

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. Нургужин**
(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 2018

МАТЕРИАЛЫ
шестой международной
научно-технической конференции

**АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ
СОЗДАНИЯ КОСМИЧЕСКИХ
СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ**



МОСКВА 2018

ОРГАНИЗАЦИОННЫЙ КОМИТЕТ КОНФЕРЕНЦИИ

Председатель Оргкомитета

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

Сопредседатели:

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

Л. М. Зеленый – член Президиума РАН, директор ИКИ РАН,
председатель совета РАН по космосу

О. А. Горшков – генеральный директор 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 «Казакстан 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 оргкомитета 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 космическим системам
и комплексам – заместитель генерального директора ФГУП ЦНИИмаш

А. Н. Кирилин – 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
Результаты измерения УФ-свечения ночной атмосферы с высоким временным разрешением на борту космического аппарата «Ломоносов» П. А. Климов, М. И. Панасюк, Б. А. Хренов от имени коллаборации «Ломоносов»	6
Вопросы оптимизации программы модернизации космической системы дистанционного зондирования Земли в планируемый период В. А. Ламзин, В. В. Ламзин, Ю. А. Матвеев	15
Дистанционное зондирование планет солнечной системы Л. А. Ведешин	26
Направления совершенствования ключевых элементов системы управления космическими объектами дистанционного зондирования Земли Ю. С. Луценко, М. М. Матюшин	33
Обеспечение требуемого уровня стойкости аппаратуры КА, функционирующего на геостационарной орбите В. А. Хатулев, А. Н. Загорков, О. В. Михеев, А. Е. Ошкин	43
Гамма-спектрометрическая аппаратура для обнаружения радиоактивного космического мусора А. Е. Шустов, С. Е. Улин, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, В. В. Дмитренко, К. В. Кривова, А. С. Новиков, З. М. Утешев, И. В. Чернышева	51
Обработка данных спутникового высотомера Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур	58
Реализация процессов сбора, хранения и обработки информации в аспекте применения информационных систем космического мониторинга МЧС России для обеспечения принятия управленческих решений Я. В. Алексеенко	71
Цифровое моделирование рельефа северных арктических территорий РФ для геоэкологического районирования Ю. Г. Кутинов, А. Л. Минеев, З. Б. Чистова, Е. В. Полякова	78
Об измерении рельефа местности при радиолокационной съемке по технологии РСА А. Е. Евграфов, В. Г. Поль, С. В. Шостак	90
Определение признаков текстурной информативности космических снимков БКА на основе кластерного анализа А. А. Золотой, А. В. Урбанович	99

Априорная оценка кинематических смещений и погрешностей координат точек изображения при сканерной съемке Земли с КА В. Я. Геча, М. Ю. Жилнев, А. О. Бабаков	110
Использование сверточных нейронных сетей для распознавания состояния сельскохозяйственной растительности по данным аэрофотосъемки В. В. Ганченко, А. А. Дудкин	119
Космический мониторинг и управление горнорудными и коммунальными отходами Л. А. Ведешин, А. А. Рихтер	128
Концепция космической системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки А. В. Карелин, Е. М. Твердохлебова, В. А. Шувалов, А. А. Яковлев	139
Мониторинг электромагнитных транзиентов в атмосфере Земли в проекте МГУ «Универсат-СОКРАТ» М. И. Панасюк, В. В. Богомолов, Г. К. Гарипов, П. А. Климов, В. Л. Петров, С. И. Свертилов	149
Пути совершенствования испытания реле на центрифуге Ю. Н. Черкасов	162
Разработка совмещенного способа испытания реле на вибростенде Ю. Н. Черкасов	170

ПРЕДИСЛОВИЕ

Одними из важных и актуальных вопросов космической науки и техники на сегодняшний день являются развитие космических систем дистанционного зондирования Земли, создание новых, в том числе малых, космических аппаратов, систем наземной обработки космической информации и алгоритмов ее обработки. Данные дистанционного зондирования Земли из космоса стали важным источником для решения практических задач государственного, регионального и местного управления, мониторинга природных и техногенных объектов и явлений. Растет число потребителей космической информации, которая активно используется не только в научных и производственных целях, но и в повседневной жизни.

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 зависит от наблюдений Земли из космоса.

Для нашего предприятия тематика дистанционного зондирования Земли является основной, хотя и не единственной. В настоящее время на орбите Земли находятся девять наших КА ДЗЗ, в этом году на орбиту успешно выведено три аппарата ДЗЗ, включая КА «Канопус-В» № 3 и № 4, планируются пуски еще трех КА.

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 2018 г. в шестой 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*

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЯ УФ-СВЕЧЕНИЯ НОЧНОЙ АТМОСФЕРЫ С ВЫСОКИМ ВРЕМЕННЫМ РАЗРЕШЕНИЕМ НА БОРТУ КОСМИЧЕСКОГО АППАРАТА «ЛОМОНОСОВ»

П. А. Климов, М. И. Панасюк, Б. А. Хренов
от имени коллаборации «Ломоносов»

(Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова»,
Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына, г. Москва)

Аннотация. Орбитальный детектор «ТУС» (Трековая установка), запущенный в составе научной аппаратуры спутника «Ломоносов» 28 апреля 2016 г. с космодрома Восточный представляет собой телескоп-рефлектор, состоящий из зеркала-концентратора френелевского типа большой площади (2 м^2), фотоприемника, расположенного в фокальной плоскости зеркала, системы отвода фотоприемника для защиты от прямого попадания солнечных лучей в случае потери ориентации аппарата и датчика солнечной засветки. Фотоприемник представляет собой матрицу из 256 фотоэлектронных умножителей (ФЭУ) типа Hamamatsu R1463 с электроникой для обработки и анализа сигналов. Диапазон длин волн в котором производится измерение составляет 240 – 400 нм и определяется полосой пропускания светофильтров (УФС1) и квантовой эффективностью ФЭУ. Использование большого зеркала-концентратора и ФЭУ позволяет достичь высокой чувствительности прибора и временного разрешения 0,8 мкс. Телесный угол обзора ячейки составляет 10^4 ср, что в атмосфере соответствует наблюдению квадрата $5 \text{ км} \times 5 \text{ км}$ при высоте орбиты 500 км, а все поле зрения детектора составляет $\pm 4,5^\circ$. Система последовательных цифровых осциллографов, реализованных в ПЛИС модулей фотоприемника позволяет производить наблюдения с разным временным разрешением 0,8 мкс, 24,6 мкс, 0,4 мс и 6,6 мс. Это дает возможность измерять как медленные пространственные вариации УФ-свечения (авроральный овал, антропогенные источники на поверхности Земли), так и быстрые явления (вспышки, вызываемые космическими лучами, вспышки от молний, высокоатмосферные вспышки-транзиенты и пр.). За время работы детектора на орбите были проведены измерения во всех режимах работы. В первом режиме зарегистрированы кандидаты в широкие атмосферные ливни (ШАЛ) от космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ), события, вызванные частицами космических лучей низких энергий в телескопе, получены интересные данные о пространственно-временной структуре высоко атмосферных транзитных явлениях типа эльв. Эльв – это кратковременная вспышка света (УФ в том числе) длительностью менее 1 мс, которая представляет собой расширяющееся кольцо толщиной ~ 20 км и диаметром до ~ 300 км на высоте 80 – 90 км. В литературе такое кольцо обычно наблюдается в единственном числе. В эксперименте ТУС при большой статистике наблюдаются необычные события, состоящие из пары и более колец.

Ключевые слова: космический эксперимент, УФ-телескоп, излучение атмосферы, космические лучи.

Введение

Одной из главных задач исследования вспышек ультрафиолета (УФ) в ночной атмосфере, поставленных перед телескопом ТУС, является изучение вспышек, вызываемых частицами космических лучей предельно высоких энергий (КЛПВЭ, $E > 5 \cdot 10^{19}$ ЭэВ) [1], в условиях орбитального полета телескопа.

Первая частица столь высокой энергии была зарегистрирована в работе [2]. Вместе с тем было показано [3, 4], что энергетический спектр космических частиц может испытывать обрыв в связи с поглощением таких частиц в межгалактическом пространстве на фотонах Большого Взрыва, заполняющих Вселенную – обрыв Грейзена – Зацепина – Кузьмина (ГЗК). Прошло более 50 лет после публикации работ [2 – 4], но ситуация с установлением обрыва спектра и пониманием экспериментальных данных о КЛПВЭ остается неопределенной, в основном, из-за исключительно низкой интенсивности частиц с энергией в районе обрыва спектра. Самые крупные наземные установки: обсерватория Пьер Оже и Telescope Array за последние десять лет регистрировали только 17 событий с энергией выше 100 ЭэВ [5, 6], что не позволяет сделать окончательные выводы о природе событий и их энергетическом спектре.

Линсли и Бенсон предложили [7, 8] развитие исследования КЛПВЭ путем наблюдения флуоресценции атмосферы, возбуждаемой частицами широкого атмосферного ливня (ШАЛ), генерированной частицей КЛПВЭ, с помощью телескопа на орбите спутника Земли. Такой телескоп, в принципе, может иметь площадку обзора атмосферы на два порядка выше площади, получаемой на наземных установках и проводить измерения направления прихода частиц по всей небесной сфере. Телескоп ТУС, предложенный в качестве «первопроходца» в [9], является первым подобным детектором, который позволяет проверить условия его работы на орбите, в особенности роль шумов, связанных со вспышками УФ в ночной атмосфере.

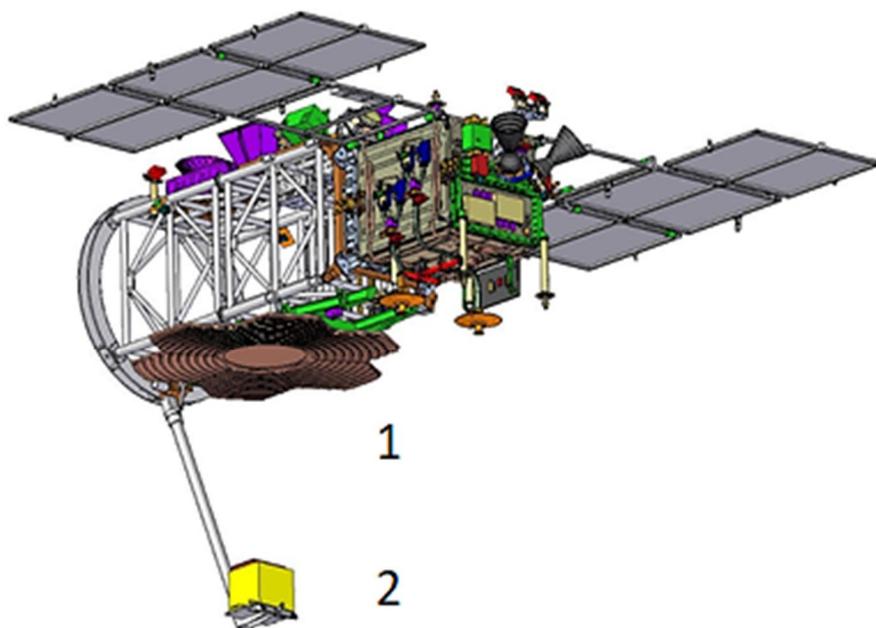
Телескоп ТУС входит в состав научной аппаратуры спутника «Ломоносов», запущенного с космодрома «Восточный» на орбиту с наклоном $97,3^\circ$, и с высотой 470 – 500 км.

Описание телескопа ТУС

ТУС состоит из двух основных частей: составного зеркала-концентратора френелевского типа и фотодетектора в его фокальной плоскости (рис. 1) на расстоянии 1,5 м от зеркала. Последний состоит из 256 ячеек с квадратным входным окном со стороны 15 мм, перекрывающих поле зрения телескопа $9^\circ \times 9^\circ$. В качестве сенсора УФ в ячейке фотодетектора используется фотоэлектронный умножитель Hamamatsu R1463 с диаметром фотокатода 13 мм, на который собирается свет от входного отверстия ячейки с помощью зеркального световода. На входе фотокатода ФЭУ стоит фильтр УФС-1, который обрезает излучение с длиной волны более 400 нм. Со стороны малых длин волн эффективность преобразования числа квантов излучения в число фотоэлектронов обрезается эффективностью катода ФЭУ так, что в диапазоне длин волн ближнего УФ (240 – 400 нм) преобразование числа фотонов в число фотоэлектронов составляет 20 %. Эффективность сбора УФ в фокальной плоскости детектора была проверена в контрольных измерениях [10]. Радиус пятна фокусирования, которое следует из измерений «функции рассеяния точки» (ФРТ) увеличивается с углом η относительно оптической оси телескопа, и составляет порядка одной ячейки фотоприемника при $\eta = 0^\circ$ и двух при $\eta = 4,5^\circ$ (край детектора). Площадь зеркала-концентратора составляет 2 м^2 .

Электроника отбора событий и запоминания их данных построена на основе структуры фотодетектора, состоящего из 16 модулей по 16 ячеек в модуле. Адрес

ячейки имеет две цифры – номер модуля и номер ячейки в модуле. В ячейке с заданным адресом каждые 0,8 мкс измеряется заряд на выходе диодной системы ФЭУ с выходным RC = 0,6 мкс с помощью 10-канального АЦП. В измерении одного события используется 256 шагов по 0,8 мкс. Такое высокое разрешение применяется для измерения быстрых событий ШАЛ от космических лучей, длительность которых не превышает 200 мкс. Для отбора и измерения более медленных событий (молнии, транзиентные атмосферные явления, метеороиды) используются более длинные шаги измерения, соответствующие длительности изучаемого явления: 24,6 мкс, 0,4 мс и 6,6 мс, с тем же числом шагов 256.



**Рис. 1. Телескоп ТУС на борту спутника Ломоносов:
1 – зеркало-концентратор; 2 – фотодетектор**

Для каждого изучаемого явления в полете применяется своя логика отбора событий. Отбор осуществляется в два этапа: сначала отбираются ячейки, в которых амплитуда превышает заданный порог сигнала, затем выбираются события с заданным числом «сработавших» на первом этапе ячеек, оказавшихся близко друг к другу. В случае отбора ШАЛ отбираются не просто соседние сработавшие ячейки – к этому требованию прибавляется требование разницы во времени прихода сигналов в соседние ячейки около 20 – 40 мкс, ожидаемой за счет скорости движения частиц ШАЛ вдоль направления первичной частицы.

Отобранные электроникой телескопа события запоминаются в оперативной памяти и отправляются в блок информации (БИ) аппарата, откуда передаются в центр управления полетом. Дальнейший отбор событий и их анализ проводится на

Земле по показаниям всех ячеек телескопа. Более подробное описание сбора экспериментальных данных телескопа ТУС см. работы [11 – 14].

В настоящее время получены первые результаты измерения телескопом ТУС вспышек УФ разной природы.

Результаты измерения событий разной природы

Трек широкого атмосферного ливня (ШАЛ), вызванного частицей KLnBЭ

События ШАЛ отбираются триггером ШАЛ, который настроен на прием самых быстрых событий с длительностью не более 200 мкс и шагом развертки цифрового осциллографа 0,8 мкс. Ожидаемые события ШАЛ были моделированы по программе ESAF [15], которая по заданным параметрам первичной частицы, генерирующей ШАЛ, рассчитывает осциллограммы сигнала в ячейках ТУС. На рис. 2 (слева) приведена осциллограмма суммарного сигнала ШАЛ с первичной энергией 200 ЭэВ и зенитным углом 60° . На правом рис. 2 представлена карта из 8 «сработавших» ячеек в этом событии. В безлунную ночь такое событие ШАЛ будет наблюдаться на фоне шума свечения ночной атмосферы. Согласно данным спутников МГУ [16 – 18], изучавших шум ночной атмосферы в телескопе типа ТУС, шум составляет порядка 5 – 10 единиц, принятых для описания моделированных ШАЛ на рис. 2. Как видно, частицы с энергией около 200 ЭэВ создают сигналы в осциллограмме в максимуме в 5 раз больше шума.

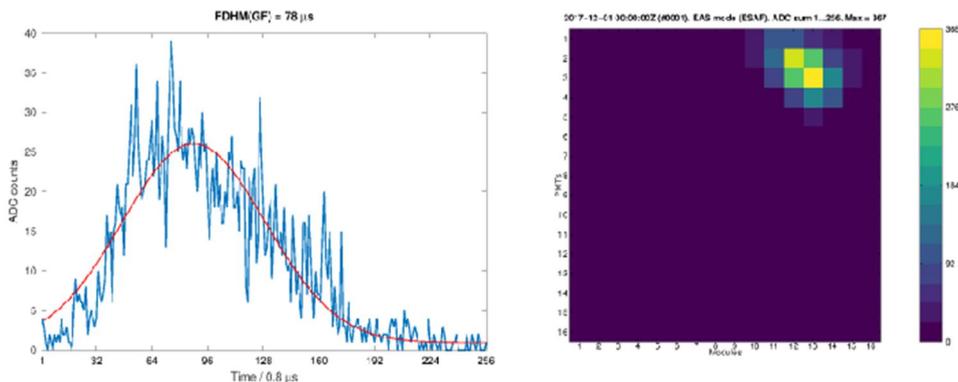


Рис. 2. Рассчитанные по программе ESAF осциллограмма суммарного сигнала ШАЛ (слева) и карта сработавших ячеек (справа)

Анализ событий, отобранных электронной системой отбора ТУС в режиме триггера ШАЛ, выявил 13 событий-кандидатов в события ШАЛ за 2016 год [19]. Среди них есть событие, зарегистрированное 3.10.2016, в котором статистически достоверно получены данные цифровых осциллограмм в 10 сработавших ячейках. По данным о последовательной во времени регистрации максимума осциллограммы в ячейках получена оценка зенитного угла ШАЛ $\sim 50^\circ$ (ошибка измерения угла по предварительным данным составляет около 5 – 10°), а значение энергии (предварительные данные) – не менее 300 ЭэВ. На рис. 3 показаны экспериментальные осциллограммы сигнала в отдельных ячейках (основной рис.) и карта сработавших ячеек (панель в верхнем правом углу).

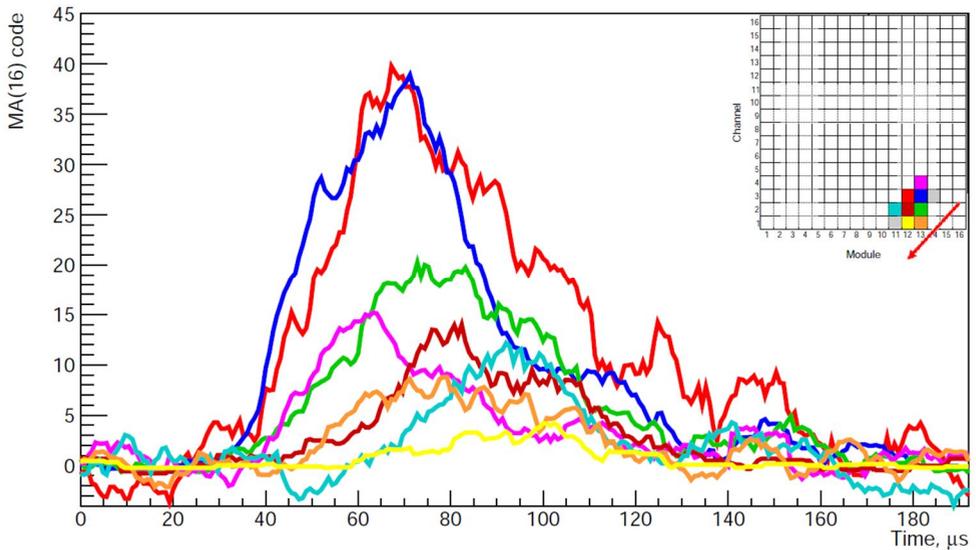


Рис. 3. Экспериментальные осциллограммы ШАЛ, измеренного 3.10.2016, и карта сработавших ячеек

Мгновенные треки при прохождении высокоионизирующих частиц космических лучей через стеклянные детали фотодетектора

Неожиданным явлением, обнаруженном при работе телескопа ТУС на орбите, оказались сигналы в ячейках, появляющиеся одновременно (в пределах временного разрешения 0,8 мкс) в нескольких ячейках, лежащих на одной прямой (рис. 4).

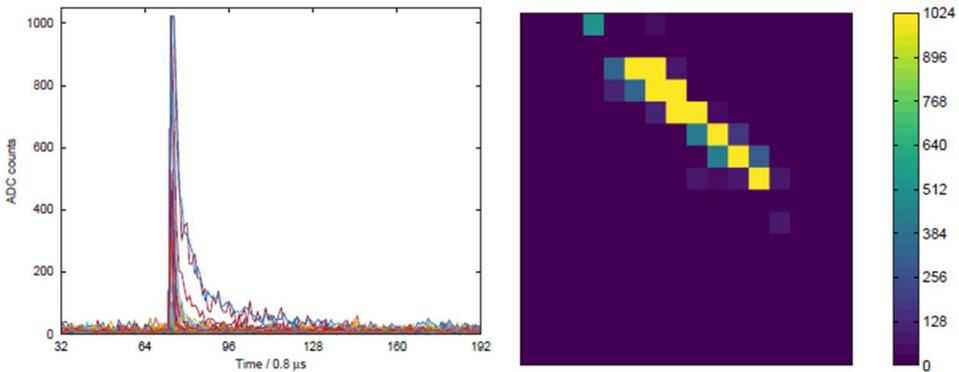


Рис. 4. Мгновенный трек. Слева – осциллограммы в сработавших ячейках. Справа – карта сработавших ячеек

Такие «мгновенные» треки отбирались триггером ШАЛ с частотой около 6 ч^{-1} – на порядки выше, чем треки ШАЛ. Уже в первые месяцы работы детектора ТУС на орбите было выяснено, что мгновенные треки регистрируются в основном на высоких широтах – там, где потоки частицы радиационных поясов наиболее интенсивны. В расчетах по программе Geant-4 было показано, что прохождение протонов с энергией 0,1 – 1 ГэВ через стеклянные УФ-фильтры на входе ячеек и через стекло конструкции ФЭУ может возбуждать флуоресценцию стекла, а

фотокатоды ФЭУ могут преобразовывать фотоны флуоресценции в фотоэлектроны, число которых умножается в диодной системе ФЭУ до величин, наблюдающихся в «мгновенных» треках. По данным о протонах в радиационных поясах Земли известно, что энергетический спектр протонов на высоких широтах $40^\circ - 60^\circ$ содержит достаточное количество протонов $0,1 - 1$ ГэВ, и при движении параллельно стеклу фильтров и стеклу на входе ФЭУ такие частицы могут создавать мгновенные «треки» из нескольких ячеек. Экспериментальное распределение зарегистрированных мгновенных треков по широте их наблюдения (работа [20]) подтверждает эту интерпретацию мгновенных треков.

