среды, наблюдаемое в последние годы, не находит достойного научного объяснения. Идут постоянные споры, является ли этот процесс результатом антропогенного воздействия, метеорологи и астрофизики предлагают интерпретировать эти изменения, как глобальное потепление, или нам ждать глобального понижения температуры, связанного с аномально низкой активностью Солнца. Фактически мы наблюдаем разбалансировку климата: аномальная жара в Европе и аномальные холода в США, снегопады в пустыне Сахара и катастрофические наводнения в Сибири и на Дальнем Востоке России. Погодные аномалии сопровождаются увеличением количества природных бедствий: увеличение вулканической и сейсмической активности, пожаров, засух и наводнений. В связи с этим международное сообщество приняло Глобальное соглашение по климату (Париж, 2015). В соглашении предусмотрено ограничение повышения глобальной температуры не более чем на 2 градуса Цельсия, желательно – не более, чем на 1,5 градуса, что возможно при условии повсеместного внедрения «зеленых» технологий. Все эти проблемы вызывают необходимость интенсификации системных исследований нашей планеты, где несколько вложенных друг в друга и взаимодействующих оболочек, называемых геосферами, представляют собой систему «планета Земля».

Одним из первых, кто ввел понятие геосфер и обосновал необходимость исследования их взаимодействия, был академик В. И. Вернадский [1]. Помимо геофизических оболочек он предложил включить в состав геосфер биосферу и так называемую ноосферу – пространство существования человеческого разума. Идеи академика Вернадского были поддержаны и развиты академиком Н. П. Лаверовым, который указывал на важность космических исследований в целях развития нашего понимания окружающей среды и устройства мироздания [2]. Особенно важным он считал направление космических исследований, направленное на уменьшение катастрофических последствий природных и техногенных катастроф [3, 4]. Он с энтузиазмом поддерживал первые теоретические работы, посвященные взаимодействию геосфер в рамках решения проблемы краткосрочного прогноза землетрясений [5].

Настоящая работа – это попытка осмысления практических достижений АО «Корпорация «ВНИИЭМ» с точки зрения их возможной интеграции в единую систему мониторинга окружающей среды и околоземного космического пространства и получения новых данных о взаимодействии геосфер с дополнительной поддержкой наземной системы геофизического мониторинга.

## **1. Метеорологические исследования и дистанционное зондирование Земли**

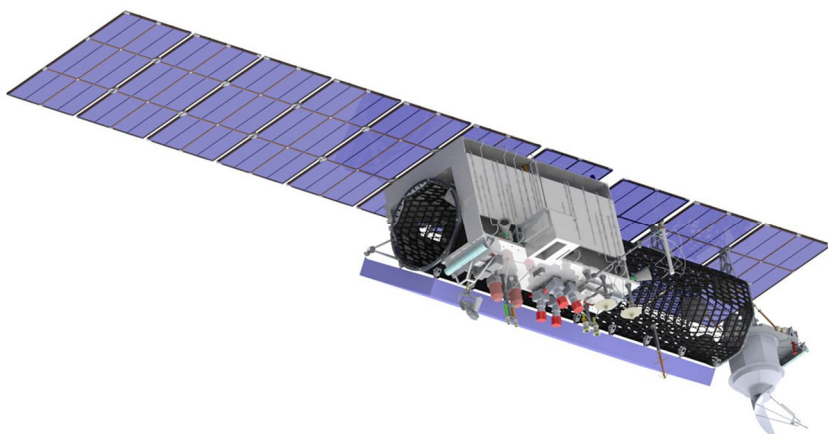
Изучение погоды и климатических изменений на планете с давних пор вызывают большой интерес в связи с влиянием метеорологических явлений и процессов на жизнь и хозяйственную деятельность человека. В настоящее время создана и продолжает развиваться Всемирная глобальная система наземных и спутниковых метеорологических наблюдений. Известные успехи достигнуты в исследованиях по численному моделированию общей циркуляции атмосферы в ее взаимодействии с подстилающей поверхностью (океан, суша, ледяной покров и др.) с целью изучения влияния различных физических факторов, определяющих климат и его изменение на планете. В рамках ВМО реализуется целый ряд комплексных международных программ наземных, морских и космических наблюдений различных процессов, «управляющих» погодой и климатом. С этой целью Правительство РФ Распоряжением от 22 июня 2015 г. № 1143-р утвердило Концепцию федеральной целевой программы «Мировой океан» на 2016 – 2031 гг., в рамках которой планируется проведение Комплексных гидрометеорологических, гидрофизических, геологических, гидробиологических, гидрохимических, экологических и других доступных наблюдений.

Существенный вклад в решение этих вопросов может также внести изучение закономерностей погоды и климата на других планетах, таких как состав атмосфер, свойства облаков, тепловой режим и динамика, химический состав, характеристики поверхности планет, специфики взаимодействия с подстилающей поверхностью.

Российский космический комплекс «Метеор-3М», разработанный ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», является частью мировой системы метеорологического обеспечения и работает на возобновляемой основе. Он включен в международную программу Глобальные наблюдения Земли (GEO). Новый космический аппарат «Метеор-М» № 2-2 был успешно запущен с космодрома Восточный 5 июля 2019 г.

Следует отметить, что при изготовлении новых аппаратов происходит постоянное обновление приборов полезной нагрузки и конструкции космических аппаратов. Так, аппарат «Метеор-М» № 3 будет являться первым аппаратом нового поколения, конструкция которого будет кардинально отличаться от предыдущих аппаратов серии «Метеор-М». На рис. 1 представлен внешний вид спутника «Метеор-М» № 3.

Специальный океанографический аппарат «Метеор-М» № 3 готовится к запуску в 2021 г. Аппараты позволяют проводить мониторинг подстилающей поверхности суши и океана в различных диапазонах спектров электромагнитного излучения, следить за состоянием облачного покрова, ледовой обстановки. С помощью микроволновых и инфракрасных зондировщиков измеряются вертикальные профили содержания влаги и температуры атмосферы. Получаются также данные о солнечной активности и корпускулярных излучениях в околоземном космическом пространстве.



**Рис. 1. Космический аппарат «Метеор-М» № 3**

Если в создании аппаратов для гидрометеорологического мониторинга у АО «Корпорация «ВНИИЭМ» имеется многолетний опыт, то мониторинг космической погоды – это новое направление для корпорации. Можно, конечно, упомянуть аппараты «Татьяна-2» и «Ломоносов», создававшиеся для МГУ, но это были микроспутники, где основное внимание уделялось исследованию корпускулярных излучений, и в меньшей степени параметрам околоземной плазмы.

В то же время проблема мониторинга космической погоды является очень важной по многим причинам, одной из которых являются обнаруженные эффекты ее воздействия на погоду и климат нашей планеты.

## **2. Мониторинг околоземного космического пространства в рамках проекта «Ионозонд – 2025»**

Если смотреть на проблему исследования космической погоды с точки зрения концепции взаимодействия геосфер, то следует отметить, что при моделировании гидрометеорологических процессов не учитывается ряд факторов, обусловленных взаимодействием атмосферы с другими геосферами нашей планеты, заключающемся как в воздействии сверху (вариации параметров солнечного ветра и другие спорадические проявления солнечной активности – космическая погода, так и в воздействии снизу (тектоническая и геохимическая активность, процессы в биосфере Земли). Именно на необходимость учета взаимодействия геосфер указывал академик Н. П. Лаверов [6].

В качестве примеров таких воздействий можно упомянуть изменение глобальной циркуляции атмосферы во время сильных геомагнитных возмущений, воздействие вариаций потоков галактических космических лучей на облакообразование, возникновение крупномасштабных тепловых аномалий перед сильными землетрясениями, антропогенное воздействие на погоду и климат и др., а периоды высокой гелиогеофизической актив-



ности в бортовых системах КА появляются неисправности, что вызывает нарушения в получении и оперативном обмене информацией, а также сокращает время целевого использования КА. В эти периоды также возрастают ошибки прогнозирования движения КА, наблюдаются временные задержки при прохождении сигналов спутниковых систем ГЛОНАСС и GPS.

Для примера воздействия солнечной активности на атмосферные процессы приведем зависимость индекса глобальной циркуляции атмосферы от знака сектора межпланетного магнитного поля, рис. 2 [7].

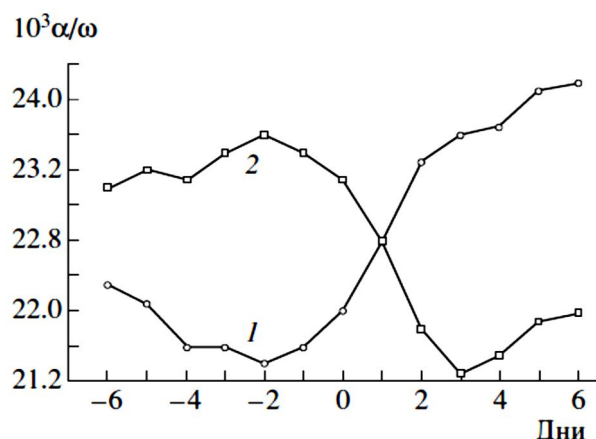
Росгидромет совместно с Российской академией наук и Роскосмосом в течение многих лет проводят комплексные исследования солнечно-земных связей с использованием метеорологических и ионосферных спутников в целях сокращения сроков прогноза погоды и изучения процессов, связанных с дальнейшим изменением климата на планете. По заказу Института прикладной геофизики им. Е. К. Федорова (Росгидромет), АО «Корпорация «ВНИИЭМ» (Роскосмос) совместно с Институтом космических исследований РАН разработан космический проект «Ионозонд-2025», состоящий из четырех космических аппаратов (КА) «Ионосфера» и одного спутника «Зонд». КА «Ионосфера» попарно выведут на взаимно перпендикулярные в долготной области солнечно-синхронные круговые орбиты на высоту 820 км для исследования ионосферных процессов, а КА «Зонд» запустят на околокруговую орбиту в плоскости терминатора на высоту 650 км для изучения солнечного воздействия на ионосферу Земли.

Для проведения указанных выше исследований учеными и специалистами этих организаций была разработана научная программа проекта «Ионозонд-2025», предусматривающая решение следующих задач: мониторинг состояния ионосферы, наблюдения процессов на Солнце и солнечной активности, процессы, происходящие в верхней атмосфере Земли и контроль магнитосферы, диагностика волновой активности (электромагнитные, акустические волны) и корпускулярных ионизирующих излучений, наблюдение распределения озона в верхней атмосфере.