События мгновенных треков надежно разделяются от событий ШАЛ в детекторах с временным разрешением выше одной микросекунды, благодаря тому, что положение максимума сигнала ШАЛ от ячейки к ячейке изменяется более, чем на десять микросекунд. Вместе с тем при проектировании новых орбитальных телескопов для изучения ШАЛ следует учитывать существенный вклад событий мгновенных треков в общую частоту срабатывания триггера ШАЛ.

Эльвы – один из типов транзитных атмосферных явлений

Триггер ШАЛ срабатывает от еще одного типа событий – эльвов, которые были обнаружены и изучены с помощью видеокамер с временным разрешением менее 1 мс. В настоящее время известно, что разряд типа эльв возникает при пересечении ионосферного слоя Д электромагнитным импульсом (ЭМИ) молнии [21]. На рис. 5 представлено «обычное» событие эльв, зарегистрированное телескопом ТУС.

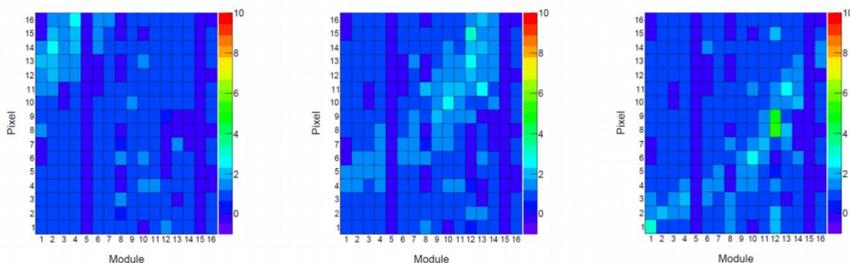


Рис. 5. Карта сработавших ячеек в событии эльв. Моменты времени слева-направо 60, 140 и 200 мкс

Карта сработавших ячеек демонстрирует развитие эльва во времени – от радиуса кольца около 25 км в момент срабатывания триггера и до кольца с радиусом более 70 км – в конце разверток осциллографов сработавших ячеек. Молния, ответственная за этот эльв, зарегистрирована сетью детекторов молний Vaissala [22] в том месте, где расположен центр кольца эльва.

Интересно, что детектор ТУС впервые наблюдал с орбиты Земли аналогичные события, но с более сложной пространственно-временной структурой: в течение длительности развертки осциллографов 200 мкс наблюдаются два кольца и больше, следующих одно за другим с разрывом во времени около 50 – 60 мкс, с общим центром. Такие двойные кольца можно ожидать в случае возникновения второго, отраженного ЭМИ молнии от слоя ионосферы к Земле и обратно [23]. В нашем случае на это указывает значение времени между кольцами, соответствующее разнице времени распространения первичного и вторичного ЭМИ со скоростью света. Пример осциллограммы и карты каналов двойного эльва приведены на рис. 6.

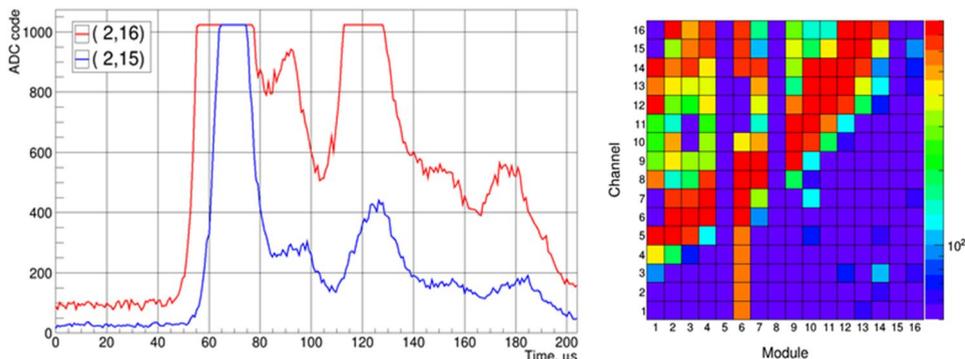


Рис. 6. Двойной эльв. Слева – осциллограммы двух ячеек фотоприемника, справа – карта каналов

Обсуждение результатов

Орбитальный телескоп ТУС позволил впервые измерить трек, который является по всей видимости событием типа ШАЛ, генерированного первичной частицей космических лучей с энергией выше 300 ЭэВ с высоты 500 км над атмосферой Земли. Шум свечения атмосферы в безлунную ночь составляет основную компоненту шума при отборе событий ШАЛ с пороговой энергией 100 – 200 ЭэВ. Вместе тем триггер телескопа ТУС, настроенный на отбор ШАЛ таких энергий, сравнительно часто реагирует и события другой природы. Среди них наиболее частыми событиями оказались мгновенные треки, генерируемые в стекле фотосенсоров телескопа сильно ионизирующими частицами космических лучей. Их высокая частота должна быть принята во внимание при оценке ожидаемого объема полной информации, принимаемой будущими орбитальными телескопами большого масштаба. Еще одними из неизбежных событий, отбираемых триггерами ШАЛ, являются транзиентные атмосферные явления в ультрафиолете, которые имеют сравнимую с ШАЛ по размерам и длительности пространственно-временную структуру. В телескопе ТУС события не ШАЛовской природы составили около 20 % всех отбираемых событий (80 % событий связаны со статистическими флуктуациями фотонов, имитирующими ШАЛ с энергией ниже пороговой).

Заключение

Полученные в течение 2 лет работы на орбите данные телескопа ТУС подтверждают возможности построения и использования орбитальных телескопов для изучения космических лучей ультравысокой энергии. Подобные телескопы (проекты КЛПВЭ, JEM-EUSO, РОЕММА), будут использованы также для глобального изучения транзиентных атмосферных явлений, имеющих важное значение в исследовании атмосферы Земли.

Благодарности

Работа поддержана Государственной корпорацией «Роскосмос», Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова (через программу Перспективные направления развития МГУ) и РФФИ грант №16-29-13065. Авторы благодарны Vaisala Inc. соmpany за предоставленные данные о молниях.

Литература

1. Dawson B. R., Fukushima M., Sokolsky P. Past, present and future of UHECR observations // *Prog. Theor. Exp. Phys.* – 2017. – P. 12A101.
2. Linsley J., Scarsi L., Rossi B. Extremely Energetic Cosmic-Ray Event // *Physical Review Letters* 6. – 1961. – P. 485 – 487.
3. Greisen K. End to the cosmic-ray spectrum // *Phys. Rev. Lett.* 16. – 1966. – P. 748 – 750.
4. G. T. Zatsepin and V. A. Kuz'min. Upper limit of the spectrum of cosmic rays // *Soviet Journal of Experimental and Theoretical Physics.* – Letters 4 (Aug., 1966), 78.
5. Pierre Auger collaboration, Fenu F. The cosmic ray energy spectrum measured by the Pierre Auger Observatory // *Proceedings of Science (ICRC2017).* – 2017. – V. 486.
6. Tsunesada Y., AbuZayyad T., Ivanov D., Thomson G., Fujii T., Ikeda D. Energy spectrum of ultra-high-energy cosmic rays measured by the Telescope Array // *Proceedings of Science (ICRC2017).* – 2017. – V. 535.
7. Benson R., Linsley J. Satellite Observation of Cosmic-Ray Air Showers // *Bulletin of the American Astronomical Society.* – 1980. – V. 12. – P. 818.
8. Benson R., Linsley J. Satellite observation of cosmic ray air showers // *Proceedings of 17th International Cosmic Ray Conference.* – 1981. – V. 8. – P. 145 – 148.
9. Khrenov B. A., Panasyuk M. I., Alexandrov V. V., et al. Space Program KOSMOTEPETL (project KLYPVE and TUS) for the study of extremely high energy cosmic rays, in *Observing Ultrahigh Energy Cosmic Rays from Space and Earth.* American Institute of Physics Conference Series. – 2001. – V. 566. – P. 57 – 75.
10. Garipov G., Grinyuk A., Grebenyuk V., et al. The TUS Fresnel mirror production and optical parameters measurement. *Particles and Nuclei Letters.* 10(1). – 2013. – P. 84 – 93.
11. Klimov P. for the TUS collaboration. Ultra high energy cosmic rays detector TUS onboard Lomonosov satellite // *Proceedings, 33rd International Cosmic Ray Conference (ICRC2013).* – 2013. – P. 0406.
12. Klimov P. A., Panasyuk M. I., Khrenov B. A., Garipov G. K., Kalmykov N. N., Petrov V. L., et al. The TUS detector of extreme energy cosmic rays on board the Lomonosov satellite // *Space Science Reviews.* – 2017. – V. 8. – P. 1 – 17.
13. Grinyuk A. A., Tkachenko A. V., Tkachev L. G., the TUS Collaboration. The TUS orbital detector optical system and trigger simulation // *Journal of Physics Conference Series.* 409. – 2013. – P. 012105.
14. Grinyuk A., Grebenyuk V., Khrenov B., et al. The orbital TUS detector simulation // *Astroparticle Physics,* 90. – 2017. – P. 93 – 97.
15. Berat C., Bottai S., De Marco D., Moreggia S., Naumov D., Pallavicini M., et al. Full simulation of space-based extensive air showers detectors with ESAF // *Astroparticle Physics,* 33. – 2010. – P. 221 – 247.
16. Garipov G. K., Khrenov B. A., Klimov P. A., Klimenko V. V., Mareev E. A., et al. Global transients in ultraviolet and red-infrared ranges from data of Universitetsky-Tatiana-2 satellite // *Journal of Geophysical Research (Atmospheres),* 118. – 2013. – P. 370 – 379.
17. Sadovnichy V. A., Panasyuk M. I., Bobrovnikov S. Y., Vedenkin N. N., Vlasova N. A., Garipov G. K., et al. First results of investigating the space environment onboard the Universitetskii-Tatyana satellite // *Cosmic Research,* 45. – 2007. – P. 273 – 286.
18. Klimov P., Garipov G., Khrenov B., Morozenko V., Barinova V., Bogomolov V., et al. Vernov satellite data of transient atmospheric events // *Journal of Applied Meteorology and Climatology,* 56. – 2017. p. 2189 – 2201.
19. Biktemerova S. V. and Lomonosov-TUS/TLE collaboration. Search for extreme energy cosmic ray candidates in the TUS experimental data. – arXiv: 1706.05369. 2017.

20. Klimov P. A., Zotov M. Yu., Lomonosov-TUS/TLE collaboration. Preliminary results of the TUS orbital telescope registering low energy cosmic ray passing through the detector // *Bull. Rus. Academy Sci.* – 2017. – V. 81. – P. 407 – 409.
21. Cheng-Ling Kuo , Chen A. B., Lee Y. J. et al. Modeling elves observed by Formosat-2 satellite // *JGR.* – 2007. – V. 112. – A11312.
22. Said R., Murphy M. GLD360 upgrade: Performance analysis and applications // 24th Int. Lightning Detection Conf. and Sixth Int. Lightning Meteorology Conf. American Institute of Physics, Conference Series. – 2016. – P. 8.
23. Marshall R. A., Silva C. L., Pasko V. P. Elve doublets and compact intracloud discharges // *Geophysical Research Letters*, 42. – 2015. – P. 6112 – 6119.

ВОПРОСЫ ОПТИМИЗАЦИИ ПРОГРАММЫ МОДЕРНИЗАЦИИ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ В ПЛАНИРУЕМЫЙ ПЕРИОД

В. А. Ламзин, В. В. Ламзин, Ю. А. Матвеев
(Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)»,
г. Москва)

Аннотация. Рассматриваются особенности постановки задачи оптимизации программы модернизации космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Приводится алгоритм решения задачи и основные соотношения проектной модели. Определяется рациональная программа модернизации КС ДЗЗ в планируемый период при наличии технико-экономических ограничений.

Ключевые слова: дистанционное зондирование Земли, космическая система, космический аппарат, программа развития, модернизация, модификация, проектная модель, оптимизация.

Модернизация космической системы (КС) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) связана с внесением изменений (замена подсистем или добавление новых подсистем) в базовую систему с целью повышения ее технико-экономической эффективности при новых условиях использования. От состава и параметров заменяемых подсистем зависит и формирование программы модернизации (числа, сроков и состав замены подсистем). Проектные исследования с учетом развития (модернизации) техники в планируемый период связаны с решениями вопросов оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ в планируемый период. Вопросы оптимизации программы модернизации, включая определение основных параметров перспективной техники в планируемый период, представляют научный и практический интерес. Перспективным способом решения данных вопросов может стать разработка метода, основанного на многоуровневом управлении разработкой, многоуровневой модели проектных исследований и статистическом методе многоуровневой согласованной оптимизации.

В докладе рассматривается задача оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ, в основе решения которой схема двухуровневого управления разработкой, двухуровневая модель проектных исследований и статистический метод двухуровневой согласованной оптимизации [1 – 5]. Приводится алгоритм решения задачи и основные соотношения проектной модели, определяется рациональная программа модернизации системы в планируемый период при наличии технико-экономических ограничений. При постановке задачи используется укрупненная структура КС ДЗЗ, состоящая из космического и наземного сегментов. В состав космического сегмента входит орбитальная группировка объектов (подсистем). В качестве объекта выступает космический аппарат (КА), включающий модули целевой аппаратуры (МЦА) и служебных

подсистем (МСП). В состав наземного сегмента входит: ракетно-космический комплекс (РКК*), из состава которого выведен КА; наземный комплекс управления (НКУ); наземный комплекс приема, обработки и распространения информации (НКПОР).

Задача на верхнем уровне управления разработкой формулируется в детерминированной постановке и представляется в следующем виде: при заданной целевой нагрузке $\Pi^M(t_{\text{рп}})$ и векторе параметров наземного сегмента $\Pi_{\text{НС}}(\cdot)$ определить программу модернизации проекта КС с тем, чтобы эффективность системы была не ниже заданной, а суммарные приведенные затраты на модернизацию проекта системы в планируемый период были минимальными. Формально математическая постановка задачи представляется в виде:

$$\begin{aligned}
 C_{\Sigma_{\text{КС}}}^M(\Pi_{\text{КС}}^M(\cdot), PR^M(t), \beta(t_{\text{рп}})) &\rightarrow \min_{\Pi_{\text{КС}}^M(\cdot), PR^M(t) \in G_{\text{КС}}^M(\cdot)} & (1) \\
 I_{\text{ПРКС}}^M(\Pi_{\text{КС}}^M(\cdot), \Pi^M(t_{\text{рп}})) &\geq I_{\text{ПРКС}}^{M^T}; \\
 W_{\text{КС}}^M(I_{\text{ПРКС}}^M, \dots) &\geq W_{\text{КС}}^{M^T}; \\
 P_{\text{КС}}^M(\cdot) &\geq P_{\text{КС}}^{M^T}; M_{\text{КА}}^M(\cdot) \leq M_{\text{КА}}^{M^T}; \\
 \Pi^M(t_{\text{рп}}) &= \Pi^M(t_{\text{рп}})^T; \Pi_{\text{НС}}(\cdot) = \Pi_{\text{НС}}(\cdot)^T; \\
 t_{\text{рп}} &\in \langle T^M \rangle; \langle T^M \rangle > \langle T \rangle,
 \end{aligned}$$

где $C_{\Sigma_{\text{КС}}}^M(\cdot)$ – суммарные приведенные затраты на программу модернизации проекта системы в планируемый период; $\Pi_{\text{КС}}^M(\cdot)$ – функция, определяющая состав замены подсистем и параметры заменяемых подсистем; $PR^M(t)$ – функция, определяющая программу модернизации проекта: число и сроки замены подсистем при восстановлении или развитии (модернизации) системы; $\beta(t_{\text{рп}})$ – вектор определяющих параметров к времени реализации проекта модернизации системы $t_{\text{рп}}$; $G_{\text{КС}}^M(\cdot)$ – область ограничений параметров; $W_{\text{КС}}^M(\cdot)$, $I_{\text{ПРКС}}^M(\cdot)$ и $P_{\text{КС}}^M(\cdot)$ – соответственно, функции эффективности применения, информационной производительности и надежности КС ДЗЗ при модернизации проекта в планируемый период; $M_{\text{КА}}^M(\cdot)$ – масса модификации КА ДЗЗ; $\langle T^M \rangle$ – временной интервал модернизации проекта; $\langle T \rangle$ – временной интервал существования базовой системы; индекс т – требуемые (заданные) значения.

Вектор варьируемых параметров включает параметры модификации КА. Параметры базового объекта известны, рассматриваемый временной интервал $\langle T^M \rangle$ больше временного интервала существования базовой системы – $\langle T \rangle$. Критерий поиска решения задачи (1) – суммарные приведенные затраты на реализацию программы модернизации КС ДЗЗ. При оптимизации (оценки) выбирается рациональная программа модернизации проекта КС ДЗЗ, временной граф которой приведен на рис. 1.

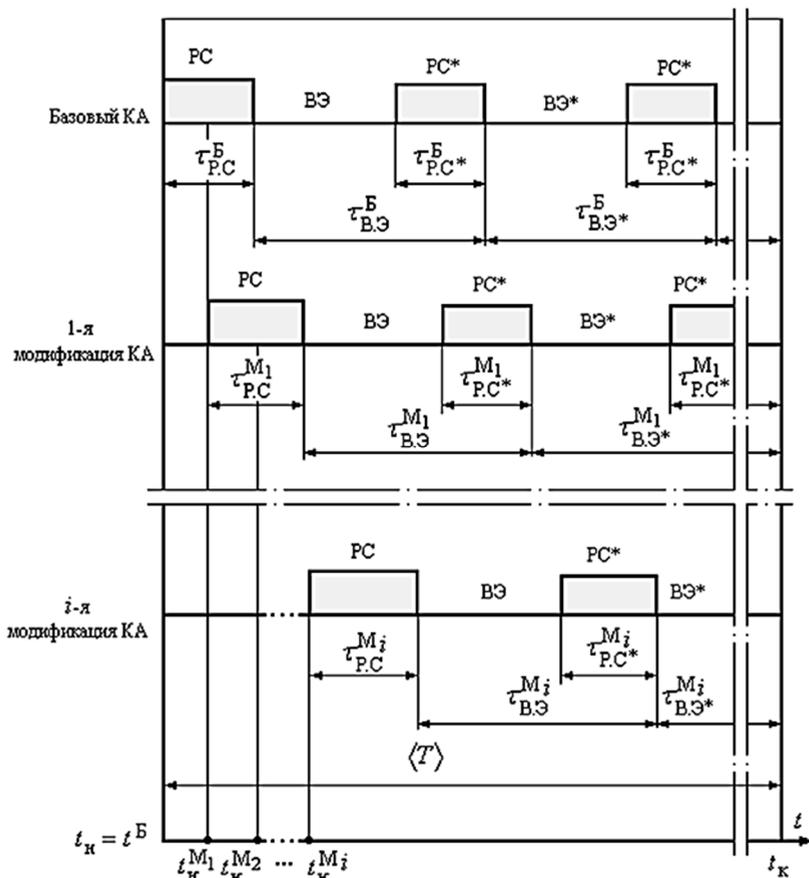


Рис. 1. Временной граф программы модернизации КС ДЗЗ в планируемый период

Этапы работ для модификаций КА включают: PC – разработку и создание 1-го образца КА, BЭ – выведение и эксплуатацию 1-го образца КА. Этапы с индексом (*) принадлежат последующим образцам КА (модификациям КА). Блок-схема алгоритма решения задачи оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ в планируемый период включает блоки формирования вариантов модификации КА, оптимизации программы модернизации, оценки информационной производительности, надежности и целевой эффективности, а также определения суммарных приведенных затрат на реализацию программы модернизации.

При решении задачи используются проектные модели габаритно-массовых характеристик, надежности, затрат на создание (изготовление) 1-го базового образца подсистем КА (МЦА и МСП), суммарных затрат на КС ДЗЗ верхнего уровня управления разработкой. Проектные модели габаритно-массовых характеристик, надежности, затрат на создание (изготовление) 1-го базового образца подсистем КА (МЦА и МСП) приведены в [1]. При формировании модели затрат на реализацию проекта КС ДЗЗ на верхнем уровне управления разработкой используется укрупненная структура системы и устанавливается связь составляющих затрат от обобщенных параметров КА, РКК* и НКПОР. На суммарные затраты влияют сроки реализации проекта, сроки выполнения системы и проведения ее модернизации, длительности периодов разработки,

создания и эксплуатации. Сроки разработки зависят от новизны проекта, программы отработки и обеспечения надежности.