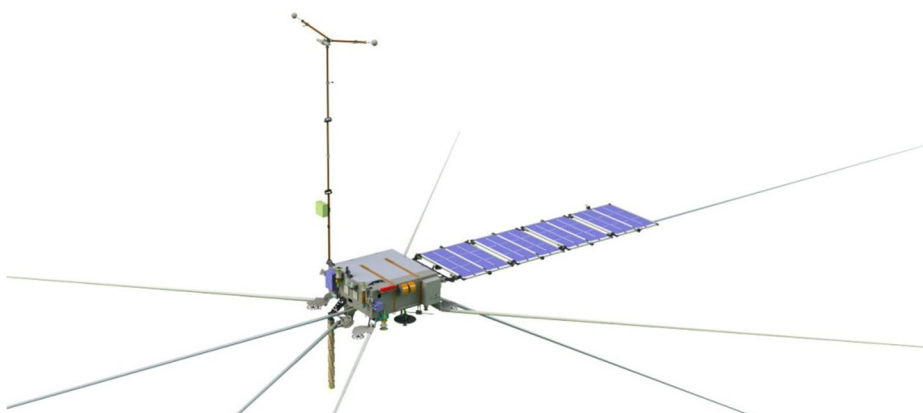
Планируется, что спутниковая группировка «Ионозонд» будет работать на постоянной основе с последующим восстановлением исчерпавших ресурс аппаратов, что совместно с группировкой «Метеор» позволит проводить непрерывный мониторинг как погоды и климата, так и космической погоды. На рис. 3 представлен общий вид КА «Ионосфера».

Для выполнения научных исследований на КА «Ионосфера» разработан следующий комплекс бортовой аппаратуры:

Бортовой ионозонд ЛАЭРТ, работающий в диапазоне (0,1 – 20 МГц) планируется использовать для оперативного определения критической частоты ионосферы вдоль трассы полета КА, получения вертикальных профилей электронной концентрации ионосферы с дальнейшим восстановлением трехмерной структуры ионосферы, определения параметров ионосферной плазмы по частотам плазменных резонансов, измерения глобального распределения ВЧ-излучений в диапазоне частот ионозонда.



**Рис. 2. Распределение среднего значения индекса зональной циркуляции атмосферы на уровне 700 гПа: 1 – для положительного значения сектора межпланетного магнитного поля (ММП); 2 – для отрицательного значения сектора ММП относительно дней с максимальным значением плотности потока солнечного ветра**



**Рис. 3. Общий вид КА «Ионосфера»**

С помощью прибора (ЭСИП) планируются измерения локальных параметров ионосферной плазмы вдоль орбиты КА, структуры и динамики ионосферы в целом, отдельных физических процессов в ионосферной плазме и глобального мониторинга ионосферы.

По данным радиозатменных измерений глобальных навигационных систем GPS/ГЛОНАСС будут проводиться исследования полного электронного содержания (ПЭС) с целью определения высотного распределения электронной концентрации ионосферы Земли.

Двухчастотный (150/400 МГц) передатчик предназначен для радиосвечения ионосферы Земли на частотах 150 МГц и 400 МГц. Основная

решаемая задача – определение пространственной структуры электронной концентрации ионосферы путем восстановления вертикальных профилей электронной концентрации в плоскости орбиты аппарата.

Для измерения дифференциальных энергетических спектров низкоэнергичных электронов и протонов будет использоваться спектрометр плазмы и энергетической радиации (СПЭР/1).

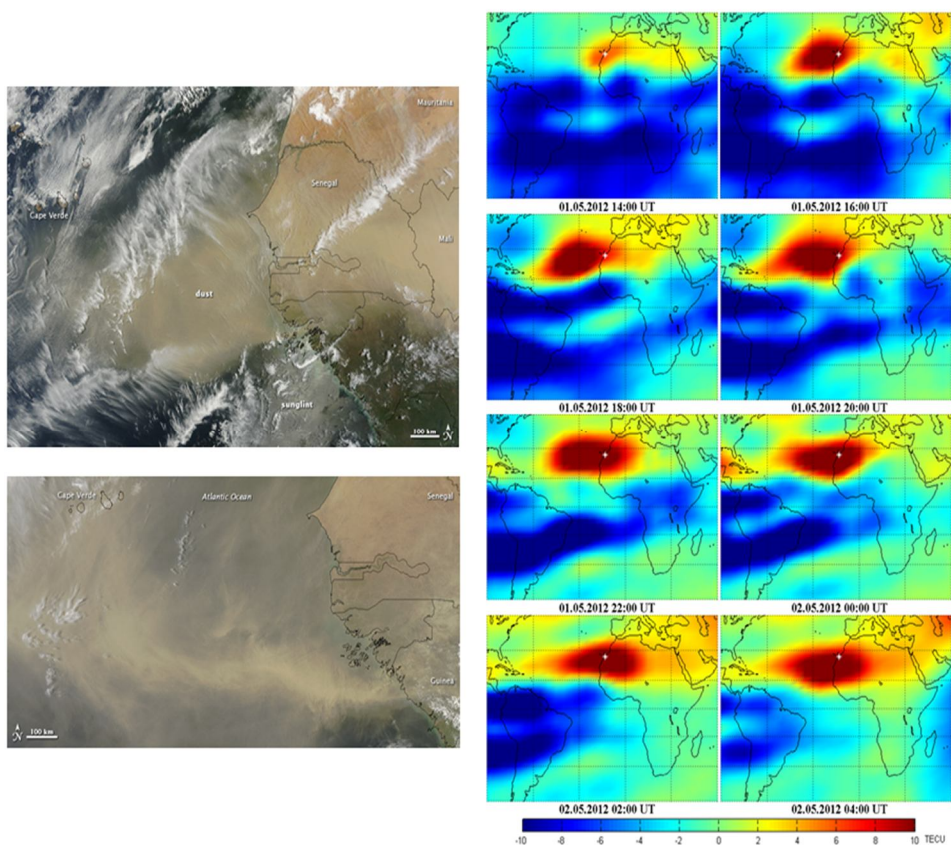
С помощью низкочастотного волнового комплекса (НВК2) будут выполняться измерения магнитных и электрических полей ОКП в диапазоне частот от 0 до 20 кГц для определения состояния магнитосферно-ионосферной плазмы выявления воздействий естественного и антропогенного происхождения.

Спутниковый озонметр (Озонметр ТМ) предназначен для проведения измерений содержания озона в атмосфере Земли на основе спектроскопических измерений по двум сильным полосам поглощения – полосы Хартли и Хоггинса.

Следует отметить, что проект «Ионозонд-2025» предполагает наличие довольно серьезного наземного сопровождения. Совместно с ИПГ запланировано проведение экспериментов по трансionoсферному и обратному трансionoсферному радиозондированию ионосферы с помощью наземных ионозондов сети Росгидромета, работающих синхронно с бортовым ионозондом ЛАЭРТ. Наземные ионосферные станции должны быть снабжены приемниками на частоте 137 МГц для приема информации от бортового ионозонда ЛАЭРТ в режиме непосредственной передачи (НП) при пролете спутников «Ионосфера» над наземными ионозондами. Для томографической реконструкции ионосферы, когда используется сигнал двухчастотного (150/400 МГц) передатчика на борту спутников «Ионосфера» необходимо наличие меридиональных цепочек приемников на частотах 150/400 МГц. Низкочастотные волновые измерения будут также сопровождаться наземными измерениями ОНЧ-сигналов в диапазоне 0 – 20 кГц. Совместное использование спутниковых группировок для гидрометеорологических исследований и для исследований космической погоды позволит существенно улучшить качество мониторинга окружающей среды и понимание факторов на нее воздействующих.

### **3. Интеграция систем метеорологического назначения и контроля космической погоды**

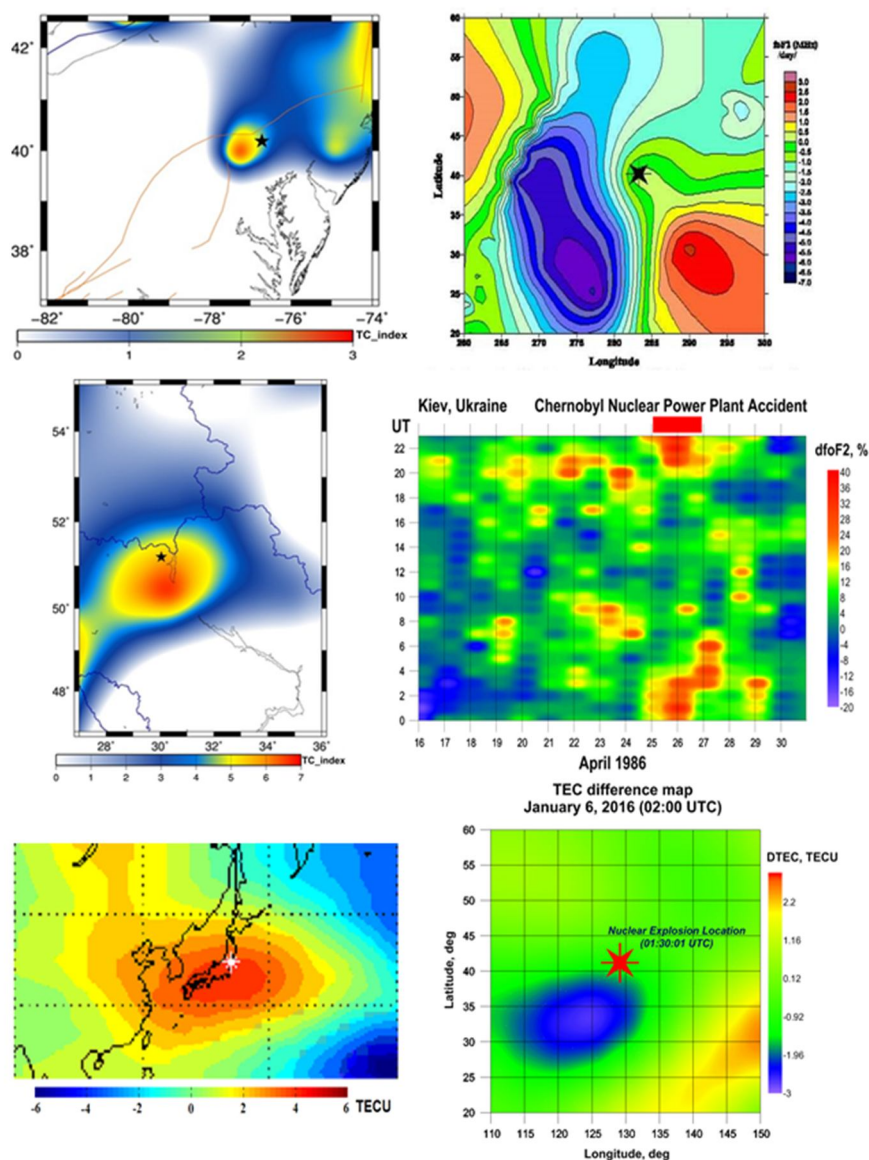
Существует большое количество явлений, которые требуют синхронных измерений параметров атмосферы и подстилающей поверхности и параметров космической плазмы. Приведем несколько примеров. На левой панели рис. 4 показана песчаная буря 1 – 2 мая 2012 г., зарегистрированная спутником Aqua, а на правой панели показано развитие положительной аномалии в ионосфере по данным измерения полного электронного содержания с помощью сети приемников навигационной системы GPS [8].



**Рис. 4. Слева – снимки песчаной бури со спутника Aqua;  
справа – дифференциальные карты полного  
электронного содержания в ионосфере**

Как видим, песчаная буря путем создания аномалий в ионосфере может создать помехи для функционирования навигационных систем ГЛОНАСС и GPS.

В качестве еще одного аргумента важности интеграции систем дистанционного зондирования и измерений параметров космической плазмы приведем примеры контроля радиационного заражения окружающей среды. На рис. 5 слева показаны данные регистрации тепловых аномалий в виде аномальных потоков уходящего длинноволнового инфракрасного излучения в результате аварий на атомных реакторах Три-Майл Айленд (США, 1979 г.), Чернобыль (СССР, 1986 г.) и подземных испытаний в Северной Корее в 2016 г. Справа показаны зарегистрированные аномалии с помощью спутникового ионозонда на спутнике «Интеркосмос-19», наземного ионозонда на станции Киев, и разностная карта полного электронного содержания над Северной Кореей и Японией [9].



**Рис. 5.** Левая панель сверху вниз: тепловые аномалии в диапазоне 8 – 14 мк, зарегистрированные над авариями на атомных реакторах Три-Майл Айленд (США, 1979 г.), Чернобыль (СССР, 1986 г.) и подземным испытанием в Северной Корее (6 января 2016 г.); правая панель – ионосферные аномалии

### Заключение

Представленные данные показывают правильность выбранного направления исследований и практической деятельности АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в плане создания космической техники для регулярного мо-

нитинга окружающей среды и космического пространства. Для интеграции и синхронности наблюдений могут быть предложены варианты совмещения орбит аппаратов типа «Метеор-М» и «Ионосфера», либо разработка специализированного аппарата, на котором одновременно будут установлены приборы дистанционного зондирования и контроля параметров космической плазмы.

### **Литература:**

1. Вернадский В. И., Собрание сочинений. В 5 томах. – Москва, 1954 – 1960.
2. Лаверов Н. П., Медведев А. А. Космические исследования и технологии: расширение знаний об окружающем мире. – Москва : ИФЗ РАН, 2014. – 16 с.
3. Изменение окружающей среды и климата. Природные и связанные с ними техногенные катастрофы. В 8 томах / РАН ; под редакцией Н. П. Лаверова. – Москва : ИФЗ, 2007 – 2010.
4. Пулинец С. А., Узунов Д. П. Спутниковым технологиям нет альтернативы. О проблеме мониторинга природных и техногенных катастроф // Труды ИПГ. – 2010. Вып. 89. – С. 173 – 185.
5. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Карелин А. В., Давиденко Д. В. Физические основы генерации краткосрочных предвестников землетрясений. Комплексная модель геофизических процессов в системе литосфера-атмосфера-ионосфера-магнитосфера, стимулируемых ионизацией // Геомагнетизм и аэрономия. – 2015. – 55. – Вып. 4. – С. 521 – 538.
6. Динамика и математическое моделирование геофизических и гидрометеорологических процессов. Т. 7 / РАН; под редакцией Н. П. Лаверова, А. А. Макоско. – Москва : ИФЗ, 2008.
7. Сытинский А. Д., Боков В. Н., Оборин Д. А. Зависимость циркуляции атмосферы Земли от процессов на Солнце и в межпланетной среде // Геомагнетизм и аэрономия. – 2003. – 43. – № 1. – С. 136 – 142.
8. Пулинец С. А., Узунов Д. П., Давиденко Д. В. Прогноз землетрясений возможен?! Интегральные технологии многопараметрического мониторинга геоэффективных явлений в рамках комплексной модели взаимосвязей в литосфере, атмосфере и ионосфере Земли. – Москва : Троянт, 2014. – 144 с. – DOI: 10.17686/sced\_rusnauka\_2014 – 1211
9. Pulinet S., Ouzounov D., Davidenko D., Boyarchuk K., and Laverov N., Remote sensing applications for diagnostics of the radioactive pollution of the ground surface and in the atmosphere, General Assembly of the European Geosciences Union 2013, PI-CO (EGU2012-12303)/GI1.4/SSS6.11.
10. Малкевич М. С., Бадаев В. В., Ведешин Л. А., и др. Исследование параметров системы «Атмосфера-поверхность» дистанционными методами. Эксперимент «МКС-М-МКФ-6М» на станции «Салют-7» 1983 – 1985 гг. – Москва : ВИНТИ, 1987. – 242 с.

# СТРАТИФИЦИРОВАННЫЙ ТЕЛЕМОНИТОРИНГ В ТЕРРИТОРИАЛЬНО-РАССРЕДОТОЧЕННЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ КАМЕРАХ

А. П. Сарычев, Ю. Н. Черкасов, А. В. Рогоза

АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,

г. Москва

***Аннотация.** Разработан и реализован новый способ контроля пространственно рассредоточенного испытательного оборудования – автоматический дистанционный стратифицированный телемониторинг на основе современных компьютерных технологий. Кратко описана впервые разработанная и реализованная в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в промышленном варианте многоуровневая стратифицированная система телемониторинга для дистанционного контроля температуры в пространственно рассредоточенных камерах тепла и холода с одного рабочего места испытателя в реальном времени при тепловых испытаниях электротехнических изделий.*

***Ключевые слова:** электротехнические изделия, испытания, климатические камеры, температурные режимы, способ контроля, измерители-регуляторы температуры, стратифицированный телемониторинг.*

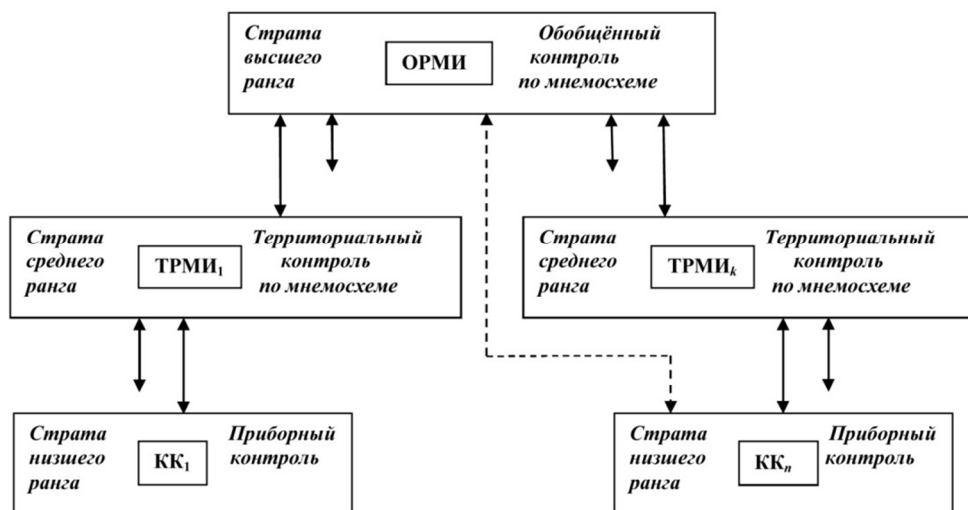
## **1. Недостатки штатного способа контроля испытательного оборудования**

Электротехнические изделия (ЭИ), применяемые для решения наиболее ответственных технических задач в военной технике, космических аппаратах (КА), надводных кораблях, подводных лодках и важных отраслях народного хозяйства всегда испытывают в климатических камерах (КК) в различных температурных режимах. На заводах-изготовителях КК размещены, как правило, в разных зданиях и на разных этажах, т. е. пространственно рассредоточены. Штатный способ контроля температуры в камерах заключается в обходе человеком всех камер, т. е. является сугубо автономным, точечным, выборочным, эпизодическим, вследствие чего имеют место неконтролируемые интервалы испытаний [1], что чревато крайне нежелательными последствиями, так как испытываемые ЭИ можно перегреть (даже сжечь) или переохладить (даже заморозить).

Целью разработки нового способа контроля температуры в КК было исключить неконтролируемые интервалы испытаний ЭИ в КК. В работе предложено одно из возможных направлений совершенствования системы контроля температуры в КК при испытании ЭИ – стратифицированный телемониторинг.

## **2. Краткое описание принципа стратифицированного телемониторинга**

Стратифицированная система телемониторинга (ССТ) представляет собой многоуровневую автоматическую человеко-машинную систему контроля [2]. На каждом уровне система решает разные задачи.



**Рис. 1. Стратифицированная система телемониторинга**

Такие уровни назовем стратами, а многоуровневую систему стратифицированной (рис. 1), под которой будем понимать иерархически организованную систему взаимосвязанных элементов. Страт среднего ранга может быть несколько. К каждой  $j$ -й ( $j = 1, \dots, k$ ) страте среднего ранга подключено  $n$  страт низшего ранга. КК объединяют в группы, например, по территориальному признаку (по зданиям). Они подключены к территориальной страте. Состояние этой группы КК отображают на мнемосхеме территориального рабочего места испытателя (ТРМИ). Информация со страт среднего ранга поступает на страту высшего ранга. От некоторых страт нижнего ранга информация может передаваться сразу на страту высшего ранга (показано пунктирной линией); в этом случае система получается двухуровневая. Реализованная ССТ – комбинированная, т. е. одновременно есть 2-х уровневое и 3-х уровневое соединение.

Стратой высшего ранга и основным функциональным элементом ССТ, в нашем случае, является обобщенное рабочее место испытателя (ОРМИ, рис.1), оснащенное компьютером, на мониторе которого высвечивается специальная мнемосхема обобщенного состояния всех страт. Со старшей страты (от ОРМИ) система посылает (при необходимости) управляющие воздействия на КК (уставки, пределы регулирования параметров), т. е. ССТ, в нашем случае, – это система с обратной связью.