На начальном этапе проектных работ, когда нет необходимых данных в полном объеме, используется опыт реализации аналогичных проектов, используется нормативный (базовый) граф процесса реализации проекта создания КС ДЗЗ (рис. 2). Длина ветвей графа эквивалентна срокам ведения соответствующих работ. Этапы работ включают разработку основных подсистем КА (модулей МЦА и МСП) и создание (изготовление) КА в целом, доработку подсистем наземного сегмента (технического комплекса (ТК) КА в составе РКК*, НКУ и НКПОР), ввод в эксплуатацию (выведение на орбиту функционирования) и эксплуатацию КА в планируемый период $\langle T \rangle$.

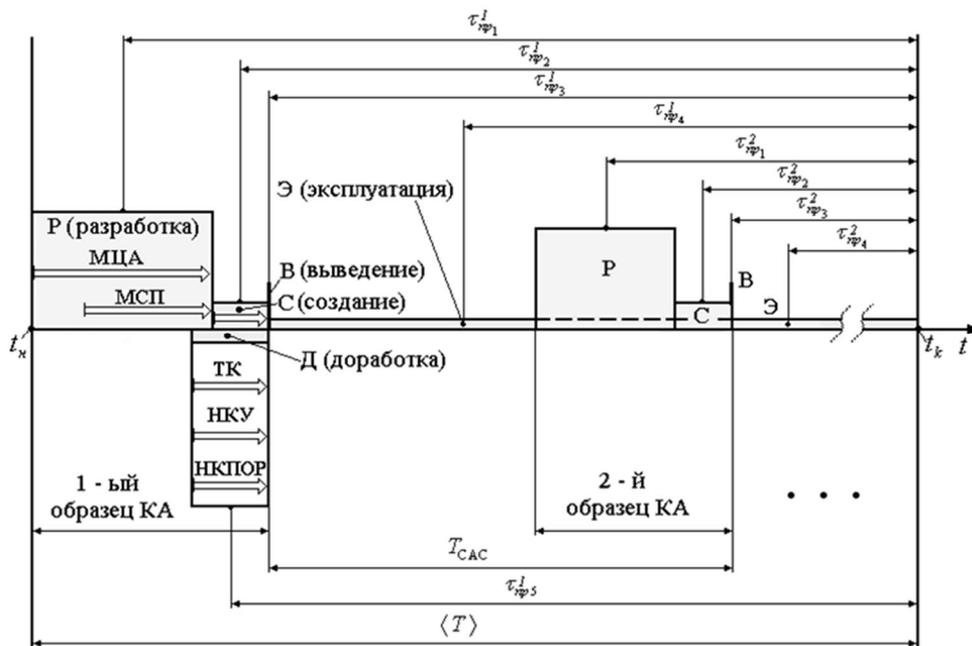


Рис. 2. Нормативный (базовый) граф процесса реализации проекта создания КС ДЗЗ:
 t_n, t_k – время начала и окончания реализации проекта; $\tau_{\text{пр}j}^l$ – время приведения затрат
 j -го этапа работ l -го образца КА; T_{CAC} – срок активного существования КА;
 $\langle T \rangle$ – планируемый период

При определении затрат на КС ДЗЗ используется метод базовой статьи калькуляции и статистические методы оценки затрат на КА и подсистемы, учитывается снижение затрат на производство при росте объема производства, а также дисконтирование – приведение затрат к моменту выполнения проекта создания системы в планируемый период.

Модель затрат на реализацию проекта создания КС ДЗЗ в планируемый период представляется в виде суммы приведенных затрат на космический сегмент, включающий группировку КА $N_{\text{КА}}$, которая в общем случае состоит из базового образца и

его модификаций, и доработку подсистем наземного сегмента (технического комплекса космического аппарата (ТК КА), НКУ и НКПОР):

$$C_{\Sigma_{\text{КС}}}^{\text{М}}(\cdot) = \sum_{i=1}^{N_{\text{КА}}} C_{\Sigma_{\text{КА}}}(\cdot)_i + C_{\Sigma_{\text{НС}}}(\cdot),$$

где $C_{\Sigma_{\text{КС}}}$ – суммарные приведенные затраты на проект создания КС ДЗЗ в планируемый период; $C_{\Sigma_{\text{КА}}}$ – суммарные приведенные затраты на разработку, создание (изготовление), выведение и эксплуатацию в течение срока активного существования (САС) КА (модификации КА) в составе КС ДЗЗ; $C_{\Sigma_{\text{НС}}}$ – суммарные приведенные затраты на доработку подсистем наземного сегмента.

Суммарные приведенные затраты на КА $C_{\Sigma_{\text{КА}}}$ определяются в виде:

$$C_{\Sigma_{\text{КА}}}(\cdot) = \sum_{l=1}^L (C_{\text{РКА}}^l(\cdot) \cdot k_{\text{сн}}^l \cdot \eta(\tau_{\text{пр1}}^l) + C_{\text{СКА}}^l(\cdot) \cdot f_N^l(\cdot) \cdot \eta(\tau_{\text{пр2}}^l) + C_{\Sigma_{\text{В}}}(\cdot)_l + C_{\Sigma_{\text{Э}}}(\cdot)_l),$$

где $C_{\text{РКА}}^l(\cdot)$ и $C_{\text{СКА}}^l(\cdot)$ – соответственно, функции, определяющие затраты на разработку и создание (изготовление) первого образца КА (зависимости для их определения приведены в [1]); $k_{\text{сн}}^l$, $f_N^l(\cdot)$ – соответственно, коэффициент и функция, характеризующие снижение затрат при разработке и изготовлении l -ых образцов КА $l = 1 \dots L-1$, L – количество типов КА); $\eta(\tau_{\text{пр1}}^l)$ и $\eta(\tau_{\text{пр2}}^l)$ – соответственно, функции дисконтирования затрат (приведения затрат к моменту времени окончания функционирования КС ДЗЗ) на разработку и создание (изготовление) l -го образца КА; $\tau_{\text{пр1}}^l$ и $\tau_{\text{пр2}}^l$ – соответственно, время приведения затрат на разработку и создание (изготовление) l -го образца КА к базовым значениям; $C_{\Sigma_{\text{В}}}(\cdot)_l$ и $C_{\Sigma_{\text{Э}}}(\cdot)_l$ – соответственно, суммарные приведенные затраты на выведение и эксплуатацию l -го образца КА, определяются зависимостями вида:

$$C_{\Sigma_{\text{В}}}(\cdot)_l = C_{\text{В}}(\cdot)_l \cdot \eta(\tau_{\text{пр3}}^l); C_{\Sigma_{\text{Э}}}(\cdot)_l = C_{\text{Э}}(\cdot)_l \cdot \eta(\tau_{\text{пр4}}^l),$$

где $\eta(\tau_{\text{пр3}}^l)$ и $\eta(\tau_{\text{пр4}}^l)$ – соответственно, функции дисконтирования затрат на выведение и эксплуатацию l -го образца КА; $\tau_{\text{пр3}}^l$ и $\tau_{\text{пр4}}^l$ – соответственно, время приведения затрат на выведение и эксплуатацию l -го образца КА к базовым значениям; $C_{\text{В}}(\cdot)_l$ и $C_{\text{Э}}(\cdot)_l$ – соответственно функции, определяющие затраты на выведение и эксплуатацию l -го образца КА, представляются в виде:

$$C_B(\cdot)_l = C_B^1(\cdot) \cdot N_{КА};$$

$$C_Э(\cdot)_l = C_Э^1(\cdot) \cdot N_{КА} \cdot T_{САС}^l,$$

где $C_B^1(\cdot)$ – функция, определяющая затраты на выведение одного КА в составе КС ДЗЗ с заданными параметрами ($C_B^1(\cdot) = \bar{C}_B \cdot M_{КА} \cdot H^{\varphi_1}$, \bar{C}_B – удельные затраты на выведение единицы массы КА; H – высота орбиты выведения КА; φ_1 – статистический коэффициент; $M_{КА}$ – масса КА); $C_Э^1(\cdot)$ – функция, определяющая средние затраты на эксплуатацию одного КА в течение 1 года в составе системы ($C_Э^1(\cdot) = \bar{C}_Э \cdot M_{КА}^{\varphi_2}$, $\bar{C}_Э$ – удельные затраты на выведение и эксплуатацию единицы массы КА; φ_2 – статистический коэффициент); $N_{КА}$ – количество КА (модификаций КА) при модернизации КС ДЗЗ в планируемый период; $T_{САС}^l$ – срок активного существования l -го образца КА.

Суммарные приведенные затраты на доработку подсистем наземного сегмента $C_{\Sigma НС}$ определяются в виде

$$C_{\Sigma НС} = (C_{ТК}(\cdot) + C_{НКУ}(\cdot) + C_{НКПОР}(\cdot)) \cdot \eta(\tau_{пр5}),$$

где $C_{ТК}(\cdot)$, $C_{НКУ}(\cdot)$ и $C_{НКПОР}(\cdot)$ – соответственно функции, определяющие затраты на доработку технического комплекса КА, наземного комплекса управления КА и комплекса приема, обработки и распространения информации; $\eta(\tau_{пр5})$ – функции дисконтирования затрат на доработку подсистем наземного сегмента; $\tau_{пр5}$ – время приведения затрат на доработку подсистем наземного сегмента к базовым значениям.

Функции, определяющие затраты на доработку подсистем наземного сегмента – технического комплекса КА $C_{ТК}(\cdot)$, наземного комплекса управления КА $C_{НКУ}(\cdot)$ и комплекса приема, обработки и распространения информации заданной номенклатуры $C_{НКПОР}(\cdot)$ имеют вид:

$$C_{ТК}(\cdot) = k_{ТК} \cdot C_{КА}^1;$$

$$C_{НКУ}(\cdot) = \bar{C}_{НКУ} \cdot N_{КА}^{\delta_1};$$

$$C_{НКПОР}(\cdot) = \bar{C}_{НКПОР} \cdot N_{КА}^{\delta_2} \cdot N_{СС}^{\delta_3},$$

где $C_{C_{КА}}^1$ – затраты на создание 1-го образца КА; k_{TK} , \bar{C}_{HKY} , \bar{C}_{HKPOF} , δ_1 , δ_2 и δ_3 – статистические коэффициенты; $N_{КА}$ – количество КА в космическом сегменте; N_{CC} – количество типов съемочных систем в МЦА при условии, что на каждом КА установлено одинаковое количество типов съемочных систем.

Как показано выше, при появлении новых целевых задач, повышении требований к качеству информационного обеспечения возникает проблема модернизации КС ДЗЗ – внесение изменений (доработки) в базовую систему с целью повышения ее технико-экономической эффективности при новых условиях использования. При модернизации созданной ранее базовой КС ДЗЗ повышение эффективности системы связано в основном с созданием модификаций КА.

На модельном примере проведена оптимизация программы модернизации оптико-электронной КС ДЗЗ в планируемый период. При формировании исходных данных на реализацию проекта создания оптико-электронной КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период использовались известные показатели прототипов [1, 6 – 9]. Область применения КС ДЗЗ при модернизации приведена на рис. 3. Проведенный предварительный анализ прототипов показал, что для решения системой поставленных задач целевая аппаратура КА должна включать такие съемочные системы, как: панхроматическую (ПСС), гиперспектральную (ГСС), стереозональную (СЗС), комбинированную (КСС) и широкозахватную многозональную (ШМС). Требования к составу и основным характеристикам целевой аппаратуры модификаций КА приведены в табл. 1. Требования к КА ДЗЗ по условиям функционирования и обобщенным характеристикам (тип и параметры орбиты – высота $H_{КА}$ и наклонение $i_{КА}$, масса КА $M_{КА}$) аналогичны КА базовой системы. Состав КС ДЗЗ при модернизации также аналогичен базовой системе и представляется в виде комплекса основных подсистем (космического и наземного сегментов), причем, параметры наземного сегмента и базового КА заданы.

Таблица 1

Требования к составу и основным характеристикам целевой аппаратуры модификаций КА

Наименование ЦА	Количество спектральных зон $N_{кан}$	Спектральный диапазон $\Delta\lambda$, мкм	Разрешение R (проекция элемента в надир), м	Полоса захвата ΔL , км
ПСС	1	0,51 – 0,85	2	22
КСС	5	0,51 – 0,85(П)	0,79 (П)	18,5
		0,45 – 0,52	3,1 (М)	
СЗС	5	0,54 – 0,59	2 (П)	22
		0,63 – 0,68	5 (П)	44
		0,79 – 0,90	4 (М)	22
ГСС	72	0,4 – 1,75	30	30
ШМС	3	0,54 – 0,59 0,63 – 0,68 0,79 – 0,90	20	160

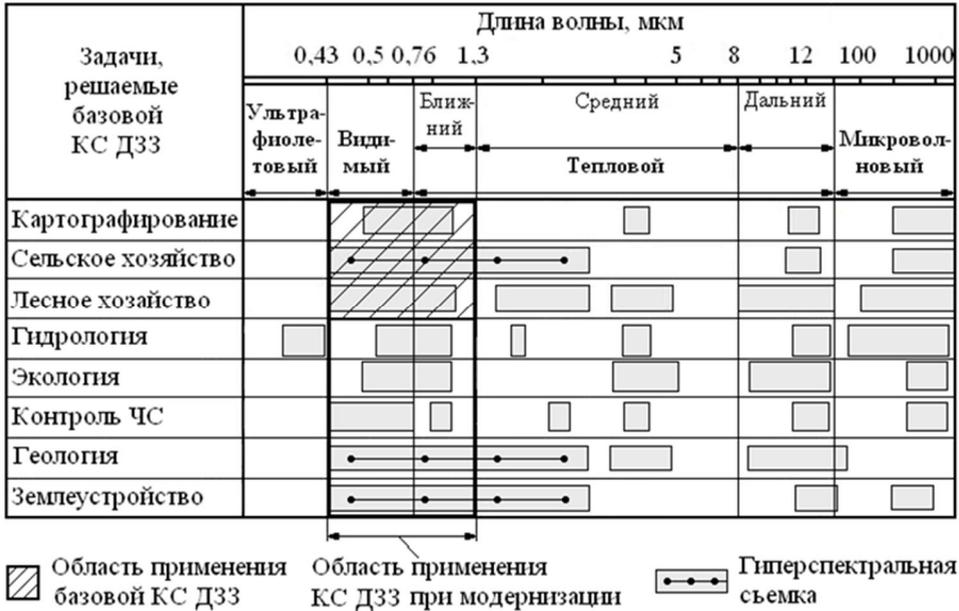


Рис. 3. Задачи и требуемые рабочие диапазоны электромагнитных волн

Формально математическая постановка задачи исследований представляется следующим образом:

$$C_{\Sigma_{КС}}^M(\cdot) = \sum_{i=1}^4 \left[C_{\Sigma_{КА}^i}^M(M_{КА}(\cdot), PR^M(t), \beta_i^M(t_{рп})) \right] \rightarrow \min_{\Pi_{КА}(\cdot), PR^M(t) \in G_{КС}^M(\cdot)}$$

при $W_{КС}^M(\Pi_{НС}(\cdot), M_{КА}(\cdot), t_i, N_i), \Psi(t) \geq W_{КС}^{MT};$ (2)

$$T_{P.C_i}(\cdot) \leq T_{P.C_i}^T; \quad \Psi(t) = \Psi(t)^T;$$

$$PR^M(t) = \{t_i, N_i, n\};$$

$$M_{КА}(\cdot) \leq M_{КА}^T;$$

$$\Pi_{НС}(\cdot) = \Pi_{НС}^T(\cdot); \quad \Pi_{КА}^B(\cdot) = \Pi_{КА}^B(\cdot)^T;$$

$$t_i = t_i^T; \quad \langle T \rangle = \langle T \rangle^T;$$

$$\langle T^M \rangle = \langle T \rangle; \quad \langle T^M \rangle > T,$$

где $C_{\Sigma_{КА}^i}^M(\cdot)$ – суммарные приведенные затраты на базовый КА или его i -ю модификацию; $W_{КС}^M(\cdot)$ – эффективность КС ДЗЗ [1]; $\Psi(t)$ – параметры целевой нагрузки; $\beta_i^M(t_{рп})$ – вектор определяющих параметров i -й модификации КА к времени реализации проекта модернизации системы; $\Pi_{КА}^M(\cdot)$ – функция, определяющая параметры КА (модификации КА); $\Pi_{НС}(\cdot)$ – функция, определяющая параметры наземного сегмента; $T_{P.C_i}(\cdot)$ –

функция, определяющая период разработки и создания i -й модификации КА; $\Pi_{КА}^B(\cdot)$ – функция, определяющая параметры базового КА; t_i, N_i, n – соответственно рациональный срок введения в эксплуатацию, состав и количество i -й модификации КА; остальные обозначения соответствуют обозначениям задачи (1).

Критерием при решении задачи (2) являются суммарные приведенные затраты на реализацию проекта оптико-электронной КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период. При решении задачи реализуется двухуровневая модель управления разработкой КС ДЗЗ и метод согласованного оптимизационного поиска, проектные модели базового КА. При поиске рационального решения задачи (2) используется параметрическая ее декомпозиция. Отдельно формируются варианты модификаций КА в составе КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период и программа модернизации КС ДЗЗ $PR^M(t)$ – определяются рациональные сроки t_i и состав модификаций КА N_i . По мере истечения срока активного существования каждого КА проводится восстановление КС ДЗЗ. По аналогии с прототипами [1, 6 – 9] и при выполнении требований к массе КА модуль МЦА каждого аппарата включает два типа целевой аппаратуры. Выбор вариантов целевой аппаратуры на каждом КА также проведен по аналогии с прототипами и требуемыми значениями периодичности наблюдения и пространственного разрешения, ограничением на выводимую массу КА.

Таблица 2

Основные технические характеристики КА

Наименование параметра	Базовый КА	Модификация КА		
		1	2	3
Тип ЦСС	ПСС/ ШМС	КСС/ ШМС	ГСС/ ШМС	СЗС/ ШМС
Разрешение, м	2/20	0,79/3,1//20	30/20	2/5/20
Полоса захвата, км	30/160	18,5/160	30/160	22/160
Диаметр апертуры, м	0,315/0,08	0,570/0,08	0,07/0,08	0,315/0,08
Фокусное расстояние, м	5,3/0,272	8,66/0,272	0,335/0,272	3,34/0,272
Рабочий угол зрения, град	3,52/18,3	2,18/18,3	3,52/18,3	2,6/18,3
Спектральный диапазон, мкм	0,51 – 0,85/ 0,54 – 0,59 0,63 – 0,68 0,79 – 0,90	0,51 – 0,85 0,45 – 0,52/ 0,54 – ,59 0,54 – 0,59/ 0,63 – ,68 0,79 – 0,90/ 0,79 – 0,90	0,4 – 1,1/ 0,54 – 0,59 0,63 – 0,68 0,79 – 0,90	0,51 – 0,85 0,45 – 0,52/ 0,54 – 0,59 0,54 – 0,59/ 0,63 – 0,68 0,79 – 0,90/ 0,79 – 0,90
Размер пикселя, мкм	7/11	6,3/24,7/11	12,8/11	4,4/11
Радиометрическое разрешение, бит/пиксел	256/1024	1024	4096/1024	1024
Информационный объем, Мбит	103,8/10,6	110,8/2,53	101,9/10,6	106,0/7,36
Информационная производительность, тыс. кв. км за один сеанс связи с НКПОР	20,4/108,8	3,41/24,8	21,7/115,5	10,0/72,6

Проведена оптимизация технико-экономических характеристик системы при реализации в планируемый период с учетом влияния ограничений и условий реализации проекта. Определены количество модернизаций системы ($n = 3$) и сроки ввода в

строй модификаций КА t_i ($i = 1, 2, 3$). По мере истечения срока активного существования каждого КА проводится восстановление КС ДЗЗ. С использованием моделей и алгоритмов, приведенных в [1 – 3, 6], сформированы варианты модификаций КА в составе КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период, основные технические характеристики которых приведены в табл. 2.

Оптимальную программу модернизации КС ДЗЗ, обеспечивающую требуемый уровень функциональной эффективности и минимизацию суммарных приведенных затрат на реализацию проекта КС ДЗЗ при модернизации в планируемый период, позволяет находить сравнительный анализ вариантов модернизации (рис. 4).

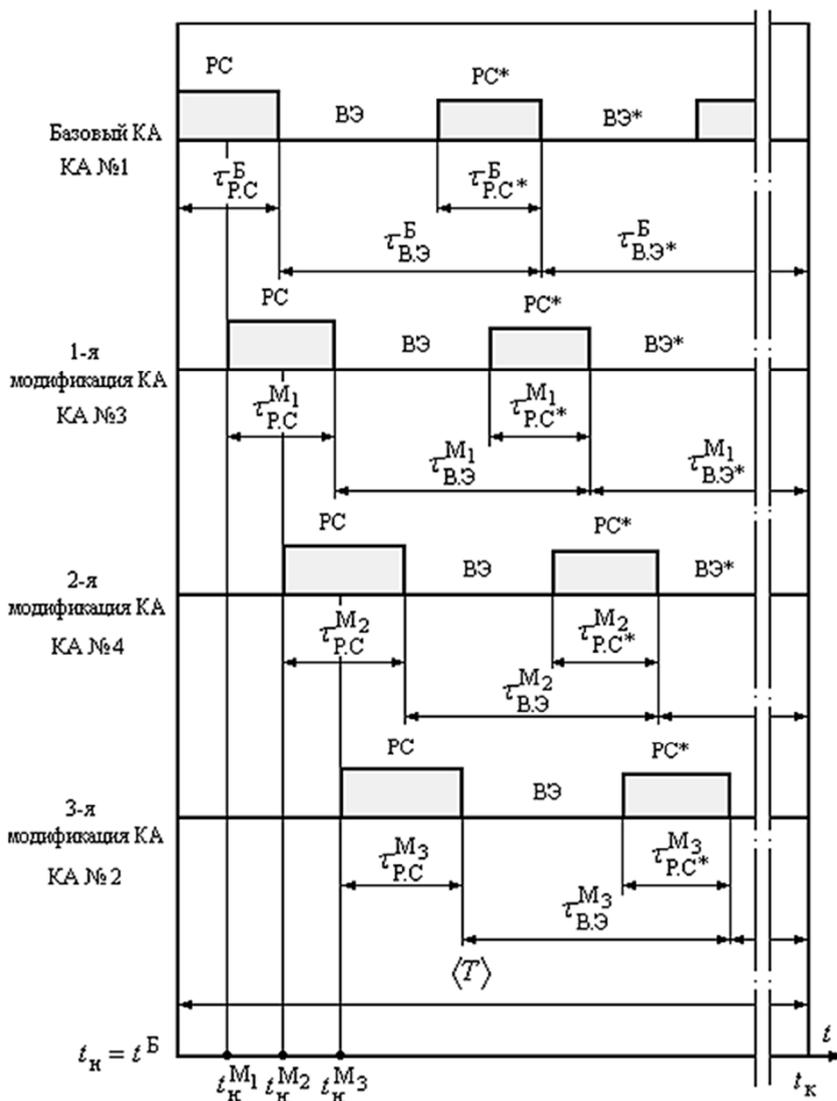


Рис. 4. Оптимальная программа модернизации проекта создания КС ДЗЗ в планируемый период

Заключение

Рассмотрены вопросы оптимизации программы модернизации КС ДЗЗ в планируемый период. Обсуждаются особенности задачи оптимизации программы развития в детерминированной постановке и разработан алгоритм ее решения. На модельном примере проведены оценка параметров модификаций КА и оптимизация программы модернизации проекта создания КС ДЗЗ, реализуемой в планируемый период. Полученные на модельном примере оценки технических характеристик модификаций КА могут быть использованы для детального анализа эффективности существующих и перспективных космических систем ДЗЗ с целью прогнозирования их развития, расширения области применения, продления сроков использования.

Литература

1. Матвеев Ю. А., Ламзин В. А., Ламзин В. В. Основы проектирования модификаций космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. – М.: Изд-во МАИ, 2015. – 176 с.
2. Матвеев Ю. А., Ламзин В. А., Ламзин В. В. Исследование влияния надежности модификаций КА на программу развития космической системы // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. – 2015. – № 1. – С. 41 – 47.
3. Матвеев Ю. А., Ламзин В. А., Ламзин В. В. Метод прогнозных исследований эффективности модификаций КА при комплексной замене подсистем // Вестник ФГУП НПО им. С. А. Лавочкина. – 2015. – № 4. – С. 53 – 59.
4. Ламзин В. В., Макаров Ю. Н., Матвеев Ю. А. Вопросы поиска эффективных проектных решений при модернизации космической системы ДЗЗ // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2011. – № 5. – С. 3 – 9.
5. Ламзин В. В., Макаров Ю. Н., Матвеев Ю. А., Мозжорин Ю. А. и вопросы технико-экономических исследований перспективных разработок космических систем // Космонавтика и ракетостроение. – 2010. – № 4(61). – С. 48 – 59.
6. Ламзин В. В. Исследование характеристик оптико-электронной космической системы дистанционного зондирования Земли при модернизации в планируемый период // Вестник МАИ. – 2009. – Т. 16. – № 5. – С. 46 – 55.
7. Гарбук С. В., Гершензон В. Е. Космические системы дистанционного зондирования Земли. – М.: Издательство А и Б, 1997. – 296 с.
8. Матвеев Ю. А., Ламзин В. В. Космические системы дистанционного зондирования Земли: состояние и перспективы развития // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2007. – № 5. – С. 31 – 37.

ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ПЛАНЕТ СОЛНЕЧНОЙ СИСТЕМЫ

Л. А. Ведешин

(Институт космических исследований РАН, г. Москва)

Аннотация. Рассматриваются: история исследования планет солнечной системы в России, программа создания автоматических космических станций и научной аппаратуры в России и за рубежом, вопросы создания государственной организации по контролю и координации международного сотрудничества в космических исследованиях.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, космические аппараты, автоматические межпланетные станции, планетоход, кометы, астероиды, космические зонды.

Оптические наблюдения ученых за планетами Солнечной системы ведутся уже сотни лет. Однако окружающая Землю атмосфера не позволяла с высокой точностью определять многие характеристики планет. С появлением космической техники и радиоастрономии появилась возможность проведения научных исследований за пределами атмосферы Земли и начать дистанционное зондирование планет с помощью автоматических межпланетных станций (АМС). За прошедшие годы Россия, США и Евросоюз запустили в космос 226 АМС (включая пролетные миссии) к Меркурию, Венере, Луне, Марсу, Юпитеру, Сатурну, Урану, Нептуну, Плутону, Церере, Фобосу, астероидам и кометам.

Первой в мире АМС была советская станция «Луна-1», которая была запущена 2 января 1959 г. и пролетела вблизи Луны на расстоянии 6000 км, а 14 сентября этого же года станция «Луна-2» впервые в мире достигла поверхности Луны. 12 февраля 1961 г. была запущена АМС «Венера-1», а 1 ноября 1962 г. – АМС «Марс-1».

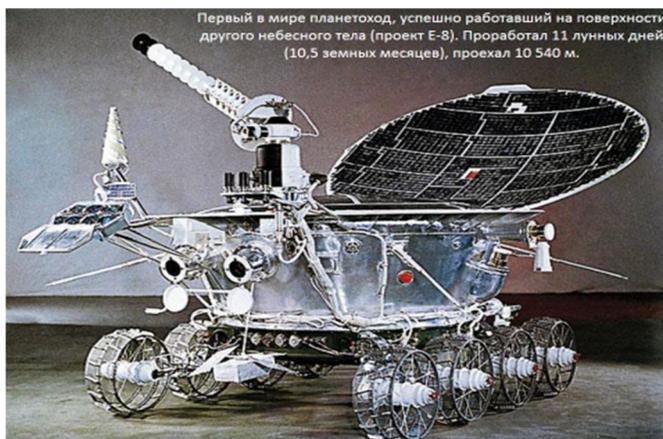
В СССР работы по созданию АМС были начаты в 1957 г. в РКК «Энергия» под руководством академика С. П. Королева. Было осуществлено несколько запусков АМС к Марсу, Луне, Венере. В 1965 г. эта тематика была передана в НПО им. С. А. Лавочкина. АМС «Луна-9», разработанная в НПО им. С. А. Лавочкина 3 февраля 1966 г. осуществила мягкую посадку на поверхность Луны и передала на Землю первые фотографии, «Луна-16», «Луна-20» доставили на Землю образцы лунного грунта. 17 ноября 1970 г. на поверхность Луны был высажен «Луноход-1», а затем 15 января 1973 г. «Луноход-2». Последний аппарат «Луна-24» был запущен 24 января 1976 г. и доставил образцы лунного грунта на Землю. Под руководством главного конструктора Г. Н. Бабакина впервые были разработаны: разгонный блок для ракеты-носителя, унифицированная платформа для АМС различного назначения, посадочная ступень с возможностью старта космического аппарата с Луны или планеты, транспортные средства для работы на других планетах Солнечной системы (Луноходы, Марсоходы). Эти технические достижения вошли в историю космонавтики и до сих пор используются на практике.

Дистанционное зондирование планет в отличие от исследований Земли из космоса более сложная задача, которая состоит из нескольких этапов: выведения АМС на орбиту Земли, перелета к планете, выхода на орбиту планеты и посадки на поверхность планеты спускаемого аппарата или транспортного средства. Межпланетная станция является сложной автоматической системой, оснащенной системой видеона-

блюдения, управления и передачи информации на Землю, а также системой взятия проб грунта и доставки его на Землю. Недостаточно изучены вопросы воздействия на АМС радиации, космических частиц, столкновения с остатками астероидов и комет и др.

После полета астронавтов США на Луну в 1971 – 1972 гг. работы по лунной программе в СССР были прекращены, несмотря на разработанную систему высадки советских космонавтов на Луну.

За прошедшие годы в СССР и РФ были разработаны и запущены несколько десятков станций к Луне, Марсу, Венере, Фобосу и др.



а)



б)

Рис. 1. Первый в мире планетоход «Луноход-1» (а); фрагмент панорамы Луны (б)

Следует также отметить, что за прошедшие годы большое количество запусков космических аппаратов (КА) на околоземные орбиты привело к значительному засорению космоса. Наземные системы мониторинга космического пространства наблюдают до 15 тысяч космических объектов, а общее число частиц космического мусора доходит до 100 000. Некоторые из них постоянно меняют орбиту, сталкиваются между собой и увеличивают количество частиц. Особую опасность они представляют для КА ДЗЗ на высотах 600 – 800 км и для навигационных спутников на высотах до 20 000 км, а также АМС, выводимых на промежуточные орбиты.

В рамках проработки проекта ФЦП «Исследования научно-технических проблем и разработка предложений по созданию перспективных средств измерений, наблюдения и контроля единой системы предупреждения и парирования космических угроз» учеными РАН предложен проект создания на территории РФ и за рубежом оптической системы мониторинга космического мусора в околоземном космическом пространстве и контроля за астероидами и кометами.

В связи с этим в Институте солнечно-земной физики СО РАН планируется установить крупный (1,6 м) широкоугольный (2,8 град.) обзорный телескоп, разработанный в ЛОМО.

Россия после длительного перерыва приступила к проведению работ по созданию космической техники для освоения Луны. В соответствии с Федеральной космической программой (ФКП) до 2025 г. в НПО им. С. А. Лавочкина разрабатываются новые аппараты для посадки на Луну «Луна-25» («Луна-Глоб») и орбитальный аппарат «Луна-26», (Луна-Ресурс»), а в 2023 – 2025 гг. «Луна-27» и «Луна-28».

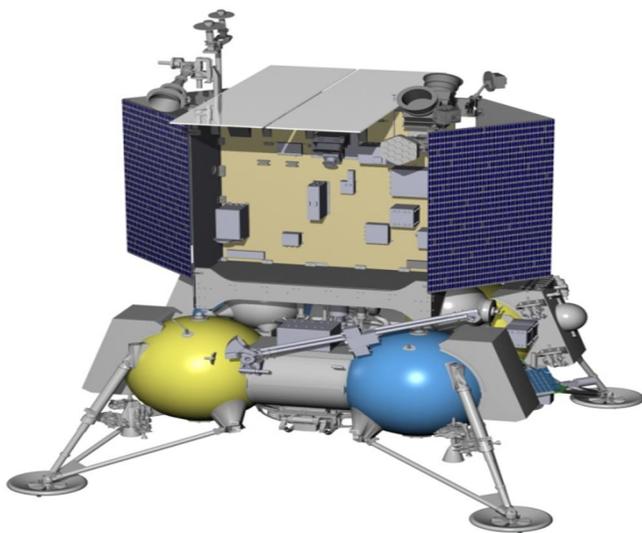


Рис. 2. Космический аппарат Луна-25 (Луна-Глоб)

Если в прошлом США и СССР проводили исследования на Луне в районах низких и средних широт, то сейчас работа посадочных аппаратов будет осуществляться в высоких широтах, вблизи полюсов с целью доставки лунного грунта на Землю. Предполагается присутствие водорода и водяного льда под поверхностью Луны. В ИКИ РАН разрабатывается аппаратура для этих исследований. Подготовлена большая программа исследований космических лучей, астрофизических наблюдений, истории формирования Луны, происхождения жизни и др.

Для выполнения геодезических и картографических исследований планируется установка на космическом аппарате уголкового отражателя для лазерного зондирования с наземной обсерватории на Алтае.

27 сентября 2018 г. Россия и США подписали Соглашение о совместной работе над созданием обитаемой космической станции на орбите Луны. В проекте планируется участие и других стран. Детали их участия пока обсуждаются. Ее первые модули предполагается вывести на орбиту Луны в 2024 – 2026 гг. В рамках проекта Россия создаст от одного до трех модулей станции, а также разработает унифицированный

стыковочный механизм для кораблей, которые будут снабжать станцию и доставлять космонавтов. Представители НАСА считают создание лунной станции подготовительным этапом к марсианской миссии. Лунная станция станет лабораторией для освоения окололунного пространства, тестирования различных систем и роботов перед полетом к Марсу и др. планетам. В случае необходимости астронавты с лунной станции смогут в течение короткого срока вернуться на Землю.

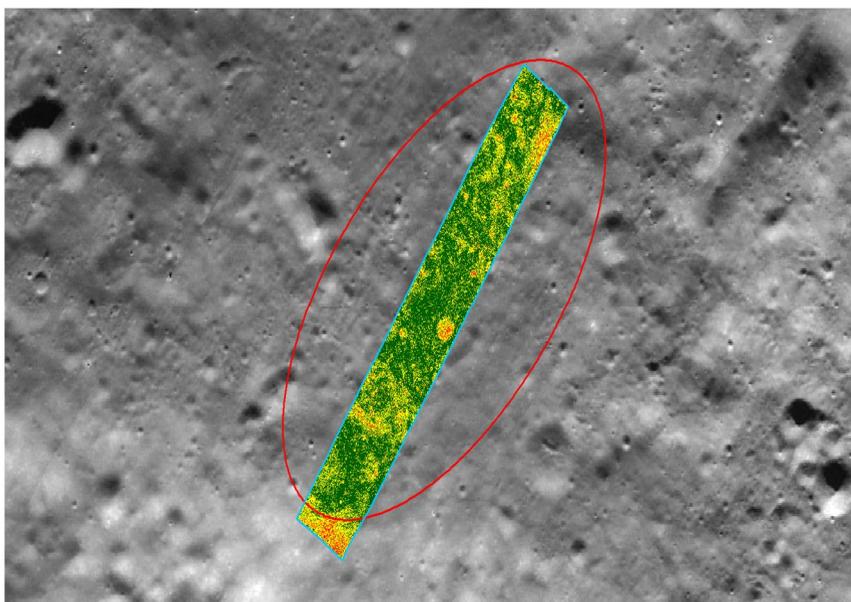


Рис. 3. Выбор места посадки. Инженерные требования: безопасность посадки, надежность радиоконтроля (радиовидимость наземных станций), продолжительность светового времени

В период с 1960 по 1980 гг. СССР запустил к Марсу девять космических аппаратов. В 1988 г. к спутнику Марса Фобосу были отправлены два зонда – «Фобос-1» и «Фобос-2». После трех месяцев работы «Фобоса-2» на орбите связь с ним прекратилась. Повторный запуск АМС «Фобос-Грунт-2» Россия планирует осуществить в 2024 г.

Работы по космической радиоастрономии были начаты в СССР в 1979 г. На станции «Салют-6» впервые был установлен радиотелескоп КРТ-10. В 1979 – 1980 гг. в рамках программы «Интеркосмос» началась разработка трех международных космических проектов: «Спектр-Р» («Радиоастрон»), «Спектр – Рентген – Гамма» («Спектр-РГ») и «Ультрафиолет» («Спектр-УФ»).

Проект «Спектр-Р» («Радиоастрон») предназначался для астрофизических исследований в радиодиапазоне электромагнитного спектра с помощью космического радиотелескопа КРТ с 10 м антенной. В связи с многократным переносом сроков изготовления аппаратуры и космического аппарата по техническим и экономическим причинам космический аппарат «Радиоастрон» был запущен на околоземную орбиту только 18 июля 2011 г.

На более высоких частотах работают телескопы теплового, видимого, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения. В рамках программы «Интеркосмос» в 1987 г. в ИКИ РАН началась разработка международного проекта «Спектр – Рентген – Гамма» («Спектр-РГ») – орбитальной обсерватории, предназначенной для изучения

Вселенной в гамма- и рентгеновском диапазоне энергий (0,5 – 11 кэВ) в точке Лагранжа L2. с участием СССР, Финляндии, ГДР, Дании, Италии и Великобритании. В связи с многолетними задержками работ по созданию космического аппарата в НПО им. С. А. Лавочкина запуск обсерватории «Спектр-РГ» планируется в 2019 г. с участием России и Германии.

Третий из серии аппаратов типа «Спектр» – Всемирная космическая обсерватория «Ультрафиолет» («Спектр-УФ») разрабатывается в Институте астрономии РАН. Космический телескоп предназначен для получения изображений и спектроскопии в недоступном для наземных наблюдений ультрафиолетовом участке электромагнитного спектра с целью изучения физико-химических свойств планетных атмосфер и комет, горячих и холодных звезд, свойств пылевых частиц межзвездного вещества и др. В проекте планируется участие России, Испании, Германии, Казахстана и др. Запуск обсерватории «Спектр-УФ» планируется в 2024 г.

В России ведутся работы по нескольким совместным международным проектам: с ЕКА «ЭкзоМарс» (2020 г.) и с НАСА «Венера-Д» (2025 г.).

В 2016 г. российским РН был осуществлен запуск российско-европейского аппарата «ЭкзоМарс», состоявшего из двух частей: орбитального аппарата и посадочного модуля.

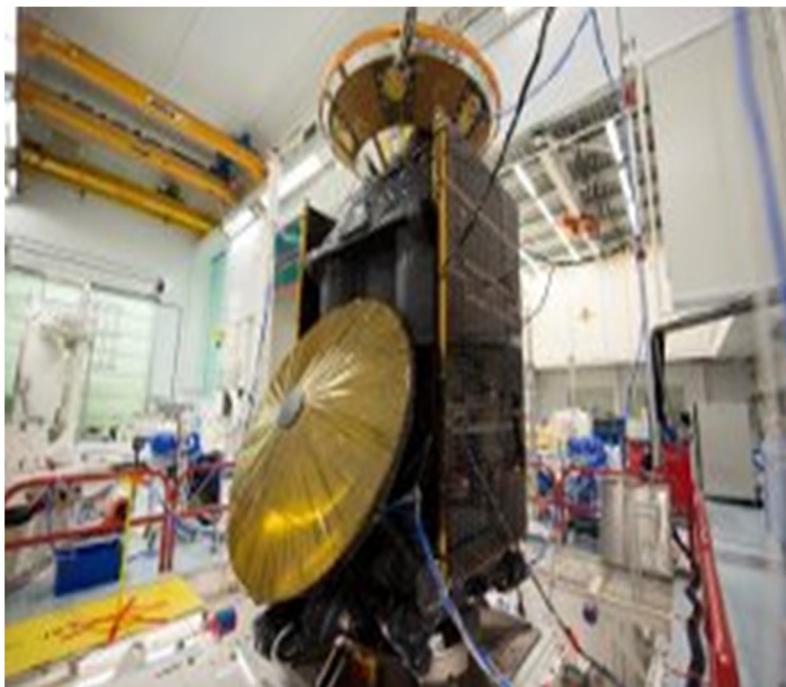


Рис. 4. Орбитальный аппарат с установленным на нем модулем «Скиапарелли»

Задачами программы «ЭкзоМарс» являются: изучение поверхности и окружающей среды, исследование недр планеты, водного и геохимического состава, возможных следов жизни на Марсе. После постепенного снижения высоты орбиты будут проводиться активные измерения атмосферы Марса, которая сильно разрежена и торможение происходит быстро. От орбитального модуля отделился посадочный модуль «Скиапарелли», который при посадке разбился. Несмотря на неудачу, получено мно-

го данных, которые будут учтены при подготовке следующей совместной миссии «ЭкзоМарс-2020».

США планируют пилотируемые полеты на Марс в 2030-е гг. в связи с разработкой космического корабля «Орион» и ракеты-носителя SLR. ЕКА подготовило программу «Аврора», целью которой является проведение лунной и марсианской миссий. Россия и ЕКА рассматривают сотрудничество в решении этой задачи.

Еще одно направление по исследованию планет Солнечной системы – это изучение и использование природных ресурсов астероидов комет. В настоящее время в ряде стран разрабатываются космические проекты по освоению природных ресурсов астероидов и комет путем высадки автоматических аппаратов для добычи полезных ископаемых и доставки их на Землю. Имеющиеся технологии запуска и посадки на астероиды, систем навигации, удаленного контроля, роботостроения, инструментального анализа и передачи информации позволяют уже сегодня успешно и экономически доступно оперировать разведочными зондами и возвращать материалы на Землю. 8 сентября 2017 г. состоялся первый запуск американской межпланетной станции «Проспектор-1» (Prospector-1) – коммерческой межпланетной миссии для доставки образцов грунта с астероида (101955) Бенну для дальнейших исследований и практического использования.