Система функционирует следующим образом. На страте низшего ранга система решает частные объектовые задачи – измеряет контролируемые параметры КК, обрабатывает их и выдает на встроенные приборы контроля параметров, по которым осуществляется автономный приборный контроль работы каждой КК <sub>$i$</sub> , ( $i = 1, \dots, n$ ), и одновременно выдает их по



интерфейсу или на страту среднего ранга, или сразу на страту высшего ранга. Кроме этого, на страте низшего ранга система выдает регулирующие воздействия на исполнительные элементы КК. На очередной страте более высокого ранга система решает более общие задачи уже определенной совокупности объектов. Принцип получения и обработки информации в ССТ, для нашего случая, приведен на рис. 2. Из обозначений на рис. 2 ясно назначение всех блоков ССТ.

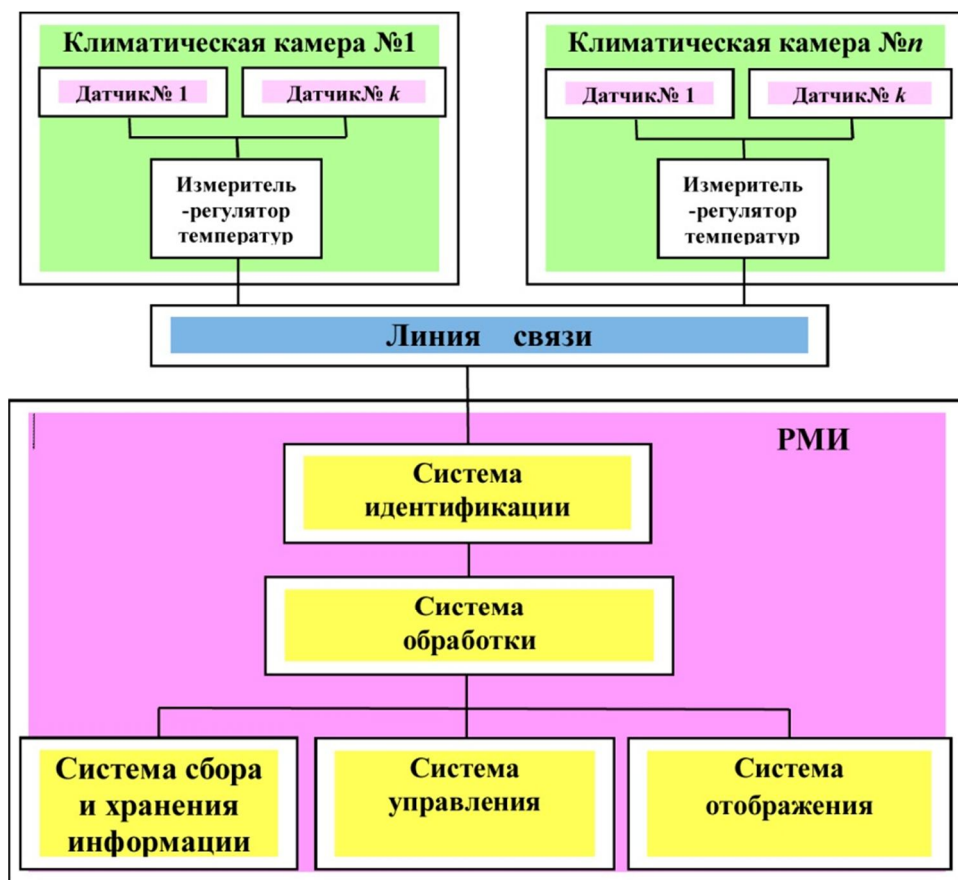


Рис. 2. Принцип получения и обработки информации в ССТ

### 3. Краткое описание внедренной системы телемониторинга

Следует отметить, что внедренная ССТ оказалась настолько универсальной и перспективной, что в нее можно включать разнообразные объекты, нужно только подобрать соответствующие измерители с датчиками и настроить мнемосхему программы телемониторинга. Так, в нашем случае, в качестве контролируемых объектов удалось включить в ССТ нагревательные печи и контролеры (шкафы) токов электромагнита (КТМ) ротора турбины газоперекачивающей станции.

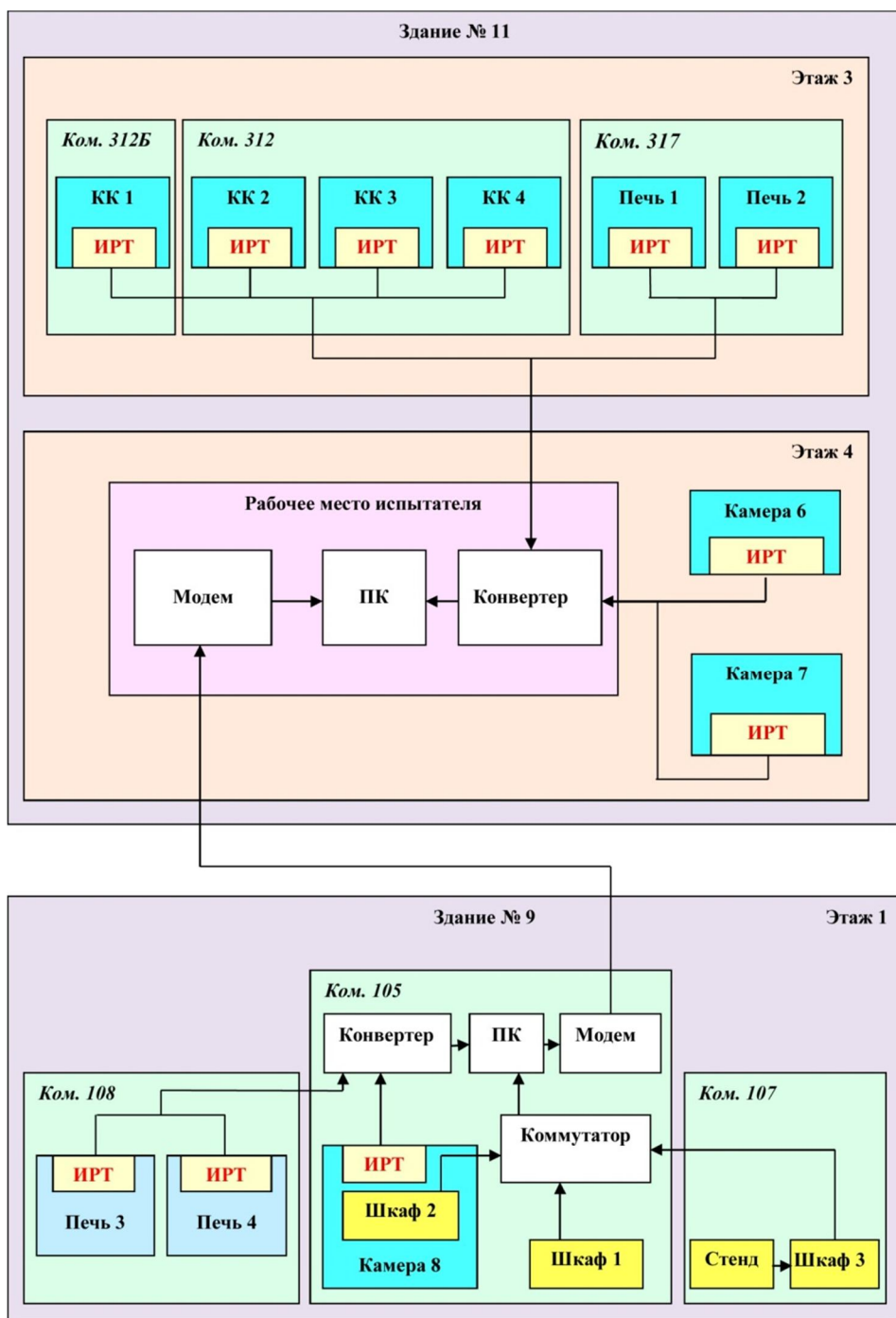


Рис. 3. Схема внедренной системы стратифицированного телемониторинга

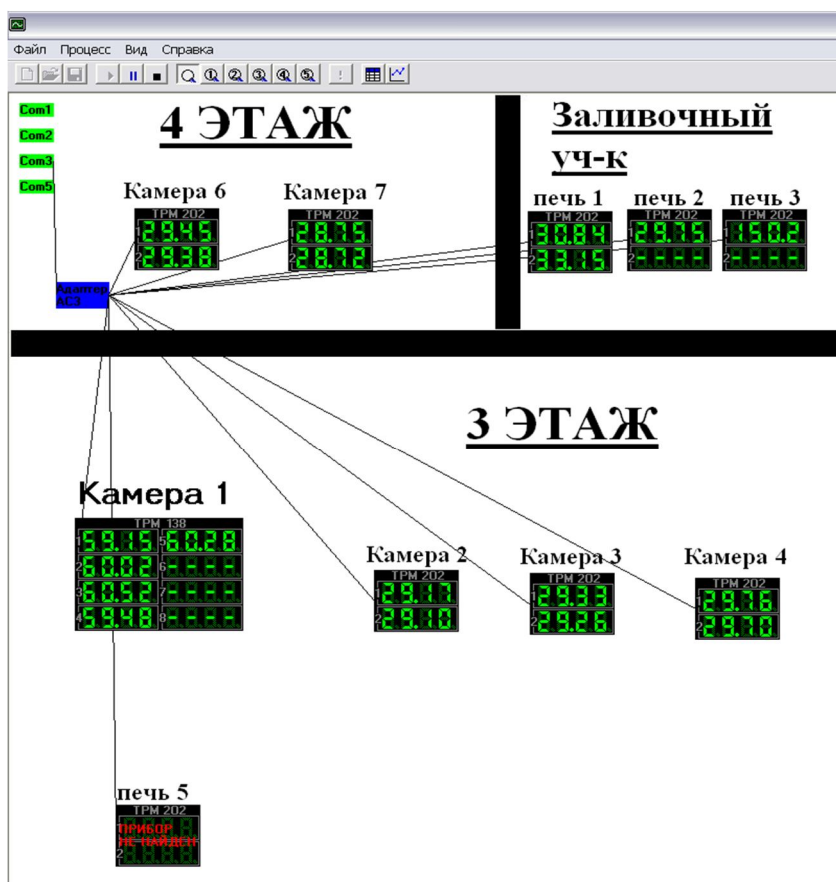


Рис. 4. Пример мнемосхемы телемониторинга

На рис. 3 приведена схема реальной ССТ, внедренной в АО «Корпорация «ВНИИЭМ». Из рис. 3 видно, что в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» имеется большое число разнотипного испытательного оборудования, размещенного в 2-х зданиях (в одном здании на 2-х этажах) и в большом числе комнат, т. е. пространственно рассредоточено. Поэтому непрерывный контроль оборудования при штатном способе контроля практически невозможен и вследствие этого имеют место неконтролируемые интервалы испытания электротехнических изделий. Основным структурным элементом ССТ является (см. рис. 3) рабочее место испытателя (РМИ), оснащенное компьютером (ПК), на мониторе которого отображается состояние одновременно всего контролируемого оборудования в форме мнемосхемы. Пример мнемосхемы показан на рис. 4. На ней отображается место нахождения контролируемого оборудования и текущие значения контролируемых параметров одновременно всего оборудования. При необходимости результаты телемониторинга могут быть, дополнительно к мнемосхеме, представлены еще в табличной (рис. 5) или графической форме за любой интервал испытаний.

Owen Report Viewer						
Файл Просмотр Справка						
Таблица График						
	ДАТА	ВРЕМЯ	СОБЫТИЕ	ССЫЛКА	ОПИСАНИЕ	ЗНАЧЕНИЕ
▶	06.03.2013	0:00:04	Сохранение значения	3	Камера №4	39,752
	06.03.2013	0:00:04	Создание файла протокола			
	06.03.2013	0:00:08	Сохранение значения	5	Камера №7	50,443
	06.03.2013	0:00:08	Сохранение значения	6	Печка №8	19,553
	06.03.2013	0:00:08	Сохранение значения	8	SNOL новая	313,492
	06.03.2013	0:00:09	Сохранение значения	3	Камера №4	39,752
	06.03.2013	0:00:09	Сохранение значения	7	Камера №1	59,629
	06.03.2013	0:00:09	Сохранение значения	1	Камера №2	30,085
	06.03.2013	0:00:09	Сохранение значения	2	Камера №3	21,504
	06.03.2013	0:00:14	Сохранение значения	2	Камера №3	21,49
	06.03.2013	0:00:14	Сохранение значения	1	Камера №2	30,085
	06.03.2013	0:00:14	Сохранение значения	7	Камера №1	59,565
	06.03.2013	0:00:14	Сохранение значения	8	SNOL новая	309,938
	06.03.2013	0:00:14	Сохранение значения	5	Камера №7	50,461
	06.03.2013	0:00:14	Сохранение значения	6	Печка №8	19,53
	06.03.2013	0:00:15	Сохранение значения	3	Камера №4	39,752
	06.03.2013	0:00:18	Сохранение значения	5	Камера №7	50,415
	06.03.2013	0:00:19	Сохранение значения	2	Камера №3	21,504
	06.03.2013	0:00:19	Сохранение значения	8	SNOL новая	307,609
	06.03.2013	0:00:19	Сохранение значения	6	Печка №8	19,553
	06.03.2013	0:00:19	Сохранение значения	3	Камера №4	39,752

Рис. 5. Пример результатов телемониторинга в табличной форме одновременно всех камер и печей

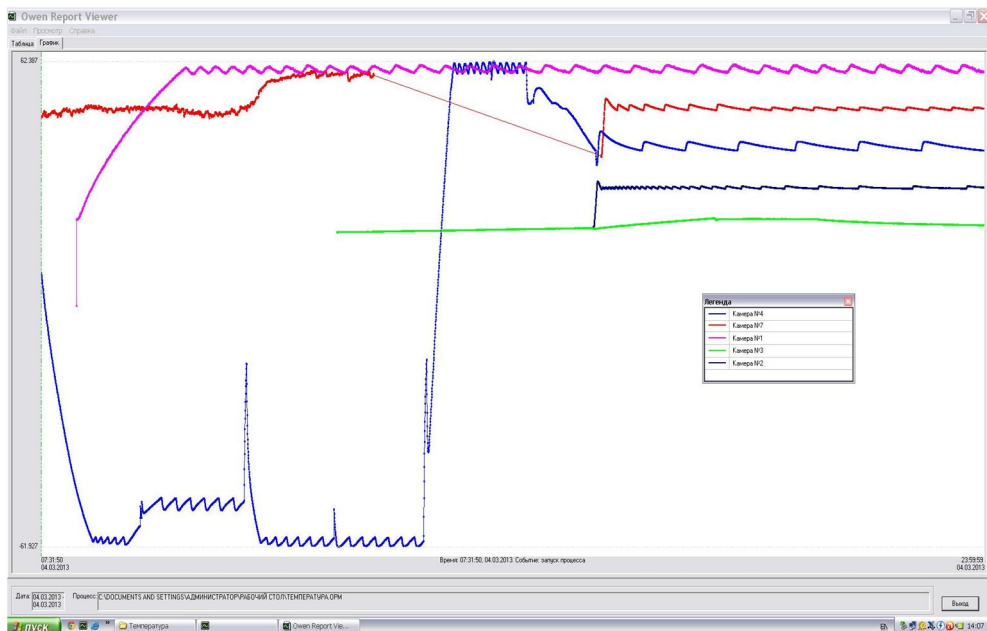
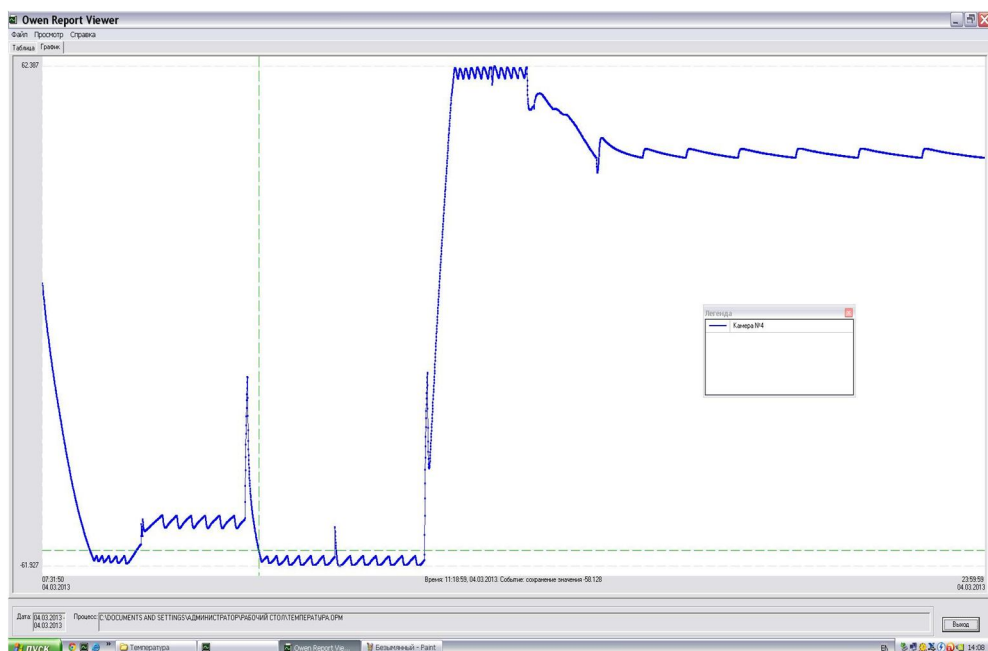


Рис. 6. Результаты телемониторинга в графической форме одновременно всех камер



**Рис. 7. График изменения контролируемого параметра (температуры) одной камеры**

Причем, графики изменения температуры можно представить в одном окне, одновременно для всех включенных камер и печей (рис. 6), или только для любой одной камеры (рис. 7) за любой интервал испытаний.

Графики позволяют наглядно увидеть как изменение температурных режимов одновременно во всех камерах и печах (на рис. 6, слева), так и тенденцию (тренд) изменения температуры (на рис. 6, справа), а также точность регулирования во всех камерах и печах.

В качестве измерителей-регуляторов температуры (ИРТ) в КК используются отечественные приборы ТРМ202, ТРМ210, ТРМ138 и Е5СН, оснащенные интерфейсом RS-485. В процессе работы ИРТ производят опрос датчиков, вычисляют по измерениям текущие значения температуры и выдают соответствующие сигналы на выходные устройства.

Автоматическое регулирование температуры в КК эти приборы осуществляют в двух режимах – двухпозиционное регулирование и ПИД-регулирование. При работе в режиме двухпозиционного регулирования прибор работает по одному из представленных на рис. 8 типов логики:

- тип логики 1 (обратное управление) применяется для управления работой нагревателя (ТЭН) или сигнализации о том, что значение текущего измерения  $T_{\text{тек}}$  меньше уставки  $T_{\text{уст}}$ . При этом выходное устройство прибора первоначально включается при значениях

$$T_{\text{тек}} < T_{\text{уст}} - HYS \text{ (где } HYS \text{ – гистерезис),} \quad (1)$$

а выключается при

$$T_{\text{тек}} > T_{\text{уст}} + HYS, \quad (2)$$

и вновь включается при

$$T_{\text{тек}} < T_{\text{уст}} - HYS; \quad (3)$$

осуществляя тем самым двухпозиционное регулирование температуры по уставке  $T_{\text{уст}}$  с гистерезисом  $\pm HYS$ ;

– тип логики 2 (прямое управление) применяется для управления работой холодильника или сигнализации о превышении значения уставки. При этом выходное устройство прибора первоначально включается при значениях

$$T_{\text{тек}} > T_{\text{уст}} + HYS, \quad (4)$$

а выключается при

$$T_{\text{тек}} < T_{\text{уст}} - HYS; \quad (5)$$

– тип логики 3 (П-образная) применяется для сигнализации о том, что температура находится в заданном диапазоне. При этом выходное устройство включается при

$$T_{\text{уст}} - HYS < T_{\text{тек}} < T_{\text{уст}} + HYS; \quad (6)$$

– тип логики 4 (У-образная) применяется для сигнализации о том, что температура находится вне заданного диапазона. При этом выходное устройство включается при

$$T_{\text{тек}} < T_{\text{уст}} - HYS \text{ и при } T_{\text{тек}} > T_{\text{уст}} + HYS. \quad (7)$$

Задание уставки ( $T_{\text{уст}}$ ) и гистерезиса ( $HYS$ ) производится назначением параметров регулирования прибора.

При ПИД-регулировании на выходе регулятора вырабатывается управляющий (выходной) сигнал  $Y_i$  (вычисляется по формуле 8), действие которого направлено на уменьшение отклонения  $E_i$  (температуры):

$$Y_i = \frac{1}{X_p} \left( E_i + \tau_d \frac{\Delta E_i}{\Delta t_{\text{изм}}} + \frac{1}{\tau_i} \sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{\text{изм}} \right) 100\%, \quad (8)$$

где  $X_p$  – полоса пропорциональности;  $E_i$  – разность между заданными  $T_{уст}$  и текущими  $T_i$  значением измеряемой величины, или рассогласование;  $\tau_d$  – постоянная времени дифференцирования (программируемый параметр «дифференциальная постоянная ПИД-регулятора» –  $d$ );  $\Delta E_i$  – разность между двумя соседними измерениями  $E_i$  и  $E_{i-1}$ ;  $\Delta t_{изм}$  – время между двумя соседними измерениями  $T_i$  и  $T_{i-1}$ ;  $\tau_i$  – постоянная времени интегрирования (программируемый параметр «интегральная постоянная ПИД-регулятора» –  $i$ );  $\sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{изм}$  – накопленная сумма рассогласований.