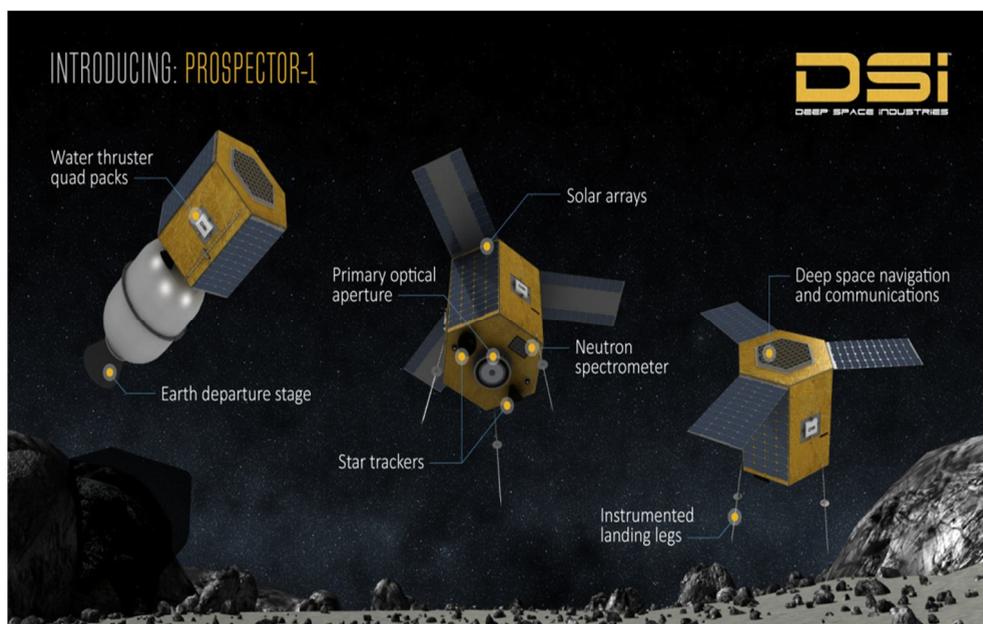


Рис. 5. Американская межпланетная станция «Проспектор-1»

Предполагается, что КА «Проспектор-1» сблизится с астероидом, в ходе облетов астероида составит карту его поверхности и подповерхностного слоя, путем осуществления инфракрасной съемки, затем осуществит попытку посадки на астероид с целью измерения его геофизических и геотехнических характеристик. Собранная информация будет использована для реализации следующих миссий.

В соответствии с ФКП до 2025 г. на предприятии им. С. А. Лавочкина в настоящее время ведутся работы по ряду космических проектов «Спектр – Рентген – Гамма» (2019 г.), «Луна-25» (2021 г.), «Фобос-Грунт-2» (2024 г.), «Венера-Глоб»

(2025 г.), «Миллимитрон» (2025 г.), «Интергелиозонд» (2025 г.), «Спектр-УФ» (2021 г.), «Венера-Д» (2025 г.) и др.

Такое количество проектов осуществить одному предприятию невозможно: возникают как технические, так и финансовые проблемы. Сроки реализации этих проектов постоянно сдвигаются. В результате планировавшийся запуск АМС «Луна-25» переносится с 2019 г. на 2021 г. Необходима приоритетность разработки и реализации этих проектов. Складывается впечатление, что Россия не в состоянии заниматься крупными проектами по исследованию Луны и планет Солнечной системы, что вызывает недоверие к сотрудничеству с нашей страной. В связи с этим обстоятельством возникает необходимость создания государственной организации по контролю и координации международного сотрудничества.

Космической отрасли необходимо разработать несколько крупных национальных первоочередных космических проектов и сосредоточить усилия промышленности и средств на их реализации. Одним из таких национальных проектов могла стать лунная программа: запуск четырех космических аппаратов в период с 2021 по 2025 гг. с мягкой посадкой на поверхность Луны, взятие грунта, доставка лунохода и подготовка высадки космонавтов.

Литература

1. Лаверов Н. П., Медведев А. А. Космические исследования и технологии: расширение знаний об окружающем мире. – М.: Доброе слово. – 2012. – С. 179.
2. Зеленый Л. М. Нам нельзя медлить в освоении Луны // Все о космосе. – 2017, 27 сент. – С. 217 – 232.
3. Зеленый Л. М. Лунные схроны примут космонавтов // Газета.ру. – 3.10. 2014.
4. Шустов Б. М. Астероидно-кометная опасность: о роли физических наук в решении проблемы // УФМ. – 181:10 (2013). – С. 885 – 888.
5. Лаверов Н. П., Ведешин Л. А. Исследования Земли из космоса: российско-американское сотрудничество // Вестник Российской академии наук. – 2003. – Т. 72. – № 6. – С. 548 – 551.
6. Лаверов Н. П., Ведешин Л. А. Аспекты международного сотрудничества стран-разработчиков навигационной системы // Труды ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН. – 2016. – Вып. 38. – С. 25 – 31.
7. Ведешин Л. А. Фундаментальные основы создания системы мониторинга астероидно-кометной опасности Земли. Труды ИПА РАН. СПб.: –2017. Вып. 42. – С. 64 – 70.
8. Данхэм. Д. У., Назиров Р. Р., Фаркуар Р. У. и др. Космические миссии и планетарная защита. – М.: Физматлит, 2013. – С. 275.
9. Лаурета Данте. Миссия длиной в семь лет, чтобы добыть 60 граммов астероида // В мире науки. – 2016. – № 10. – С. 16 – 23.
10. Ведешин Л. А. Научно-технический отчет «Создание центра наблюдения за сближением астероидов с Землей» // ИПМ РАН. – 2015. – С. 15.
11. Ведешин Л. А. Научно-технический отчет «Обзор космических проектов по исследованию и использованию природных ресурсов астероидов» // ИПМ РАН. – 2016. – С. 25.

НАПРАВЛЕНИЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОСМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

Ю. С. Луценко, М. М. Матюшин
(ФГУП ЦНИИмаш, г. Королев, Московская область)

Аннотация. Статья посвящена вопросам совершенствования современных систем управления космическими аппаратами (КА) и их группировками. Такие системы являются большими, включающими сложные системы разных типов (технические, организационные, информационные...). Построение систем предполагает последовательное применение принципов системного подхода в направлении: задачи системы, ключевые элементы, структура, технологии, оценка эффективности. Анализ процессов управления КА, организационной, пространственно-временной структуры и технических характеристик компонентов систем показывает, что потенциальные возможности ряда отдельных изделий ракетно-космической техники (РКТ) в рамках системы реализуются на единицы процентов. Высокая стоимость объектов РКТ, принцип коллективного использования систем и комплексов, слабые позиции российской космонавтики на мировых и внутренних информационных рынках – все это требует изменения традиционных подходов к построению и эксплуатации систем с КА. В настоящей статье приведены результаты применения системного подхода с учетом характеристик современной РКТ. Предложены конструктивные определения, аксиоматика и подходы к определению числовых показателей качества. Выделены ключевые элементы систем управления КА и определены направления их совершенствования, реализация которых позволяет максимально использовать потенциал РКТ.

Ключевые слова: система управления космической группировкой, факторы влияния, средства управления, структура системы, эффективность системы.

Вопросы эффективного применения Российской группировки КА дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) в настоящее время как никогда актуальны, в связи со следующим:

- доля России на мировых рынках ДЗЗ чрезвычайно мала, хотя качество информации соответствует мировому уровню;
- растет количество орбитальных группировок КА с разными наклонениями орбит, развитие средств управления и связи;
- очевидна проблема приема целевой информации от группировок высокоинформативных КА ДЗЗ;
- не пересматривались на протяжении десятилетий основные положения технологий управления КА;
- показатели качества управления КА (глобальность, оперативность, затраты на управление...) существенно хуже потенциально достижимых.

Причина такого положения – недостаточное внимание к системному анализу и синтезу систем управления. Эта проблематика в литературе по космонавтике представлена слабо, хотя известно [1], что несбалансированность задач, функций, связей, технических и структурных характеристик может привести не к улучшению системы, а к ее деградации. Например, традиционный подход к управлению КА, когда по мере

создания новых группировок КА растет число центров принятия управленческих решений, приводит к усложнению структуры системы, и в конечном итоге ухудшению качества управления. Это типичный случай, когда структура системы входит в противоречие с требованием совершенствования характеристик системы.

Первый шаг к познанию предметов, явлений и процессов — это их структурный анализ. На этом этапе анализируются различия и сходства в элементах и процессах исследуемого объекта, элементы объекта группируются по существенным признакам. При этом выявить структуру изучаемого объекта можно только в том случае, если выделяемые части этого объекта являются устойчивыми. Управление КА описывается понятиями система, структура, технология управления. Понятие системы характеризует полный набор образующих ее компонент и отражает ее изменчивость, в то время как понятие структуры отражает неизменность связей, устойчивость. Технология управления отражает информационные и энергетические потоки в рамках системы управления.

Цель специалистов в области космонавтики – создание системы, позволяющей управлять КА и получать целевую информацию с наименьшими затратами, требуемыми уровнями оперативности, надежности и гибкости управления.

В целях корректной интерпретации рассуждений и результатов вначале необходимо договориться о терминологии.

Система управления – система, состоящая из управляющего объекта и объекта управления. В состав системы управления могут быть включены в качестве самостоятельных объектов системы (комплексы) доведения управляющих воздействий (средства управления) до объекта управления и его реакций до управляющего объекта [2].

Структура системы (функциональная, информационная, пространственная и пр.) – суть обобщенные соответствия между ее элементами, позволяющие однозначно определять состояние системы в произвольный момент времени [2].

Функциональную структуру можно определить как совокупность повторяющихся действий, а также связей элементов, ориентированных на конечный результат.

Пространственно-временная структура системы управления КА ближнего космоса может быть определена векторами пространственного состояния ее подсистем в некоторый момент времени, например, кеплеровыми ($\omega, \tau, \Omega, a, e, i$) параметрами траекторий полета КА и географическими координатами (φ, λ, H) средств управления [3].

Технология управления – распределенная и согласованная в пространстве и времени последовательность методов, способов, приемов, действий, операций, реализуемых в каждой из подсистем системы управления, закрепленная в документах по управлению и направленная на достижение поставленных перед системой целей [4].

Технология управления отражает все стороны процессов управления (управляемость, устойчивость, наблюдаемость, надежность, стоимость, временные показатели и т. д.). Технологии управления КА можно классифицировать на следующие (по сложности) классы: линейные, ситуационные, адаптивные, роевые, с применением искусственного интеллекта. В настоящее время в рамках системы управления КА ДЗЗ реализована линейная технология управления.

Линейная технология – последовательность отдельных работ и операций, которые производятся в строгом соответствии с заранее разработанным планом.

Орган управления – объект, осуществляющий планирование действий объекта управления, подготовку данных на управление, передачу их на объект управления и контроль функционирования объекта по информации в обратном канале связи (контуре управления).

Объект управления – объект, обладающий свойством целостности, предназначенный для достижения поставленной цели и выполняющий определенные задачи посредством реализации доведенных до него данных на управление.

В нашем случае объекты управления – отдельные КА, орбитальные, космические группировки [5].

Орбитальная группировка КА (ОГКА) – совокупность однотипных КА, предназначенных для совместного решения одной или нескольких задач, пространственно-временные структуры (ПВС) траекторий которых обладают свойствами симметрии, и управляемых выделенными для них однотипными средствами управления.

Космическая группировка КА (КГКА) – совокупность одиночных КА и орбитальных группировок КА, предназначенных для решения определенных задач (связь, ДЗЗ, телекоммуникации...).

Примерами орбитальных группировок являются группировки КА типа «Канопус-В», «Арктика-М», «Глонасс», «Луч-М» и т. д.

Примером КГКА является группировка КА ДЗЗ, включающая такие ОГКА, как: «Канопус-В», «Ресурс-П», «Арктика-М», «Электро-Л».

Органы управления:

- центр управления полетом КА (ЦУП КА);
- центр ситуационного анализа, координации и планирования задействования средств наземных комплексов управления (ЦСАКП);
- центр управления ретрансляцией и связью (ЦУРС) МКСР «Луч-М»;
- центр планирования задействования наземных средств приема целевой информации – ЦПСПЦА;
- центр планирования и расчета уставок целевой аппаратуры – ЦПЦА;
- лицо, принимающее решение – ЛПР.

Средства (комплексы) управления КА:

- наземные средства (комплексы) управления и измерений (НСУ);
- наземные станции приема целевой информации (СПЦИ);
- космические средства управления (КСУ) – МКСР «Луч-М».

Традиционно ЦУП КА, ЦСАКП, ЦУРС и ЛПР находятся в организации, управляющей полетом КА, а ЦПСПЦА, ЦПЦА и СПЦИ – у Операторов КА и ряда Заказчиков целевой информации.

В процессе управления КА также используется информация следующих, внешних по отношению к системе управления, источников:

- главный информационно-аналитический центр автоматизированной системы предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве (ГИАЦ АСПОС ОКП);
- Оператор МКСР «Луч-М»;
- глобальные навигационные спутниковые системы (ГЛОНАСС, GPS).

Структурно-функциональная схема типовой системы управления КА ДЗЗ (ОГКА) представлена на рис. 1.

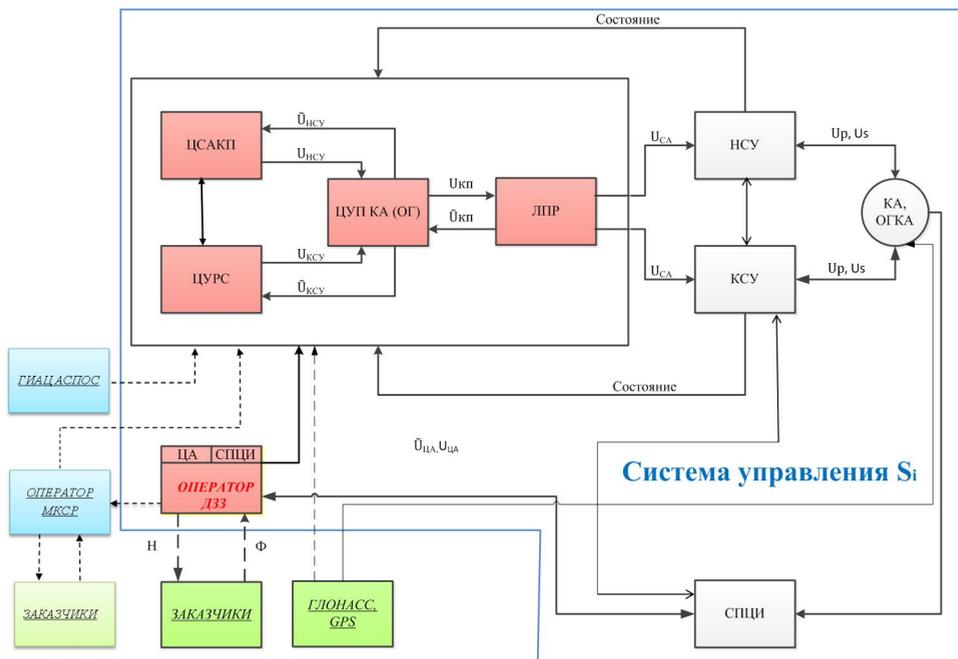


Рис. 1. Типовая система управления i -й ОГКА ДЗЗ

где $\hat{U}_{НСУ}$, $\hat{U}_{КСУ}$, $U_{НСУ}$, $U_{КСУ}$ – заявки и планы задействования НСУ и КСУ; $\hat{U}_{КАП}$, $U_{КАП}$ – предварительный и утвержденный планы управления; $\hat{U}_{ЦА}$, $U_{ЦА}$ – заявки и планы СПЦИ, уставки для целевой аппаратуры; U_p , U_s – векторы управления КА и телеметрии (информации оперативного контроля); $U_{СА}$ – вектор управления средствами управления и КА; H – обработанная целевая информация; Φ – заявки заказчиков на получение целевой информации.

Ключевые элементы систем управления КА (ОГКА) можно определить, проанализировав зависимость показателей качества управления от характеристик каждого ее элемента.

Анализ созданных и перспективных систем управления КА ДЗЗ [6] (ОГКА) показывает, что их ключевыми элементами являются:

1. Объекты управления (отдельные КА, ОГКА, КГКА).
2. Средства управления (наземные средства, многофункциональная космическая система ретрансляции и СПЦИ).
3. Органы управления (ЛПР, ЦУП КА, ЦСАКП, ЦПЦА, ЦПСЦИ).
4. Структура (функциональная и пространственно-временная).
5. Технологии управления.

При этом для систем управления ОГКА ДЗЗ традиционных типов по крайней мере на период до 2025 г. будут выполняться следующие положения:

1. Достаточность ресурсов для управления всеми ОГКА ДЗЗ.
2. МКСР не будет задействована в управлении ОГКА.
3. Допустимая нагрузка НСУ не превысит 25 – 30 %, а суммарное время связи с космическими аппаратами – 5 – 10 %.
4. Системы управления ОГКА останутся трехконтурными.

5. Технологии управления останутся в классе линейных.

6. Оперативность управления ОГКА – не лучше, чем 1,5 – 4,5 ч (без учета времени подготовки уставок для целевой аппаратуры).

7. Объем целевой информации, собираемой высокоинформативными КА ДЗЗ, превысит возможности всех СПЦИ.

8. Затрачиваемые на управление ресурсы будут возрастать практически прямо пропорционально количеству запуска КА новых типов.

Корректное и взаимоувязанное совершенствование ключевых элементов систем управления КА обеспечит создание систем управления нового качества, позволяющих повысить в 3 – 4 раза загрузку НСУ и на порядок – полезное время их работы (суммарное время связи с КА). Для этого рассмотрим поведение некоторых показателей качества управления при возможном изменении характеристик ключевых элементов традиционных ОГКА после 2025 года.

Важнейшими показателями качества управления являются глобальность, оперативность, надежность управления, объем принимаемой целевой информации, стоимость целевой информации. Эти показатели являются комплексными, взаимозависимыми и не могут быть представлены в простом виде. Обычно оптимизируются показатели глобальности и оперативности управления при заданном уровне надежности и все подсистемы системы управления создаются исходя из обеспечения заданных (оптимальных) их величин.

Под коэффициентом глобальности ($K_{гл}$) управления КА понимается отношение суммы времен нахождения его в зоне радиовидимости (ЗРВ) НСУ на интервале времени T_S к продолжительности этого интервала:

$$K_{гл} = \sum \tau_i / T_S \quad (1)$$

где: τ_i – интервал времени видимости КА ДЗЗ с НСУ на i -том витке; T_S – продолжительность интервала наблюдения за КА.

В общем виде $K_{гл}$ при наличии наземных и космических средств управления записывается в следующем виде

$$K_{гл} = f(S_{ка}, S_{нсу}) = f(\omega, \tau, \Omega, a, e, i, \bar{\varphi}, \bar{\lambda}, \bar{H}), \quad (2)$$

где $S_{нсу}$ – параметры ПВС НСУ ($\bar{\varphi}, \bar{\lambda}, \bar{H}$ – географические координаты); $S_{ка}$ – характеристики ПВС КА (кеплеровы параметры).

Для оперативного расчета и оценки $K_{гл}$ НСУ без учета вращения Земли во время нахождения КА в ЗРВ можно воспользоваться следующим алгоритмом [7] (круговая орбита высотой $H_{КА}$, наклонение – i):

$$\delta = 2\pi T / 86400 \quad (3)$$

$$\psi = \psi_0 + k \cdot \delta \quad (4)$$

$$l = \arccos \left(\frac{R_3}{(R_3 + H_{КА})} \cos \gamma \right) - \gamma \quad (5)$$

$$s(\psi) = \arccos(\cos(\Delta\varphi)\sin(i) + \sin(\Delta\varphi)|\cos(i)|\cos(\psi)) \quad (6)$$

$$\alpha(\psi) = \operatorname{arctg} \frac{2\sin(\Delta\varphi)}{\operatorname{tg} \frac{\Psi}{2} \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right| + \Delta\varphi\right) + \operatorname{ctg} \frac{\Psi}{2} \sin\left(\left|\frac{\pi}{2} - i\right| - \Delta\varphi\right)} \quad (7)$$

$$\beta(\psi) = \arcsin \frac{\sin s(\psi) |\cos \alpha(\psi)|}{\sin l} \quad (8)$$

$$\text{если } \left| \frac{\sin s(\psi) |\cos \alpha(\psi)|}{\sin l} \right| > 1, \quad (9)$$

то

$$\mathcal{L}(\psi) = 0, \quad (10)$$

иначе

$$\mathcal{L}(\psi) = 2 \cdot \operatorname{arctg}(\operatorname{tg}(l) \cos \beta(\psi)) \quad (11)$$

$$\tau = L(\psi) / 2\pi \cdot T. \quad (12)$$

Коэффициент глобальности с учетом соотношений (3) – (12) рассчитывается по формуле:

$$K_{\text{гл}} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \frac{\mathcal{L}(\psi_0 + k \cdot \delta)}{2\pi}, \quad (13)$$

где $\Delta\varphi$ – разность широт между северным полюсом и НСУ; T – период обращения КА; γ – угол места – минимальный угол видимости КА над горизонтом; n – количество витков КА, принятое для расчета коэффициента $K_{\text{гл}}$; k – порядковый номер витка; Ψ_0 – для данных расчетов произвольная величина; 86400 – продолжительность суток в секундах.

Погрешность аналитического алгоритма расчета $K_{\text{гл}}$ пренебрежимо мала (менее 0,1 – 1,5 %) для околополярных орбит и орбит со средним наклоном в диапазоне высот до одной тысячи километров.

На рис. 2 приведены результаты расчета $K_{\text{гл}}$ для типовых круговых солнечно-синхронных орбит (ССО) КА ДЗЗ ($\gamma = 5^\circ$).

Оперативность управления характеризует минимальный интервал времени в течение суток между возможными моментами передачи вектора управления на борт КА. Как следует из соотношений (3) – (12), этот интервал равен периоду обращения КА вокруг Земли, т. е. когда КА на каждом витке траектории полета появляется в ЗРВ наземных средств, если выполняется (для северного полушария) соотношение:

$$|i - \varphi| R_3 < R_{\text{зрв}}, \quad (14)$$

где R_3 – радиус Земли; $R_{\text{зрв}}$ – радиус зоны радиовидимости наземного средства.

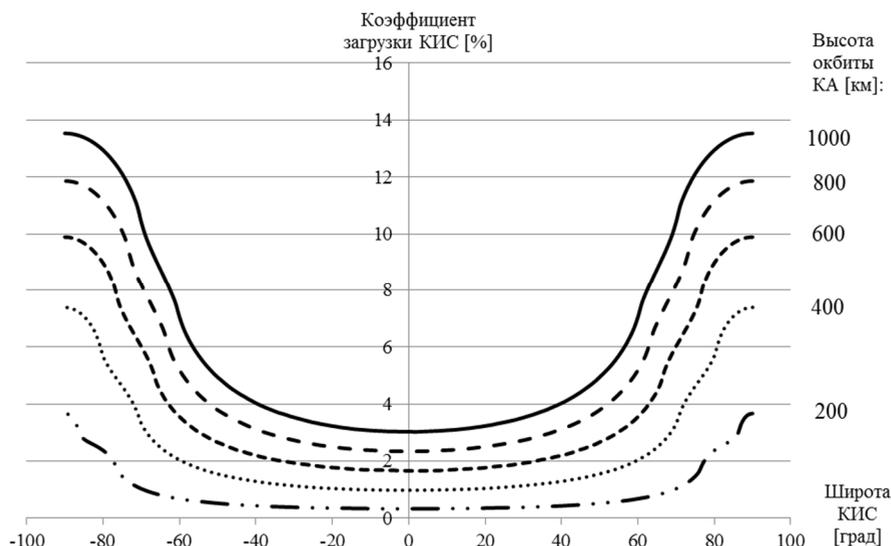


Рис. 2. Изменение $K_{ГЛ}$ для КА на солнечно-синхронных орбитах

Из соотношений (3) – (12) также следует, что $K_{ГЛ}$ достигает максимума при равенстве наклона орбиты и широты точки стояния наземного средства.

В противном случае оперативность управления превышает период.

Традиционные направления совершенствования ключевых элементов систем управления КА, изложенные в руководящих документах:

1. Космический аппарат: унификация аппаратуры связи, увеличение скорости передачи данных; перенос ряда задач навигационно-баллистического и телеметрического обеспечения на борт КА;

2. Средства управления: увеличение скорости передачи данных, и унификация аппаратуры, ввод новых СПЦИ, модернизация КА «Луч»;

3. Технологии управления: автоматизация работ по подготовке и передаче данных на управление, совершенствование Базового ЦУП.

Предлагаемые авторами направления, существенно улучшающие характеристики систем управления КА ДЗЗ, следующие:

1. Космический аппарат: внедрение многолучевых антенн с активными фазированными решетками (АФАР).

2. Средства управления: внедрение многолучевых АФАР с максимальными зонами обзора, ввод новых наземных средств, прием-передача служебной информации в составе целевой информации.

3. Структура системы:

- функциональная структура: переход к двухконтурной системе управления;
- пространственно-временная структура: оптимизация структуры КГКА в целом, размещения средств управления.

4. Технологии управления: реализация ситуационных технологий управления ОГКА и КГКА в целом.

Очевидно, что частные направления рассматривались отдельными авторами, однако для создания синэргетического эффекта все эти направления необходимо рассматривать совместно. Приведем некоторые результаты исследований по указанным выше направлениям.

Наземные средства. Скорость приема информации в командном и целевом каналах отличается на три порядка. Следовательно, совмещение в одном сеансе связи приема целевой и служебной информации на СПЦИ позволяет, во-первых, сократить количество планируемых сеансов связи с КА на 25 – 30 % и, во-вторых, понизить минимальное время оперативной коррекции управления до 10 – 15 минут.

Технологии управления. Введение в контур управления оптическими КА ДЗЗ информации группировки метеорологических КА позволит существенно повысить качество целевой информации.

КА и наземные средства управления. Внедрение АФАР (в т. ч. многолучевых) позволяет многократно (от двух-трех раз на один луч) увеличить возможности систем в направлениях увеличения группировок КА и передачи целевой информации.

Пространственно-временная структура. В случае построения на одной высоте симметричной [8] ПВС всех низковысотных ОГКА возможно увеличить на порядок загрузку средств управления и приема целевой информации (соответствующее увеличение состава группировок).

В случае установки наземных средств исходя из условия (14) возможно увеличение коэффициента глобальности управления минимум в 2 раза и обеспечение условий нахождения КА в ЗРВ на каждом витке.

Функциональная структура. Объединение органов управления по функциям и задачам позволяет добиться существенного ускорения процессов управления, сокращения требуемых ресурсов и времени принятия решения: ЦСАКП, ЦУРС и ЦПСПЦИ (планирование средств управления и связи) в ЦПС – центр планирования средств; всех ЦУП ОГКА ДЗЗ в ЦУО – центр управления операциями (планирование съемок, планирование полета, расчет уставок и управление полетом) – позволит реализовать ситуационную технологию управления и оптимальное использование всех КА этой группировки.

Оптимизированная функциональная структура системы управления космической группировкой КА ДЗЗ представлена на рис. 3.

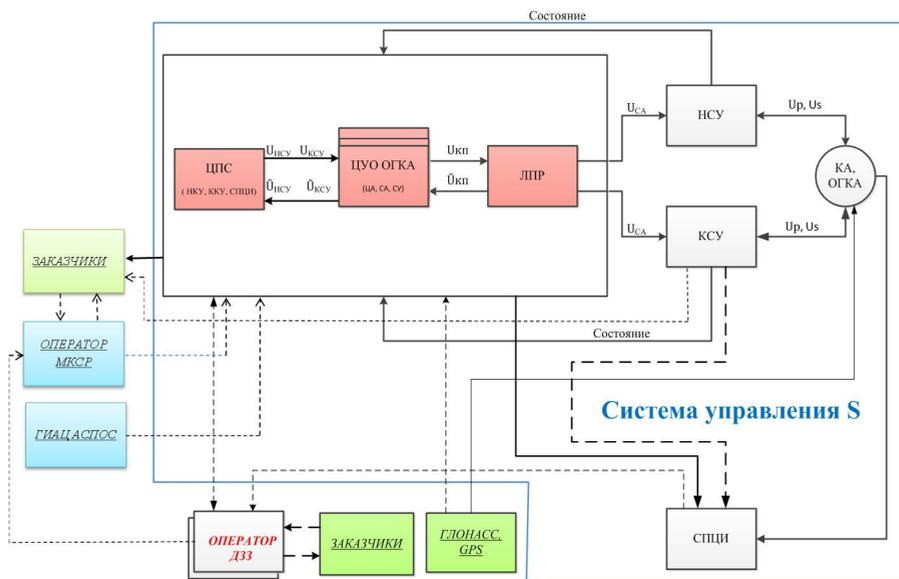


Рис. 3. Система управления космической группировкой КА ДЗЗ

Детальные результаты по каждому направлению совершенствования ключевых элементов могут быть получены на основе полномасштабной модели системы управления КГКА ДЗЗ с учетом стоимостных, структурных, динамических, технологических, информационных и надежности показателей ее функционирования.

Выводы

В статье с системных позиций рассмотрено состояние современных систем управления группировками КА ДЗЗ. Сформулирована системная терминология изучаемых объектов. Определены ключевые элементы систем управления КА ДЗЗ, их современное состояние, проблемные вопросы. Приведен разработанный аналитический алгоритм расчета коэффициента глобальности наземных СУ для низковысотных КА. Проанализировано изменение глобальности, оперативности управления КА в зависимости от ПВС группировок и наземных средств. Сформулированы направления совершенствования ключевых элементов систем управления КА ДЗЗ и прогнозируемые результаты их реализации. Предложен оптимальный вариант функциональной организации системы управления космической группировки КА ДЗЗ. Показано, что только совместная и согласованная по времени реализация предложенных направлений совершенствования ключевых элементов управления позволит осуществить переход от линейных технологий управления к ситуационным, обеспечить улучшение показателей управляемости и оперативности управления КА ДЗЗ в несколько раз, рост группировки КА на порядок. Таким образом это создаст синергетический эффект, позволяющий совершить прорыв в технологиях управления, что невозможно на традиционных путях развития ракетно-космической техники.

Литература

1. Лисеев И. К., Садовский В. Н. Системный подход в современной науке. – М.: Прогресс-Традиция, 2004. – С. 560.
2. Теория управления (терминология) / Под ред. Б. Г. Волик. – М.: Наука, 1988; М.: Наука, 1988. – С. 56.
3. Матюшин М. М., Луценко Ю. С. Вопросы оптимизации пространственно-временной структуры космической группировки // Материалы четвертой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». Приложение за 2016 год. – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2016. – С. 16 – 21.
4. Технологии поддержки принятия решений / Г. А. Лисьев, И. В. Попова. – 2-е изд., стереотип. – М.: ФЛИНТА, 2011. – С. 133.
5. Луценко Ю. С., Матюшин М. М. Методологический подход к построению системы управления группировками космических аппаратов дистанционного зондирования земли // Тезисы докладов пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли». – М.: АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2017. – С. 28 – 30.
6. Ногов О. А. Планирование сеансов при управлении ретрансляцией и связью с использованием МКСР «Луч» // Труды МАИ. – Вып. 66. – www.mai.ru/science/trudy/.
7. Баранова И. С., Луценко Ю. С., Поливников В. М. Аналитический способ расчета коэффициента глобальности управления космическим аппаратом // Материалы науч-

но-технической конференции молодых ученых и специалистов Центра управления полетами (ЦУП). – Королев: ЦНИИмаш, 2017.

8. Можав Г. В. Синтез орбитальных структур спутниковых систем. Теоретико-групповой подход. – М. : Машиностроение, 1989. – С. 303.

ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРЕБУЕМОГО УРОВНЯ СТОЙКОСТИ АППАРАТУРЫ КА, ФУНКЦИОНИРУЮЩЕГО НА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЕ

В. А. Хатулев, А. Н. Загорков, О. В. Михеев, А. Е. Ошкин
(АО ГКНПЦ им. М. В. Хруничева, г. Москва)

***Аннотация.** Рассмотрены методические вопросы оценивания ослабления ионизирующих излучений космического пространства конструктивными элементами космического аппарата. Получены зависимости снижения дозовых характеристик от толщины защиты и даны оценки массовых характеристик защиты, обеспечивающих требуемую стойкость ЭКБ.*

***Ключевые слова:** электронная компонентная база, поглощенная доза, космический аппарат, радиационная защита, электрорадиоизделия.*

Введение

В процессе функционирования космического аппарата (КА) его бортовая аппаратура должна сохранять свою работоспособность с заданной надежностью в течение всего срока службы КА. Одним из факторов, воздействующих на бортовую аппаратуру КА, является ионизирующее излучение космического пространства (ИИКП).

Отраслевыми нормативными документами задается требование, что бортовая аппаратура должна надежно функционировать в течение всего срока службы под воздействием ИИКП. Воздействие ИИКП на бортовую аппаратуру осуществляется в виде дозовых и одиночных эффектов на электронную компонентную базу (ЭКБ).

Обеспечение стойкости аппаратуры от воздействия дозовых эффектов от ИИКП осуществляется выбором стойкой элементной базы или увеличением массовой толщины защиты. При этом требования по коэффициенту стойкости аппаратуры к воздействию ИИКП задаются в техническом задании (ТЗ) и проверяются по нормативному документу ОСТ 134-1034-2012.

В том случае, когда аппаратура не выполняет требования ТЗ по коэффициенту запаса по радиационной стойкости, возможны три варианта решения задачи обеспечения стойкости:

- проведение дополнительных испытаний ЭКБ или прибора;
- замена ЭКБ с низким уровнем стойкости;
- установка дополнительной защиты на блоки аппаратуры.

Не всегда представляется возможность проведения дополнительных испытаний и замены ЭКБ. Тогда разработчик КА вынуждено идет по третьему варианту обеспечения стойкости. Именно этому варианту посвящено дальнейшее изложение статьи.

При этом основное внимание в материале статьи уделено определению требуемой стойкости ЭКБ, нахождению необходимой для ее обеспечения толщины радиационной защиты, а также оценке массовых характеристик защиты и КА в целом.

Постановка задачи и обсуждение материалов исследований

В качестве расчетного случая была выбрана геостационарная орбита (ГСО) функционирования КА. Типовая зависимость поглощенной дозы ИИКП от массовой толщины защиты на данной орбите представлена на рис. 1.

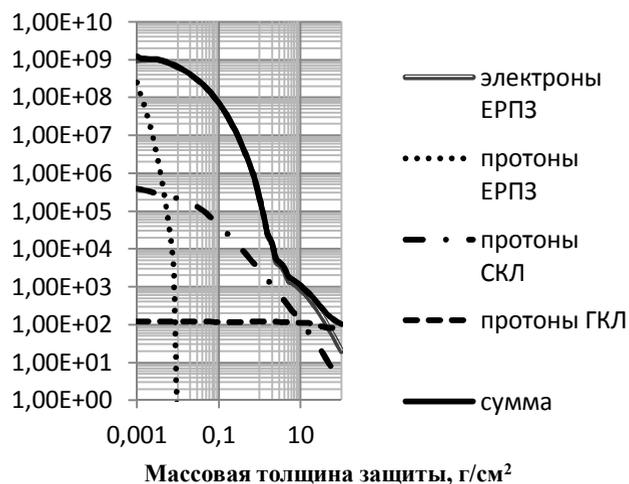


Рис. 1. Типовая зависимость поглощенной дозы ИИКП от массовой толщины защиты для орбиты ГСО (время функционирования КА 10 лет)

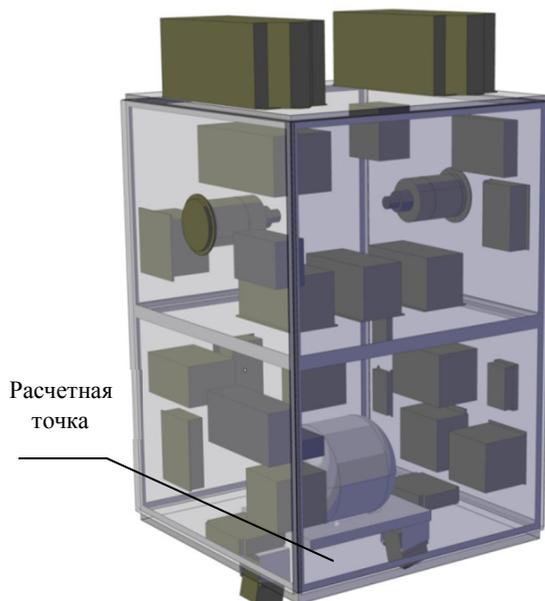


Рис. 2. Тестовая радиационная модель КА

Как видно из рис. 1, основной вклад в поглощенную дозу для ГСО вносят протоны естественных радиационных поясов Земли (ЕРПЗ).

Для проведения расчетов по определению радиационной стойкости аппаратуры КА была создана тестовая радиационная модель КА, представленная на рис. 2. В качестве элемента расчетов была выбрана конструкция типового прибора, модель которого представлена на рис. 3. Для этого прибора были выбраны 27 точек расположения ЭКБ на его платах (по 9 расчетных точек на каждой плате прибора).

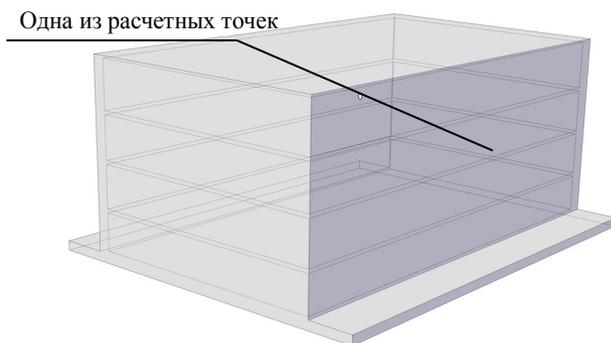


Рис. 3. Модель тестового прибора

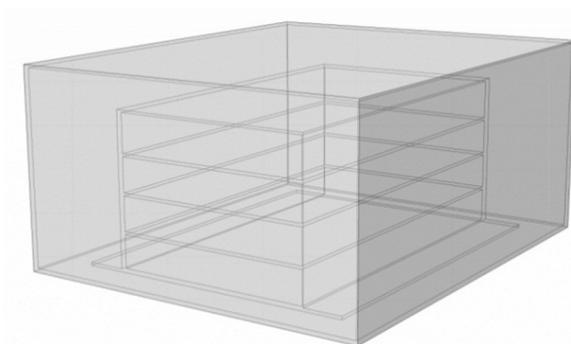


Рис. 4. Прибор внутри защитного кожуха

Основным фактором, влияющим на массу аппаратуры КА и КА в целом, является стойкость ЭКБ. При низком уровне стойкости необходимо обеспечивать достаточную экранированность ЭКБ от воздействия ИИКП за счет увеличения толщины стенок прибора, либо помещения прибора в защитный кожух (рис. 4).

Известно, что массовая толщина защиты является линейной функцией от плотности материала и толщины стенки прибора. При этом массовая толщина защиты и масса прибора могут быть эквивалентны только тогда, когда защита представляет собой пластину и меняется только толщина одной из ее сторон. Тогда для получения одинаковой массовой толщины необходимо, чтобы выполнялось:

$$\rho_1 \cdot h_1 = \rho_2 \cdot h_2,$$

где $\rho_{1,2}$ – плотности материалов защиты; $h_{1,2}$ – толщины стенок защиты.

Масса конструкции корпуса прибора рассчитывается по формуле:

$$M_{\text{кон}} = (a + 2 \cdot h_1) \cdot (b + 2 \cdot h_1) \cdot (c + 2 \cdot h_1) \cdot \rho_1 - a \cdot b \cdot c \cdot \rho_1, \quad (1)$$

где a, b, c – ширина, высота и толщина внутреннего объема корпуса.

На рис. 5 представлены рассчитанные по (1) результаты зависимости массы конструкции прибора от массовой толщины защиты для приборов из различных материалов.

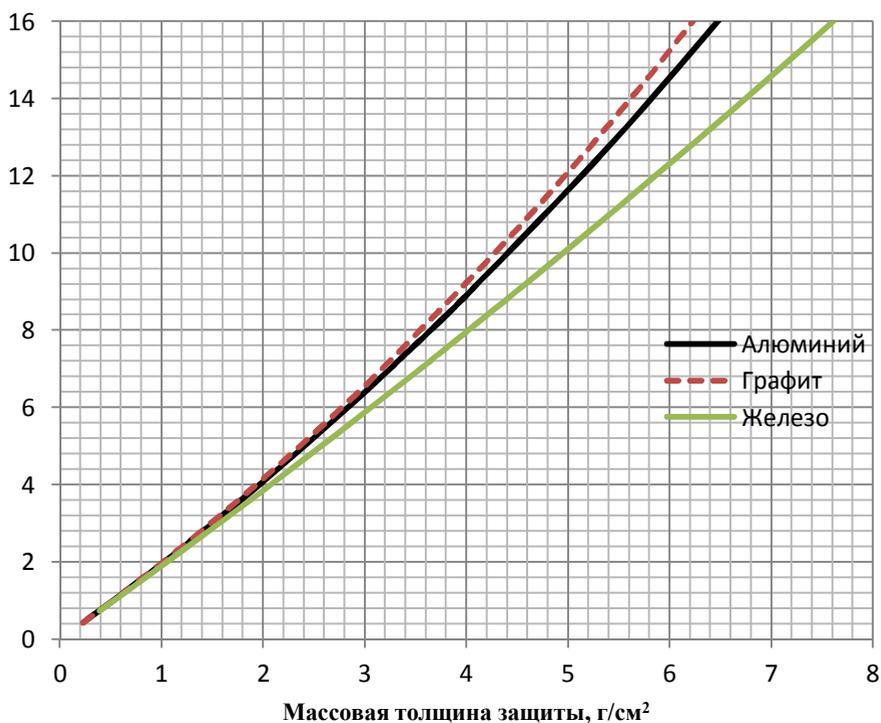


Рис. 5. Сравнение зависимостей массы конструкции прибора из разных материалов от массовой толщины защиты

В работе [1] с участием авторов были исследованы зависимости стойкости аппаратуры КА от массовой толщины защиты для разных материалов. Итогом работы стал вывод, что использование материалов с атомным номером больше алюминия приводит к увеличению накопленной дозы внутри прибора (для железа среднее увеличение составило 30 %). Поэтому, замена алюминия на железо, с целью уменьшения массы конструкции и размера защитных экранов приводит к увеличению поглощенной дозы для одинаковых массовых толщин защиты. С учетом этого замечания ниже приведены расчеты требуемой стойкости аппаратуры для разных толщин стенок прибора из алюминия. При этом было выбрано два типичных расположения прибора:

- прибор расположен на наружной поверхности КА;
- прибор расположен внутри КА.

Для увеличения защищенности прибора были выбраны следующие варианты: увеличения толщины стенок прибора и установки защитного экрана или кожуха.

Расчеты были проведены по методике [2], разработанной в КБ «Салют» с использованием отраслевого стандарта [3].

На рис. 6 представлена зависимость накопленной дозы внутри прибора от толщины стенок прибора для двух вариантов его установки, а на рис. 7 зависимость изменения относительной массы того же прибора от толщины его стенок и от толщины стенок защитного кожуха.