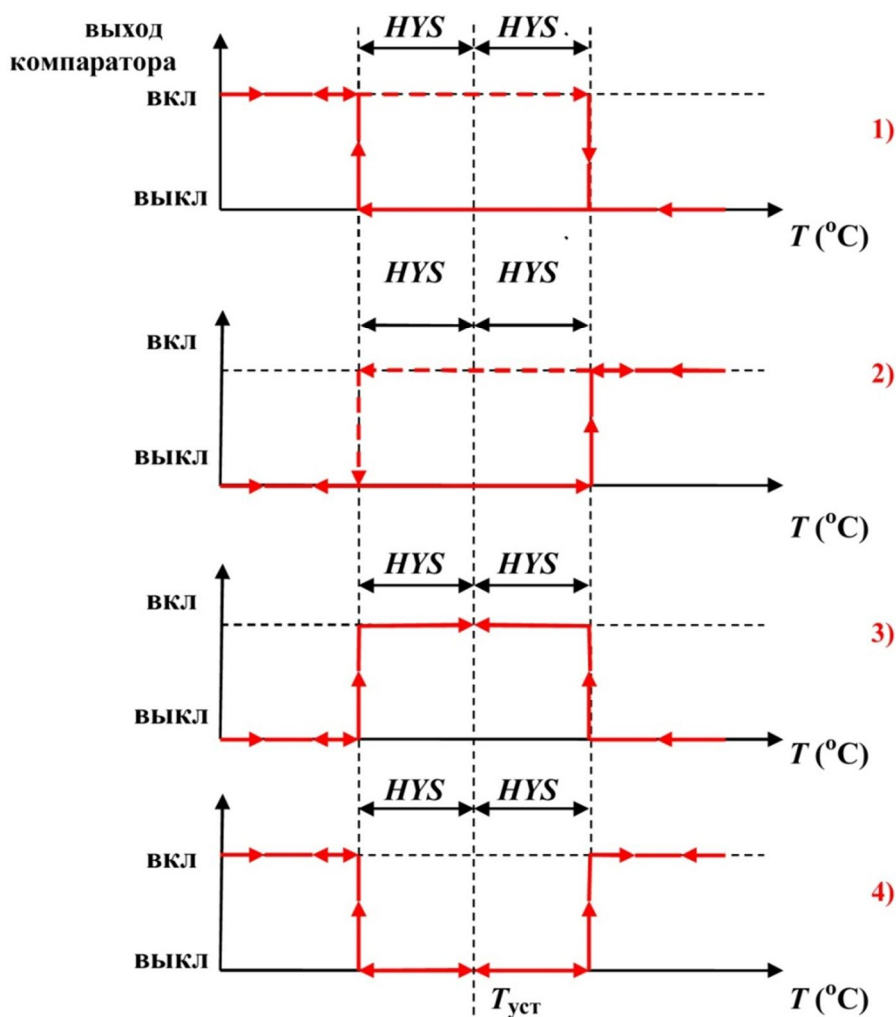


Рис. 8. Типы логики в режиме двухпозиционного регулирования

Из формулы (8) видно, что при ПИД-регулировании сигнал управления зависит от:

- разницы между текущим параметром  $T_i$  и заданным значением  $T_{уст}$  измеряемой величины  $E_i$ , которая реагирует на мгновенную ошибку регулирования; отношение  $E_i/X_p$  называется пропорциональной составляющей выходного сигнала;

- скорости изменения параметра  $\Delta E_i/\Delta t_{изм}$ , которая позволяет улучшить качество переходного процесса; выражение  $\tau_d(1/X_p)(\Delta E_i/\Delta t_{изм})$  называется дифференциальной составляющей выходного сигнала;

- накопленной ошибки регулирования, которая позволяет добиться максимально быстрого достижения температуры установки; выражение

$\frac{1}{\tau_i} \sum_{i=1}^n E_i \Delta t_{изм}$  называется интегральной составляющей выходного сигнала.

При регулировании температуры выбирают один из методов управления системой: прямое или обратное. При прямом управлении значение выходного сигнала регулятора увеличивается с увеличением измеряемой величины (рис. 9). При обратном управлении значение выходного сигнала регулятора уменьшается с увеличением измеряемой величины. Например, в системе нагрева по мере роста температуры значение выходного сигнала уменьшается – этот процесс имеет обратное управление, а в системе охлаждения – прямое управление.

Телемониторинг КТМ (шкафов) ротора турбины газоперекачивающей станции для газовой промышленности построен по трехуровневой схеме (рис. 10, 11, 12). Вид мнемосхемы второго уровня ССТ показан на рис. 13.

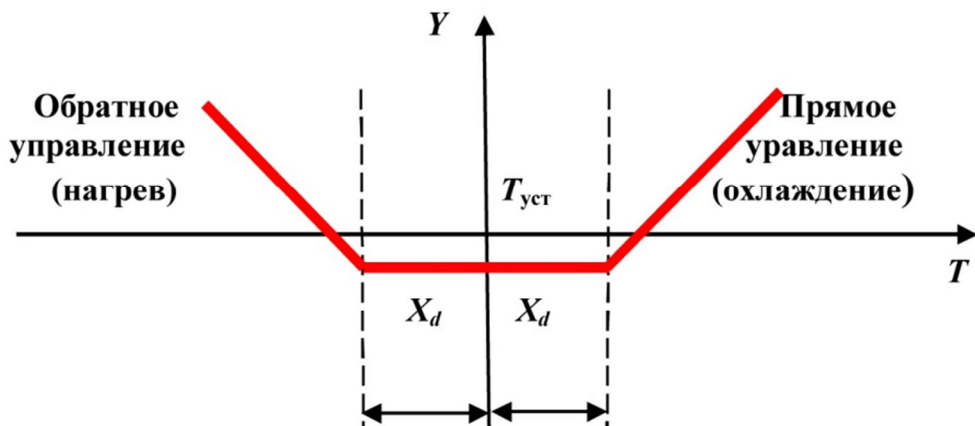


Рис. 9. Принцип формирования выходного сигнала регулятора





Рис. 10. Схема телемониторинга шкафов второго уровня

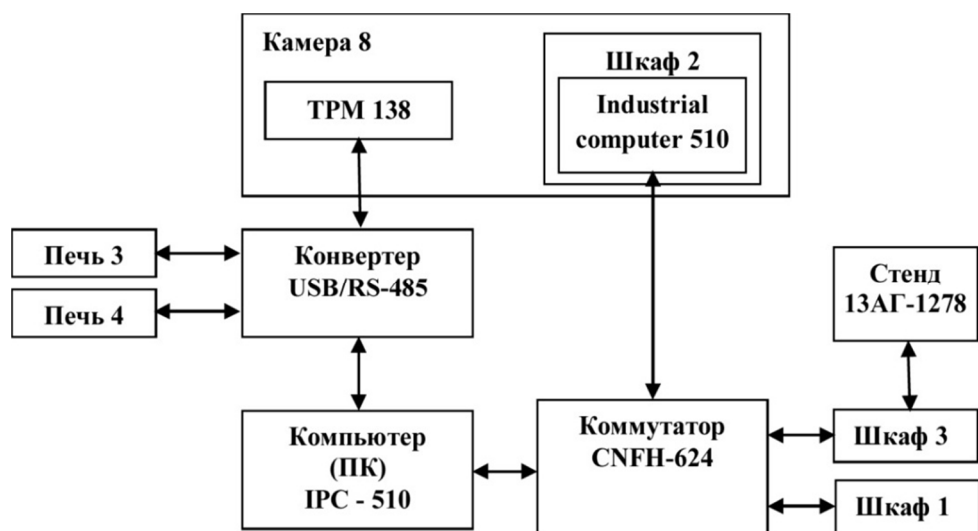


Рис. 11. Схема передачи информации со второго уровня ССТ на верхний

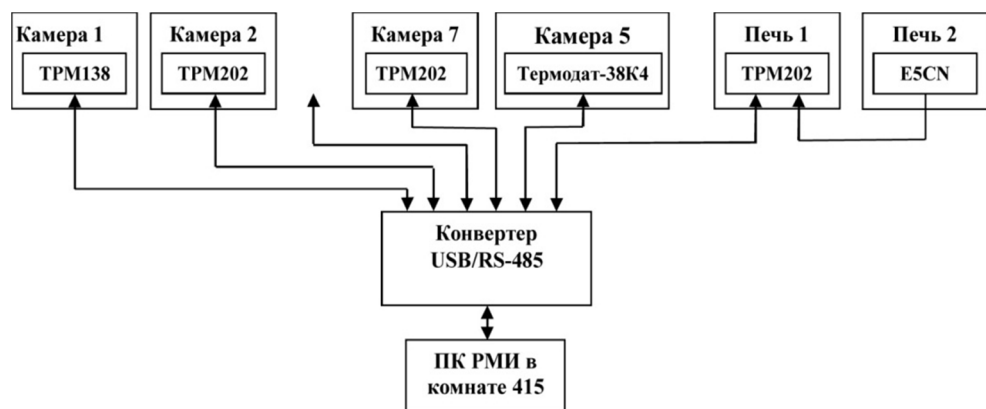
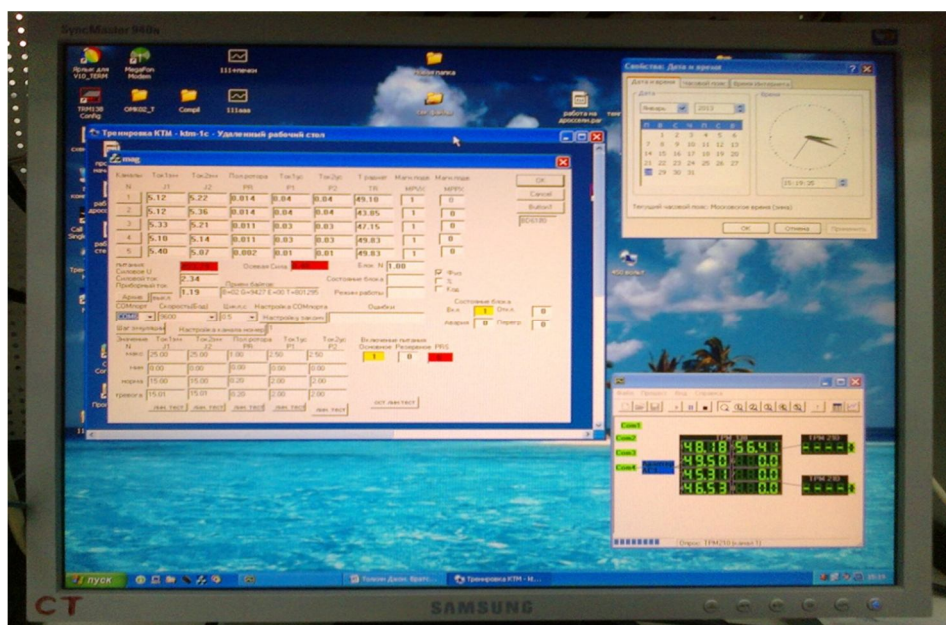


Рис. 12. Схема двухуровневой ССТ в корпусе 11



**Рис. 13. Пример мнемосхемы ССТ второго уровня контроля шкафов**

### **Заключение**

1. Разработана и внедрена на второй испытательной станции АО «Корпорация «ВНИИЭМ» стратифицированная комбинированная (2 и 3 уровневая) система дистанционного телемониторинга территориально рассредоточенных климатических камер и нагревательных печей.
2. Система телемониторинга полностью автоматическая и может работать сколь угодно долго.
3. Внедренная система имеет научную новизну и запатентована [3].
4. В результате внедрения системы телемониторинга полностью исключены неконтролируемые интервалы испытаний изделий в камерах и печах, вследствие чего получен для АО «Корпорация «ВНИИЭМ» существенный экономический эффект.

### **Литература**

1. Черкасов Ю. Н. Совершенствование системы испытаний. Книга 4. Антология совершенствования реле / Под ред. д.т.н. А. П. Сарычева. – Москва : ЛЕНАНД/URSS, 2017. – 464 с.
2. Черкасов Ю. Н. Совершенствование системы испытаний. Книга 3. Многоуровневая система телемониторинга пространственно рассредоточенного оборудования / Под ред. д.т.н. А. П. Сарычева. – Москва : ЛЕНАНД/URSS, 2014. – 216 с.
3. Черкасов Ю. Н. Патент № 2681385 RU, 2019 г. Устройство контроля температуры в пространственно рассредоточенных климатических камерах.

# СТРУКТУРНЫЙ АНАЛИЗ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

М. С. Шевцов

АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва

***Аннотация.** При проектировании космических аппаратов дистанционного зондирования Земли первоочередное внимание уделяется системе электроснабжения. Отсутствие унифицированной системы электроснабжения КА побуждает разработчиков искать такие технические решения, которые позволят повысить энергетическую эффективность, надежность и ресурс СЭС. В статье проведен анализ ряда типовых вариантов построения систем электроснабжения космических аппаратов, обеспечивающих различную эффективность генерирования энергии. На основе результатов анализа определены достоинства и недостатки рассмотренных систем. Сделаны выводы о наиболее подходящих типах СЭС в зависимости от тактико-технической направленности и условий эксплуатации КА. Предложены новые проектные решения СЭС, направленные на повышение ее надежности, отказоустойчивости и энергетической эффективности. Использование предложенного проектного решения также позволит увеличить гарантийный полетный ресурс КА.*

***Ключевые слова:** космический аппарат, система электроснабжения, аккумуляторная батарея, солнечная батарея, преобразователь напряжения, бортовая шина питания, отказоустойчивость, надежность.*

Сегодня все более широкое применение в России и за рубежом получают космические аппараты (КА) дистанционного зондирования Земли. При проектировании бортовых систем КА выдвигаются требования к высокому уровню надежности и отказоустойчивости, длительному сроку службы, радиационной стойкости и другим важным параметрам бортовой аппаратуры.

Одной из важнейших обеспечивающих бортовых систем космического аппарата является система электроснабжения (СЭС), которая оказывает влияние на внешний облик, габаритные размеры и массу КА. Надежность СЭС во многом определяет срок активного существования КА. Выход из строя системы электроснабжения влечет за собой выход из строя всего КА.

Кроме того, СЭС должна иметь высокую энергетическую эффективность, так как за время орбитальной эксплуатации космического аппарата существенное влияние оказывает воздействие радиации, вследствие чего происходит деградация электрических характеристик электронных компонентов в составе СЭС.

Одной из приоритетных задач при создании системы электроснабжения является выбор структуры построения СЭС, учитывающий условия эксплуатации и технико-экономические требования КА. Нерациональный подход в выборе системы электроснабжения может привести к недопустимому увеличению массогабаритных и стоимостных показателей КА.

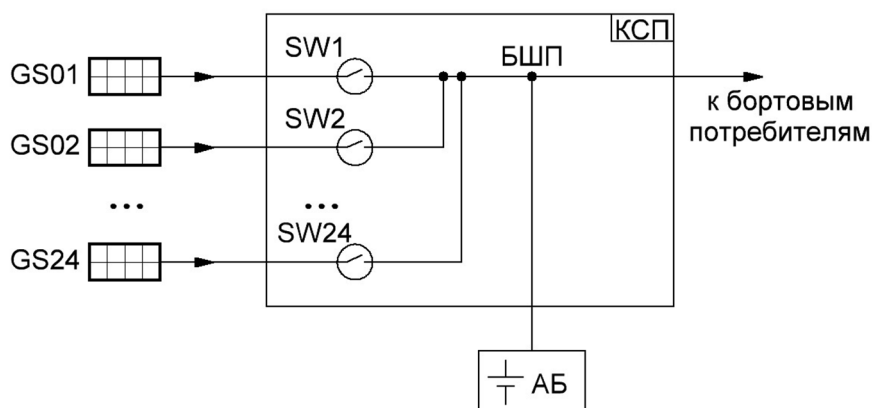
Отметим, что универсального варианта построения системы электроснабжения нет, поэтому появляется целесообразность в проведении структурного

анализа СЭС КА и в определении наиболее рационального варианта построения системы электроснабжения в зависимости от условий эксплуатации и технико-экономических требований КА.

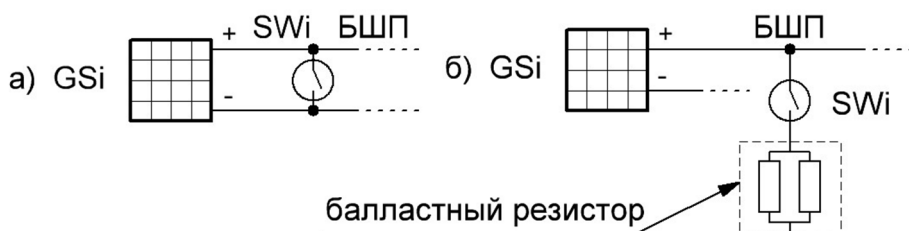
Наиболее простые в реализации и минимальные по стоимости и массе СЭС строятся по принципу общей шины питания, на которую подключаются генераторы солнечной батареи, аккумуляторная батарея и бортовые потребители (рис. 1). Рассмотрим такую систему электроснабжения для КА разработки АО «Корпорация «ВНИИЭМ».

Солнечная батарея (БС) разбита на 24 отдельных солнечных генератора ( $GS_i$ ), которые подключаются к бортовой шине питания (БШП) через ключевые элементы ( $SW_i$ ) контроллера системы питания (КСП). Защита непосредственно подключенной к БШП аккумуляторной батареи (АБ) от перезаряда обеспечивается путем поочередного отключения  $GS_i$ . Напряжение БШП не стабилизируется и определяется напряжением АБ.

Варианты регулирования генерируемой энергии БС могут быть различны (рис. 2).



**Рис. 1. СЭС с прямой передачей генерируемой энергии с нерегулируемым напряжением на шине питания**



**Рис. 2. Варианты регулирования генерируемой энергии БС: а – короткое замыкание; б – сброс избыточной мощности на балластный резистор**

Регулирование генерируемой энергии БС, требуемой для заряда АБ, осуществляется с помощью шунтирования (рис. 2, а) соответствующего солнечного генератора (GSi) путем замыкания ключевого элемента (SWi). Такой вариант нашел практическое применение на космическом аппарате «АИСТ». Недостатком такого способа управления генерируемой энергией от БС является пропускание всего генерируемого тока через цепь солнечной батареи, в результате чего происходит нарушение установившегося теплового режима.

На рис. 2, б изображен вариант управления генерируемой энергией с отдельным блоком балластных резисторов. Во избежание перезаряда АБ избыточная мощность солнечной батареи сбрасывается на балластный резистор путем замыкания ключа SWi. Блок балластных резисторов устанавливается на теплопроводящую плиту, которая монтируется снаружи в теневой зоне КА. Избыточная мощность, не требуемая для заряда АБ, излучается в открытый космос. Преимуществом такого варианта является поддержание установившегося теплового режима солнечной батареи, так как избыточный генерируемый ток БС излучается через блок балластных резисторов в открытый космос, а не в цепь солнечной батареи.

В целом у системы электроснабжения с прямой передачей генерируемой энергии с нерегулируемым напряжением на шине питания есть существенные недостатки:

- полная потеря работоспособности СЭС при отказе микропроцессора КСП;
- отбор максимально доступной генерируемой мощности солнечной батареи малоэффективен, вследствие чего необходимо использовать переразмеренную БС.

Рассмотрим вольт-амперную характеристику солнечной батареи, приведенную на рис. 3. При нагреве БС ток в точке максимальной мощности возрастает, а напряжение – снижается. Сочетание этих двух эффектов приводит к тому, что в системе с прямой передачей энергии с нерегулируемым напряжением на шине питания часть доступной мощности солнечной батареи теряется на освещенном участке орбиты. Когда космический аппарат выходит из теневой зоны с разряженной АБ, напряжение БС фиксируется на уровне напряжения АБ. Заштрихованная область на рис. 3 показывает часть неиспользуемой мощности БС, когда напряжение аккумуляторной батареи низкое.

В СЭС с прямой передачей генерируемой энергии с нерегулируемым напряжением на шине питания напряжение на солнечной батарее и на БШП определяется напряжением АБ, что приводит к невозможности согласования режима работы БС и АБ при изменении условий ее эксплуатации.

Более эффективные, с точки зрения генерации электрической энергии, БС являются СЭС с преобразователями напряжения, которые согласуют работу БС и АБ. Примером такой системы является СЭС КА «Канопус-В» (рис. 4) [1].