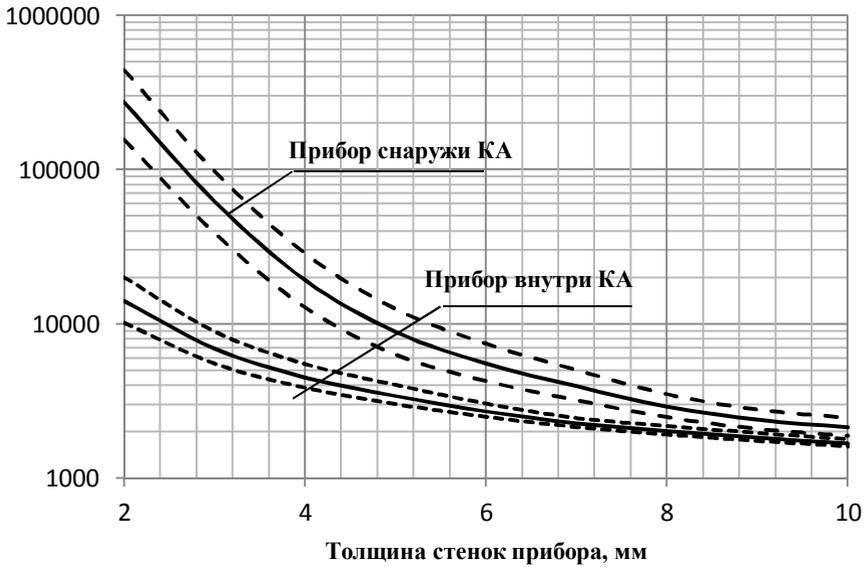


Рис. 6. Зависимость накопленной дозы внутри прибора от толщины стенок прибора

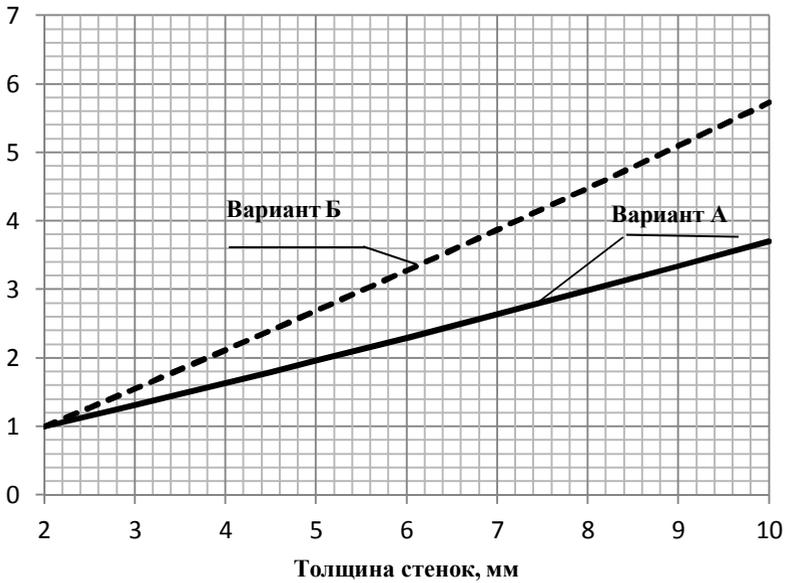


Рис. 7. Зависимость относительной массы прибора от толщины защиты

На рис. 7 обозначено: вариант А – прибор сваряруемой толщиной стенок прибора (алюминий), вариант Б – прибор с толщиной стенок прибора 2 мм (алюминий) и варяруемой толщиной стенок защитного кожуха (алюминий).

С учетом полученных на рис. 7 зависимостей были проведены расчеты массы КА от толщины стенок приборов.

Масса космического аппарата $M_{КА}$ включает себя массу собственной конструкции КА $M_{кон}$ и массу всех приборов $M_{приб}$, т. е.

$$M_{КА} = M_{кон} + M_{приб}.$$

Масса каждого прибора зависит от толщины стенок прибора h . Тогда массу КА можно задать функцией

$$M_{КА}(h) = M_{кон} + \sum_{i=1}^n M_{приб}(h),$$

где n – число приборов, входящих в КА.

На рис. 8 представлена зависимость изменения относительной массы КА от толщины стенок приборов (условно принято, что масса аппаратуры составляет ~20 % от массы КА).

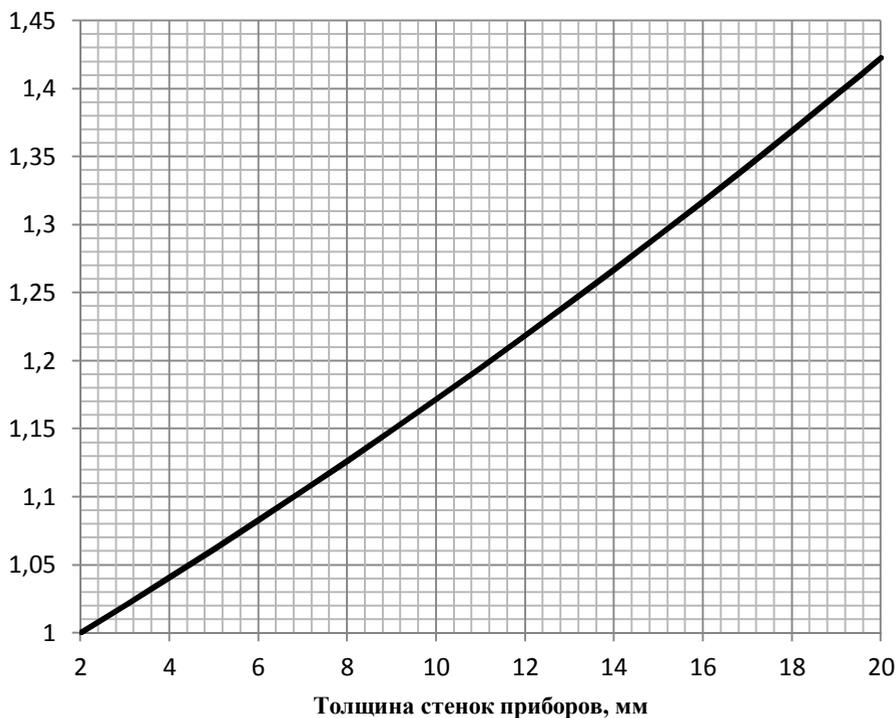


Рис. 8. Зависимость относительной массы КА от толщины стенок приборов

Отметим, что дозовая нагрузка на ЭКБ зависит не только от толщины стенок приборов h , но и от заданных сроков функционирования КА. Для этого на рис. 9 приведены рассчитанные графики зависимости дозовой нагрузки на ЭКБ внутри приборов от толщины стенок прибора h для разных сроков функционирования КА на ГСО.

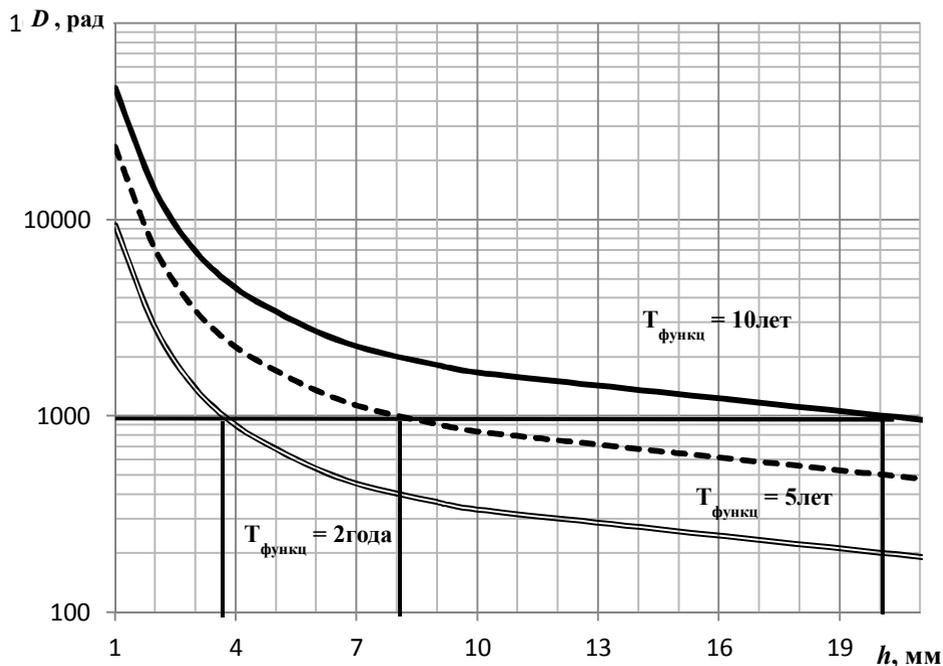


Рис. 9. Зависимость дозовой нагрузки на ЭКБ (D) внутри прибора от толщины стенок прибора (h) для сроков функционирования КА 2, 5 и 10 лет

Полученные расчетные зависимости на графиках рис. 5 – 9 позволяют сначала оценить радиационные нагрузки на ЭКБ для различных условий размещения приборов, вариантов их защищенности (выбором толщины стенок прибора или защитного кожуха), вида материалов защиты. А далее с учетом толщин стенок приборов определить массу приборов и массу КА в целом для заданного времени функционирования КА.

В качестве примера на рис. 9 показано, что для уровня стойкости ЭКБ 1 крад и времени функционирования КА 10 лет толщина защиты корпуса приборов должна быть не менее 20 мм. При этом в соответствии с графиком рис. 8 масса КА возрастает ~ на 40 %. Для снижения этой величины, естественно, следует увеличивать стойкость ЭКБ.

Выводы

1. Получены расчетные зависимости дозовых нагрузок на ЭКБ приборов КА, функционирующего на ГСО, от толщины радиационной защиты, выполненной в варианте увеличения толщины стенок приборов или в варианте дополнительных защитных кожухов. Зависимости позволяют учитывать выбираемый материал защиты, а также место установки прибора на КА.

2. Приведенные графические материалы позволяют оценить увеличение массы КА за счет увеличения толщины защитных стенок приборов или защитных кожухов, а также предъявить требования к стойкости ЭКБ при заданных ограничениях на массу КА.

Литература

1. Бахвалов Ю. О., Хатулев В. А, Завора Ю. И., Михеев О. В., Загорков А. Н., Ошкин А. Е., Харин Ю. Н. Применение методов 3D-радиационного моделирования при расчете радиационных нагрузений на бортовую аппаратуру КА // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2013. – № 4. – С. 3 – 5.
2. Загорков А. Н., Михеев О. В., Ошкин А. Е. Об эффективности использования конструкционных материалов в качестве радиационной защиты аппаратуры КА на ГСО // Вопросы атомной науки и техники: Сборник тезисов. – Лыткарино, 2017. – Вып. 1. – С. 43 – 44.
3. ОСТ 134-1044-2007.
4. ОСТ 134-1034-2012.

ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ РАДИОАКТИВНОГО КОСМИЧЕСКОГО МУСОРА

А. Е. Шустов, С. Е. Улин, К. Ф. Власик, В. М. Грачев, В. В. Дмитренко,
К. В. Кривова, А. С. Новиков, З. М. Утешев, И. В. Чернышева
(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»,
г. Москва)

Ключевые слова: радиоактивный космический мусор, инспекция космических объектов, гамма-спектрометры, гамма-нейтронное излучение, космический аппарат, космический ядерный мониторинг.

Введение

В настоящее время одной из актуальных задач мониторинга околоземного космического пространства (ОКП) является обнаружение, каталогизация и в перспективе ликвидация космического мусора (КМ). Повышение плотности КМ, особенно на высотах наиболее востребованных орбит, приводит к увеличению вероятности его столкновения с космическими аппаратами (КА).

Отдельной проблемой является наличие радиоактивного космического мусора (РКМ) в околоземном космическом пространстве. В конце прошлого столетия стало очевидным, что энергии от солнечных батарей уже недостаточно для полноценной работы КА. Поэтому для решения этой проблемы были предприняты попытки использования альтернативных источников энергии. На околоземные орбиты было запущено несколько десятков КА с ядерными источниками энергии на борту. Время баллистического существования таких КА на орбитах захоронения (900 – 1000 км) составляет несколько сотен лет. Однако в случае разрушения этих аппаратов некоторые радиоактивные элементы могут попасть в верхние слои атмосферы и на поверхность Земли уже через несколько десятков лет. На рис. 1 представлено распределение плотности космического мусора ОКП [1].

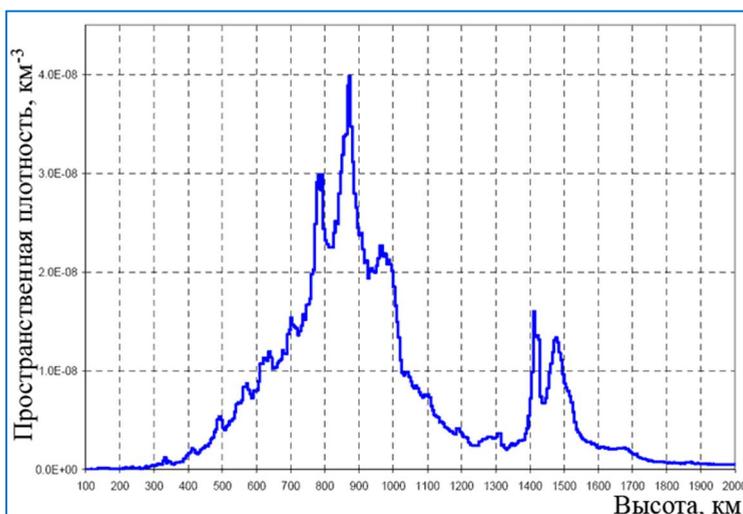


Рис. 1. Распределение космического мусора на высотах от 100 до 2000 км

Из рис. 1 следует, что КА с ядерными энергетическими установками на борту находятся в зоне риска, т. к. на высотах 850 – 1050 км наблюдается максимальная плотность элементов космического мусора, что приводит к увеличению вероятности столкновения и разрушения радиационно-опасных объектов.

Для развития космической техники и реализации межпланетных проектов, необходимо увеличение мощности источников энергии и длительности их функционирования в десятки и сотни раз. Для межпланетных перелётов на сегодняшний день нет альтернативы ядерным установкам, которые могут обеспечить электричеством и энергией ракетные двигатели КА [2].

Сегодня работы в данном направлении проводятся как в России, так и в других странах, участвующих в освоении межпланетного космического пространства.

Для уменьшения рисков радиоактивного загрязнения ОКП необходимо создавать систему космического ядерного мониторинга, основными задачами которого являются:

- обнаружение, идентификация и каталогизация радиоактивных элементов КМ;
- обнаружение на борту КА радиоактивных или делящихся материалов;
- идентификация обнаруженных на КА ядерных материалов и их количественная оценка;
- определение пространственных координат и параметров орбит радиационных объектов в ОКП;
- своевременное информирование мирового сообщества о результатах радиационного космического мониторинга;
- разработка мероприятий по предотвращению попадания ядерных материалов в атмосферу Земли при возникновении аварийных ситуаций на борту соответствующих КА.

Радиационный космический мусор состоит из разных компонентов, которые по своим характеристикам можно разделить на три группы:

- фрагменты ядерных энергетических установок;
- КА с ядерными энергетическими установками, завершившие свой рабочий цикл;
- действующие КА, на борту которых имеются ядерные установки, представляющие потенциальную опасность из-за возможности их разрушения при столкновениях с обычным КМ или метеоритами.

Радиоактивные элементы каждой из этих групп обладают специфическими радиационными характеристиками. Прежде всего, это касается интегральных потоков и энергетических спектров гамма-нейтронного излучения. Измерение характеристик этих излучений позволяет определить тип радиоактивных фрагментов КМ, динамику их дальнейшего состояния, а также оценить их вклад в общую радиационную обстановку.

Для обнаружения и идентификации радиоактивных объектов КМ можно использовать различную аппаратуру, в частности, гамма-, рентгеновские, нейтронные, инфракрасные, оптические и другие спектрометры. Однако наиболее информативными среди них являются гамма-нейтронные спектрометры. Радиоактивные нуклиды создают характерное для каждого из них линейчатое гамма-излучение. Оно является «визитной карточкой» каждого радиоактивного изотопа. Для регистрации их гамма-излучения необходимы гамма-спектрометры с хорошей чувствительностью и высоким энергетическим разрешением. На основе измеренных гамма-спектров можно определить изотопный и количественный состав радиоактивных и делящихся материалов, находящихся на борту КА.

Регистрация потоков нейтронного излучения позволяет получить сведения о функциональном состоянии энергетических установок и общих характеристиках деющих материалов, имеющих на борту КА.

Возможности регистрации элементов РКМ детально изучались во ВНИИЭМ совместно с НИЯУ МИФИ, ФИАН и ИНАСАН в рамках научно-исследовательских проектов Федеральной целевой программы «Исследования и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009 – 2013 годы» [3, 4]. В результате выполнения проекта были разработаны прототипы тонкостенных ксеноновых гамма-детекторов, технология их изготовления и методы обнаружения РКМ. В этих работах отмечалось, что наряду с гамма-нейтронными методами контроля потенциально опасных объектов в ОКП целесообразно использовать радиолокационные средства наблюдения, а также современные оптические телескопы для определения динамических характеристик радиационно-опасных космических объектов и прогноза их движения.

Гамма-спектрометрическая аппаратура «Нуклид»

В последнее время в НИЯУ МИФИ разработана новая гамма-спектрометрическая аппаратура «Нуклид» [5], в состав которой входят несколько независимых ксеноновых гамма-спектрометрических модулей (КГСМ). Их количество определяется возможностями размещения научной аппаратуры на КА. Увеличение числа КГСМ повышает чувствительность НА «Нуклид». Основным детектирующим элементом КГСМ является цилиндрическая импульсная ионизационная камера (ЦИИК) с экранирующей сеткой [6]. В качестве рабочего вещества ионизационной камеры используется сжатый ксенон.

Со всех сторон каждая ЦИИК окружена сцинтилляционными детекторами (СД) на основе полистирола, включенных в схему антисовпадения. Сцинтилляционные вспышки от заряженных частиц регистрируются с помощью кремниевых фотоумножителей (SiPM). Основное требование к СД заключается в регистрации с высокой эффективностью (~ 99,9 %) заряженной компоненты космического излучения, а также ее рижекции за счет антисовпадательной системы, обеспечивающей надежную регистрацию гамма-излучения ЦИИК.

Принципиальная схема одного КГСМ НА «Нуклид» и его общий вид показаны на рис. 2 и 3 соответственно.

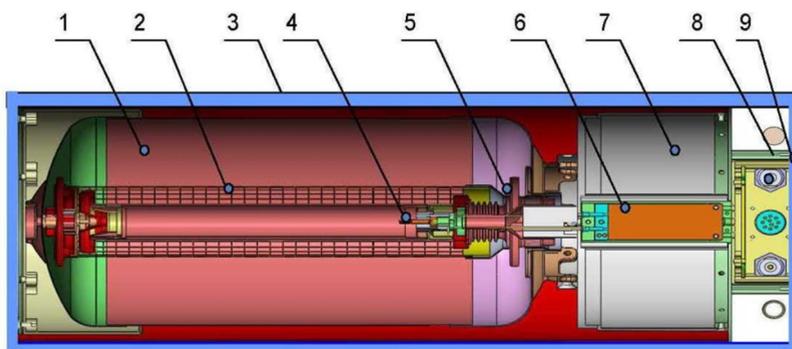


Рис. 2. Принципиальная схема КГСМ: 1 – цилиндрическая импульсная ионизационная камера; 2 – экранирующая сетка; 3 – герметический кожух; 4 – анод; 5 – керамический гермоввод; 6 – зарядочувствительный усилитель; 7 – источник высоковольтного питания; 8 – электроника; 9 – сцинтилляционная антисовпадательная защита

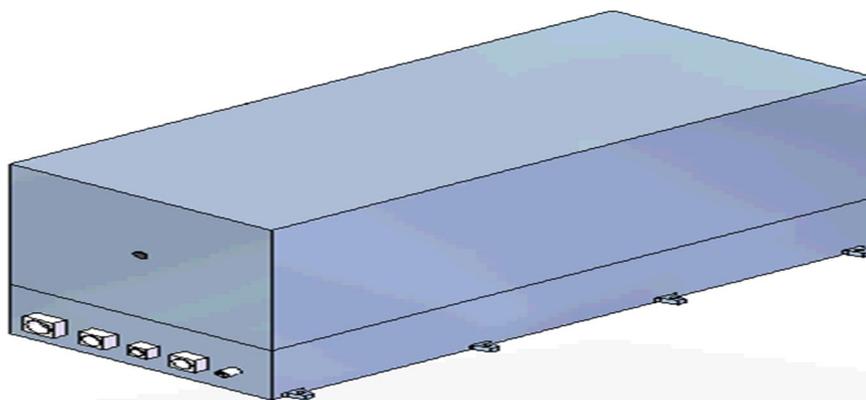


Рис. 3. Общий вид одного КГСМ НА «Нуклид»

Основные физико-технические характеристики КГСМ приведены в таблице.

Основные физико-технические характеристики КГСМ НА «Нуклид»

Энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов (МэВ)	0,03 – 5
Энергетическое разрешение на гамма-линии 662 кэВ (%)	$1,7 \pm 0,5$
Чувствительный объем (см ³)	4000
Масса (кг)	~ 10
Габариты (мм ³)	~200×250×4000 мм ³
Напряжение питания (В)	+ (24 –27)
Потребляемая мощность (Вт)	≤ 20
Рабочий температурный диапазон (°С)	от – 40° до +100°
При отрицательных температурах ЦИИК работает в режиме контролируемого подогрева);	
Гарантийный срок годности аппаратуры (год)	≥ 10

В качестве примера на рис. 4 приведены типичные гамма-спектры стандартных гамма-источников, измеренные с помощью КГС.