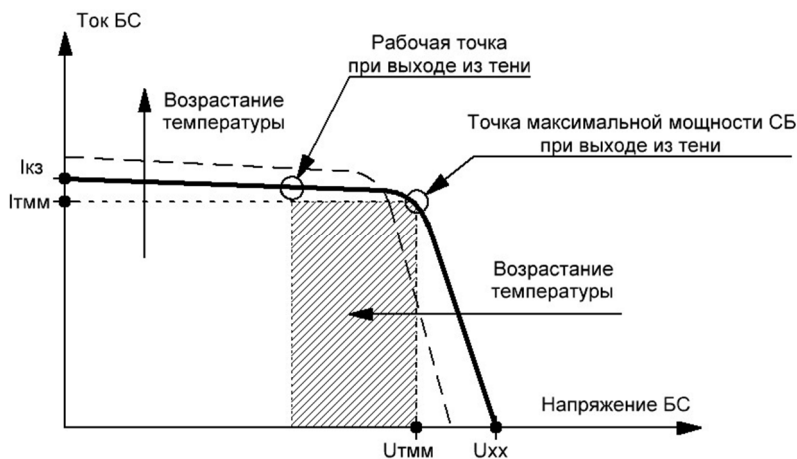


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика БС

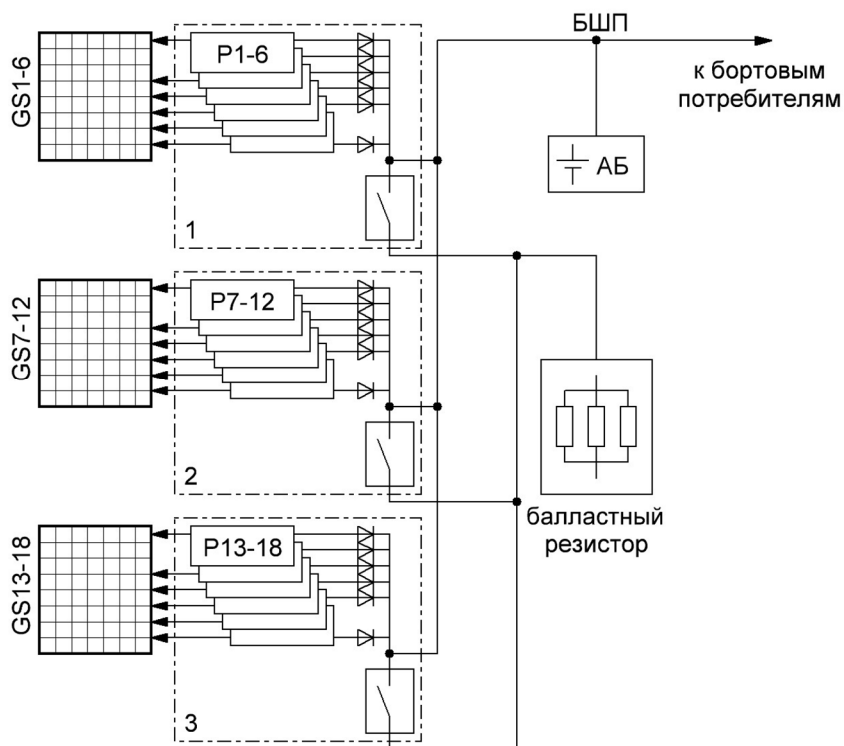


Рис. 4. СЭС с согласующими преобразователями напряжения, работающими независимо друг от друга

В такой структуре каждый солнечный генератор  $GS_i$  подключен к бортовой шине питания (БШП) аккумуляторной батареи (АБ) через собственный понижающий преобразователь напряжения постоянного тока ( $P_i$ ), реализующий алгоритм поиска точки максимальной мощности солнечного генератора. При достижении напряжения АБ на уровне окончания заряда выходная мощность преобразователей снижается до нуля. Таким образом, предотвращается перезаряд аккумуляторной батареи.

Алгоритм поиска точки максимальной мощности реализован в понижающем преобразователе напряжения, который преобразует напряжение солнечной батареи до уровня напряжения на шине питания и использующий обратную связь для слежения за напряжением БС в точке максимальной мощности.

При нештатной работе СЭС и возможности перезаряда АБ выходы преобразователей, объединенные в три группы, переключаются на балластный резистор для сброса избыточной мощности.

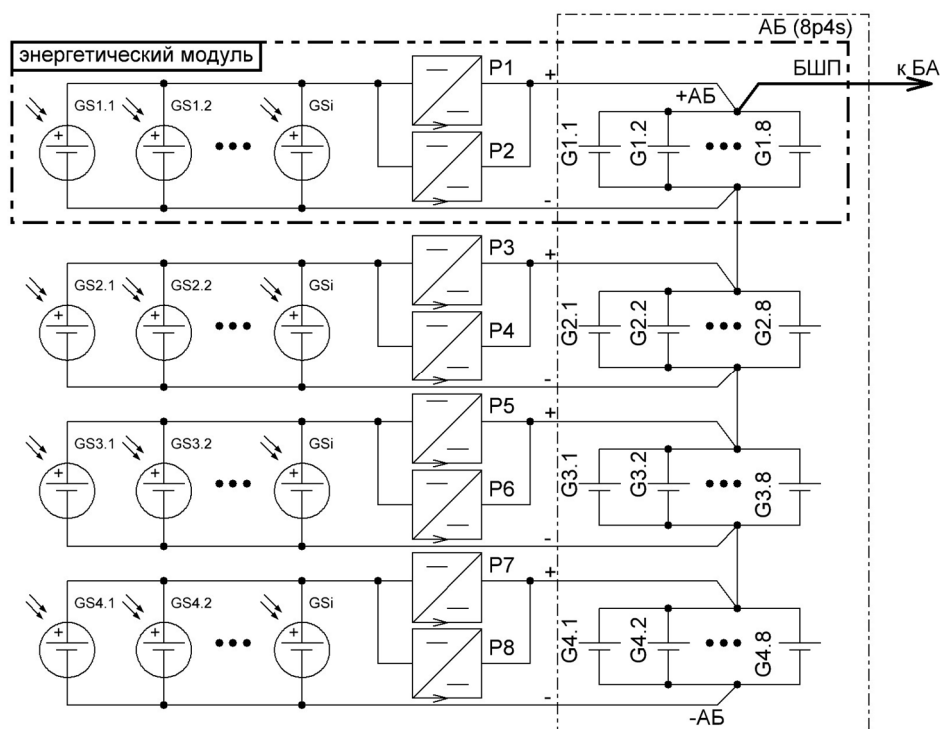
Система электроснабжения с согласующими преобразователями напряжения, работающими независимо друг от друга, позволяют обеспечить высокий уровень отказоустойчивости. Выход из строя одного преобразователя в незначительной мере (около 6%) уменьшит генерируемую мощность солнечной батареи, в то время как отказ контроллера системы питания (КСП) в СЭС, изображенной на рис. 1, приведет к отказу всей системы.

Преимущества систем с согласующими преобразователями напряжения в наибольшей степени реализуются в ситуациях, когда точка максимальной мощности на вольт-амперной характеристике солнечной батареи существенно меняет свое положение во время нахождения КА на освещенном участке орбиты. Такая ситуация характерна для низких орбит, на которых освещенность и температура БС значительно изменяются на участках витка орбиты с энергоприходом. Для геостационарных орбит (ГСО) использование систем с алгоритмом слежения за точкой максимальной мощности менее эффективно.

Недостатком СЭС с согласующими преобразователями напряжения являются высокая стоимость и масса преобразователей, связанная со сложностью реализации алгоритма слежения за точкой максимальной мощности.

Одной из основных задач при создании системы электропитания является обеспечение ее высокой надежности и отказоустойчивости. Для решения этой задачи может быть использовано схемотехническое решение (рис. 5), предложенное в [2].

В приведенной на рисунке СЭС БС разделена на гальванически не связанные группы соединенных параллельно солнечных генераторов  $GS_{ij}$ . Каждая группа солнечных генераторов через резервированные  $DC-DC$  преобразователи ( $P_i$ ) подключена к соответствующему аккумуляторному пакету, состоящему из 8-ми соединенных параллельно единичных аккумуляторов  $G_{ij}$ . При этом все вышеперечисленные элементы электрически объединены в единый энергетический модуль, который подключается к бортовой шине питания через силовые цепи аккумуляторных пакетов.



**Рис. 5. СЭС с подключением солнечных генераторов к индивидуальным аккумуляторным пакетам**

Такое построение СЭС позволяет повысить ее отказоустойчивость и надежность за счет:

- использования параллельно-последовательной электрической конфигурации АБ, в результате чего теряющий емкость единственный аккумулятор разгружается из-за роста внутреннего сопротивления и имеет близкую или меньшую по отношению к остальным глубину разряда и, как следствие, скорость деградации параметров;
- уменьшения в солнечных генераторах количества фотопреобразователей, соединенных последовательно, и увеличения количества цепочек, работающих параллельно;
- дублирования преобразователей напряжения.

### **Заключение**

Одной из важнейших задач при проектировании КА является выбор оптимальной структуры системы электроснабжения для рационального использования бортовых источников энергии.

Оптимальной, с точки зрения стоимости и массы, СЭС служит система с прямой передачей солнечной энергии на бортовую шину питания, а с точки



зрения эффективности генерирования солнечной энергии – СЭС с алгоритмом слежения за точкой максимальной мощности.

Использование энергетических модулей, состоящих из солнечных генераторов, подключенных к аккумуляторным пакетам через резервированные преобразователи, могут служить эффективным способом для повышения надежности и отказоустойчивости СЭС.

Выбор и применение той или иной структуры СЭС, в зависимости от тактико-технических требований и условий эксплуатации конкретных КА позволит повысить эффективность преобразования генерируемой энергии, надежность и удельные энергетические характеристики, а также снизить стоимостные показатели космических аппаратов в целом.

### **Литература**

1. Космический комплекс оперативного мониторинга техногенных и природных чрезвычайных ситуаций «Канопус-В» с космическими аппаратами «Канопус-В» № 3 и № 4. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ»», 2017. – 128 с.
2. Груздев А. И., Туманов В. Л. Заявка на изобретение №РСТ/RU 2007/000170. Комбинированный источник постоянного тока. Заявл. 11.04.2007, оп. 23.10.2008, pub. No. WO/2008/127137.

Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.

ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА 2019 ГОД

Материалы  
Седьмой международной  
научно-технической конференции  
**«Актуальные проблемы  
создания космических систем  
дистанционного зондирования Земли»**

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано в печать 02.12.2019.

Формат 70 × 100 1 / 16. Печ. л. 9. Тираж 100 экз.

Адрес редакции: АО «Корпорация «ВНИИЭМ»,  
105187, Российская Федерация, г. Москва, ул. Вольная, д. 30.

E-mail: [vniiem@vniiem.ru](mailto:vniiem@vniiem.ru).

Отпечатано в ООО «САМ-ПОЛИГРАФИСТ»,  
г. Москва, Волгоградский просп., д. 42, корп. 5.  
Тел.: (495)545-37-10. [www. onebook.ru](http://www.onebook.ru)

© АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2019