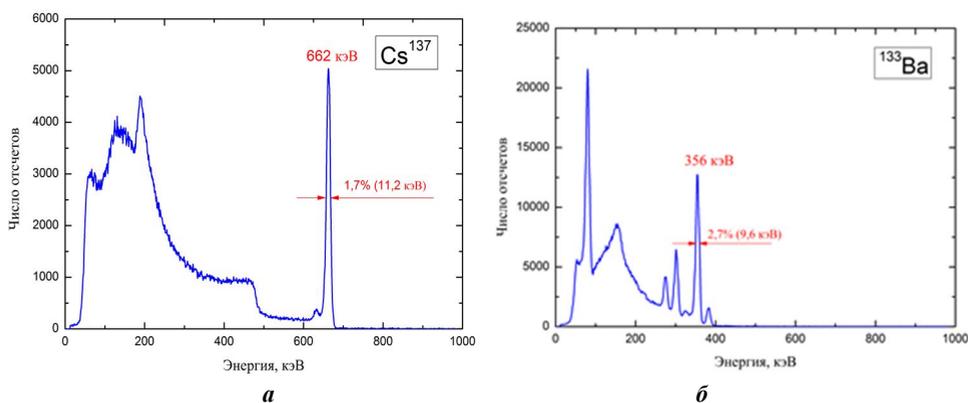


Рис. 4. Гамма-спектры, измеренные КГСМ от гамма-источников: а – Cs¹³⁷ и б – Ba¹³³

Гамма-спектры, приведенные на рис. 4, демонстрируют спектрометрические возможности КГСМ при регистрации линейчатого гамма-излучения.

КГСМ обладают рядом характеристик, которые выгодно отличают их от гамма-спектрометров, обычно применяемых в космических экспериментах. Этими характеристиками являются:

- высокое энергетическое разрешение, которое в 5 – 6 раз лучше, чем у сцинтилляционных детекторов, что позволяет более надежно определять пики полного поглощения в измеренных гамма-спектрах и упростить процедуру определения изотопного состава гамма-источников и их активности;

- возможность функционирования КГСМ при виброакустических воздействиях до 100 Дб с сохранением основных спектрометрических параметров данной аппаратуры.

- высокая линейность энергетической шкалы во всем рабочем энергетическом диапазоне, что исключает необходимость использования дополнительных электронных или математических методов для ее корректировки;

- высокая радиационная стойкость и отсутствие эффекта старения рабочего вещества в условиях космического пространства.

Для повышения чувствительности НА «Нуклид» можно изготовить в виде нескольких (5 – 6) независимых КГСМ и расположить их на внешних плоскостях КА, что обеспечит площадь чувствительной поверхности примерно до 1 м². Как показывают расчеты, в этом случае имеется возможность обнаруживать КА с ядерными установками на расстоянии до 100 км.

КА «Универсат-СОКРАТ»

В настоящее время в НИЯУ МИФИ ведутся работы по подготовке НА «Нуклид» для проекта «Универсат-СОКРАТ» [7], научное руководство которого осуществляет директором НИЯФ МГУ М. И. Панасюком. В рамках данного проекта планируется создание научного комплекса из четырех КА с различными орбитами. Схемы этих орбит показаны на рис. 5.

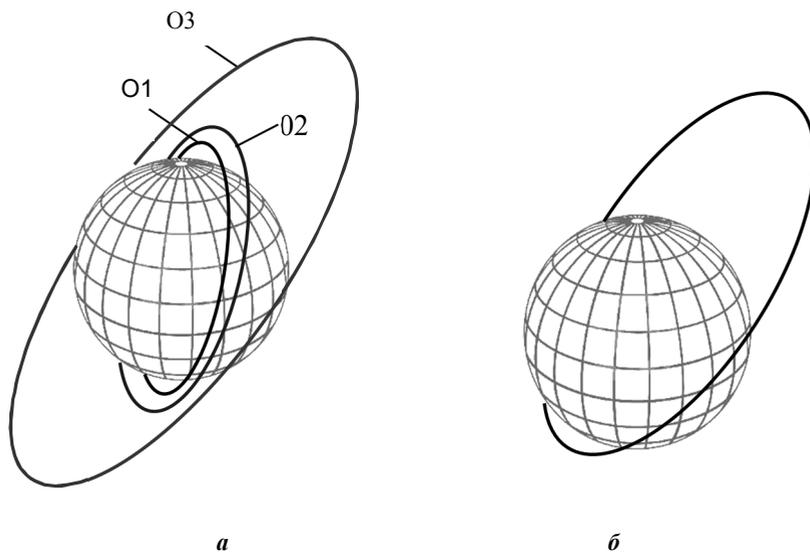


Рис. 5. Схема орбит КА «Универсат-СОКРАТ»

Для проведения мониторинга радиационной обстановки во всей области захваченной радиации предполагается запуск космических аппаратов на следующие орбиты: a – три круговые орбиты с высотами $\approx 650, 1700$ и 8000 км и наклонениями $80^\circ, 77^\circ$ и 60° соответственно; b – эллиптическая орбита с высотой перигея $hp = 700$ км, апогея $ha = 8000$ км, наклонением $i = 63,4^\circ$, аргументом перигея $\omega = 310^\circ$ и периодом ≈ 3 часа.

На начальном этапе проведения эксперимента «Универсат-СОКРАТ» НА «Нуклид» будет установлена на одном из четырех космических аппаратов с высотой круговой орбиты 600 км. Основные задачи этого эксперимента заключаются в проведении натурных испытаний для отработки систем, обеспечивающих функционирование НА «Нуклид», а также в получении данных о радиационной обстановке в ОКП, регистрации солнечных вспышек и обнаружении и идентификации РКМ.

Заключение

Для эффективного обнаружения и диагностики радиационно опасных КА или объектов РКМ целесообразно применять гамма-спектрометрическую аппаратуру, обладающую большой чувствительностью и высоким энергетическим разрешением. НА «Нуклид» обладает необходимыми характеристиками для радиационного мониторинга ОКП. На основе КГСМ можно сформировать большие чувствительные поверхности $1 - 2 \text{ м}^2$ для регистрации гамма-излучения в зависимости от возможностей КА-инспекторов. Это позволит эффективно обнаруживать и идентифицировать радиоактивные и делящиеся материалы на КА с ядерными установками на борту на расстояниях до 100 км. В перспективе НА «Нуклид» будет дополнена нейтронными детектирующими модулями для увеличения эффективности обнаружения ядерных энергетических установок на КА.

Для уточнения параметров орбит обнаруженных радиационно опасных объектов и повышения достоверности измерений целесообразно проводить радиационный мониторинг ОКП одновременно с помощью нескольких аналогичных космических аппаратов-инспекторов.

Работа выполнена в рамках Мегагранта Правительства Российской Федерации 2013, полученного НИЯУ МИФИ (договор от 24.06.2013 № 14.А12.31.0006).

Литература

1. Назаренко А. И. Моделирование космического мусора. – М. : ИКИ РАН, 2013. – 216 с. – (Серия Механика, управление и информатика). – ISBN 978-5-9903101-6-2.
2. Ядерный комплекс России / А. С. Королев // Новости космонавтики. – М., 2010. – Т. 20. – № 2(325). – С. 44 – 47.
3. Боярчук К. А., Анисеева М. А., Кузин С. В., Шестов С. В., Улин С. Е., Бахтигараев Н. С., Микеров В. И., Боголюбов Е. П. Проблемы радиоактивного загрязнения околоземного космического пространства // Вопросы электромеханики. – 2011. – Т. 121. – № 2.
4. Анисеева М. А., Боярчук К. А., Улин С. Е. Обнаружение радиоактивного космического мусора с борта космического аппарата // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012. – Т. 126. – №. 1. – С. 13 – 18.
5. Ulin S. E., Vlasik K. F., et al. The measuring complex for detection of radioactive waste in near-earth space. (2017) // J. Phys.: Conf. Ser. – Vol. 798 Art.

6. Novikov A. S., Ulin, S. E., Dmitrenko V. V. и др. New modification of xenon gamma-ray detector with high energy resolution // Optical engineering. – 2014. – Т. 53. – Вып. 2.
7. Панасюк М. И. и др. Мониторинг природных и техногенных космических угроз: результаты миссии «Ломоносов» и проект «Универсат-СОКРАТ» // Космические исследования. – 2018. – Т. 56. – № 5. – 012122.

ОБРАБОТКА ДАННЫХ СПУТНИКОВОГО ВЫСОТОМЕРА

Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур
(АО «Российский институт радионавигации и времени»,
г. Санкт-Петербург)

Аннотация. Обсуждаются процедуры дообработки данных спутникового высотомера на Земле. Для временных дискриминаторов, наделенных, по мнению ряда авторов, робастными свойствами относительно неоднородности отражающих характеристик засвечиваемого пятна, рассчитаны и сопоставлены с границами Крамера – Рао и результатами моделирования погрешности оценки запаздывания в эталонных условиях. Полученные с помощью машинного эксперимента характеристики точности многопараметрического дискриминатора, основанного на статистической подгонке параметров модели усредненного эхосигнала под наблюдения, сравниваются с потенциально достижимыми. Констатируется проигрыш в точности совместных МНК-оценок запаздывания и высоты волны теоретическому потенциалу, тогда как оценки по максимуму правдоподобия в этом смысле практически оптимальны.

Ключевые слова: спутниковый высотомер, профиль мощности, дообработка альтиметрических данных, дискриминатор, статистическая подгонка, оценка по максимуму правдоподобия, метод наименьших квадратов.

Введение. Спутниковый радиовысотомер является неотъемлемым компонентом космических миссий по дистанционному зондированию Земли. Современные высотомеры способны измерять высоту орбиты несущего космического аппарата (КА) с сантиметровой точностью. Результаты выполненных измерений в дальнейшем используются для уточнения формы геоида, изучения течений и вихрей в Мировом океане, определения степени взволнованности моря и характеристик приповерхностного ветра и т. п.

В [1] приведен обзор публикаций по архитектуре радиоинтерфейса спутникового высотомера и рассмотрены алгоритмы обработки принимаемого эхосигнала на борту КА. В предлагаемой статье обсуждаются некоторые ключевые процедуры обработки «на Земле» потока данных, сбрасываемых с борта КА по линии связи.

В современных миссиях спутникового зондирования Земли итоговое извлечение необходимой информации из альтиметрических данных состоит из нескольких этапов и возлагается на наземный комплекс. На стадии дообработки (*retracking*) предварительные оценки измеряемых параметров, переданные с борта космического аппарата, уточняются с использованием тех или иных процедур сглаживания, тогда как в задачи постобработки (*postprocessing*) входит учет разнообразных физических факторов, потенциально снижающих достоверность полученных результатов.

Ниже основное внимание уделено дообработке наблюдений спутникового высотомера.

Дообработка данных спутникового высотомера. Процедура дообработки может осуществляться по-разному. Как известно, космический аппарат (КА) сбрасывает по телеметрической линии усредненные за десятки или сотни зондирований реализации принятых эхосигналов (усредненные эхосигналы) [1 – 3]. Последовательность

таких усредненных эхосигналов (профилей, по терминологии [1], *waveforms*, в зарубежных текстах) и служит исходными наблюдениями при дообработке. Далее можно использовать стратегию максимума правдоподобия, подгоняя аналитическую модель отраженного сигнала под принятые наблюдения подбором вектора альтиметрических параметров из условия максимума условной вероятности наблюдений. Близкими по эффективности, но менее затратными оказываются процедуры подгонки модели на основе метода наименьших квадратов или фильтрации Калмана. Наконец, в целях упрощения дальнейшая дообработка может осуществляться индивидуально по каждой из последовательностей соответствующих оценок, вырабатываемых дискриминатором и извлеченных из каждого очередного профиля. Отметим, что в [1] синтезирован оптимальный дискриминатор запаздывания эхосигнала высотомера и предложен ряд упрощенных структур, приемлемых с точки зрения потерь в точности относительно потенциальной. В литературе имеется ряд предложений по построению так называемых робастных дискриминаторов, обладающих пониженной чувствительностью к отклонениям реальной формы эхосигнала от принятой базовой модели [1, 4, 5]. Главным стимулом интереса к подобным структурам явилось стремление улучшить работоспособность спутниковых альтиметров в прибрежных районах, где попадание участков суши в освещаемое антенной высотомера пятно существенно искажает наблюдаемый эхосигнал по сравнению с откликом «чистой» водной поверхности [3, 6, 7]. Исследуем характеристики точности оценок запаздывания эхосигнала для дискриминаторов, чаще всего относимых в литературе к категории робастных.

Дискриминатор центра тяжести. Дискриминатор этого типа фиксирует положение центра тяжести усредненного за N периодов излучения профиля эхосигнала на выходе фильтра, согласованного с зондирующим импульсом. Подробно идея использования описываемого дискриминатора (англ. *OCOG, Offset Centre of Gravity*) для дообработки данных спутникового высотомера описана в [6].

Тот факт, что данный дискриминатор не опирается на какую-либо физическую модель эхо-сигнала, может способствовать устойчивости его поведения при значительных вариациях свойств отражающей поверхности, например, выраженной неоднородности удельной площади рассеяния в освещаемом пятне вследствие охвата им одновременно как водной поверхности, так и участков суши, ледовых покровов и т. п. С другой стороны, дообработка такого рода приемлема и в стандартных океанических условиях [3]. Для верификации подобной возможности было предпринято моделирование для следующих условий: высота орбиты КА $h = 1000$ км, отношение сигнал/шум для каждого наблюдаемого профиля $q = 10$ дБ, ширина луча антенны по уровню половинной мощности $\theta_0 = 0,6$, отклонение луча от вертикали $\zeta = 0$. Усреднение проводилось по $N = 100$ зондированиям. Рассчитанные по $N_i = 100$ тестам смещения оценок оказались слабо зависящими от высоты волны и лежащими в пределах 1,2 нс при $W = 300$ МГц и 0,7 нс при $W = 500$ МГц. Соответствующие цифры для среднеквадратических отклонений оценок запаздывания также слабо зависят от волнения и близки к 1,5 нс ($W = 300$ МГц) и 0,85 нс ($W = 500$ МГц).

Интересно сопоставить шумовую среднеквадратическую ошибку σ_τ оценки запаздывания эхосигнала для рассматриваемого алгоритма с потенциально достижимой $\sigma_{\tau,opt}$. Для принятой за основу физической модели эхосигнала последнюю можно найти как $\sigma_{\tau,opt} \approx 1/\sqrt{\Phi_{\tau\tau}}$, где $\Phi_{\tau\tau}$ – информация Фишера, рассчитанная в [1]. Получаемые таким образом теоретические кривые зависимости потенциальной

шумовой погрешности от отношения сигнал/шум для четырех значимых высот волны, полосы сигнала $W = 300$ МГц и принятых ранее значений прочих величин показаны сплошными линиями на рис. 1. Здесь же нанесены маркеры, соответствующие результатам моделирования. Как и следовало ожидать, алгоритм ОСОГ, не связанный с физическим механизмом формирования эхосигнала, по точности существенно уступает оптимальному, точно согласованному с моделью. Тем не менее, абсолютные значения шумовой погрешности рассматриваемого алгоритма с большой вероятностью вполне приемлемы как для последующего сглаживания оценок, так и для инициализации более тонких алгоритмов дискриминирования, опирающихся на физические модели.

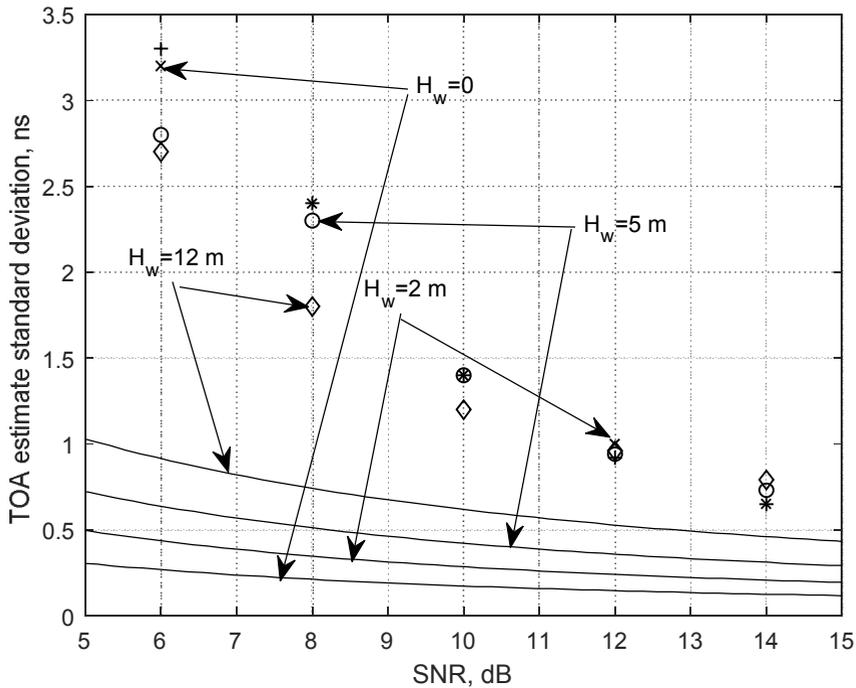


Рис. 1. Сравнение среднеквадратической погрешности оценки запаздывания для алгоритма ОСОГ

Как видно из рис. 1, рассмотренный дискриминатор запаздывания практически нечувствителен к высоте волны. Происходит так потому, что волнение проявляет себя главным образом в снижении крутизны нарастания эхосигнала, тогда как алгоритм ОСОГ напрямую не связан с характерными точками переднего фронта последнего. Уместно также подчеркнуть, что относительная вычислительная простота дискриминатора ОСОГ допускает использование его не только «на Земле», но и в бортовом оборудовании КА [3, 6].

Параллельно с результатами моделирования в ходе исследований были получены аналитические выражения для точностных параметров дискриминатора ОСОГ, детали которых здесь приходится опустить в силу ограниченного объема статьи. На рис. 2 сплошные кривые соответствуют среднеквадратической ошибке алгоритма ОСОГ, рассчитанной согласно упомянутым теоретическим выкладкам для двух зна-

чений значимой высоты волны H_w . Здесь же маркерами нанесены экспериментальные точки, полученные моделированием. Значения высоты орбиты КА, полосы сигнала и параметров антенны при этом полагались теми же, что и для рис. 1. Приведенные графики демонстрируют практическую независимость шумовой ошибки алгоритма от высоты волны. В то же время удаление результатов компьютерного эксперимента от теоретических кривых в левой части графика обусловлено снижением точности использованных приближений в области умеренно небольших отношений сигнал/шум.

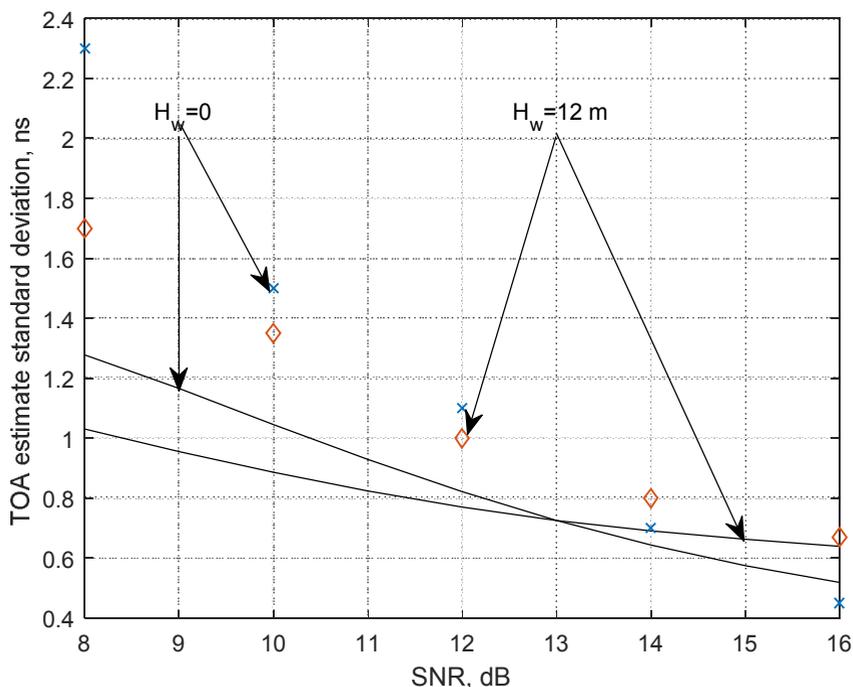


Рис. 2. Зависимости среднеквадратической ошибки дискриминатора ОСОГ от отношения сигнал/шум для двух значений H_w

Пороговый дискриминатор. Дискриминатор, фиксирующий передний фронт усредненного эхосигнала по пересечению порога, рассматривался, помимо других публикаций, в [1]. В настоящей статье речь пойдет о его варианте, наделенном по оценкам [2, 8, 9] определенными признаками робастности и основанном на замене реально наблюдаемого усредненного профиля прямоугольником.

Теоретический анализ точности порогового дискриминатора, предпринятый в [1], в ходе подготовки статьи был дополнен более скрупулезным учетом последствий линейной интерполяции нелинейных кривых и особенностей адаптации порога. В качестве примера полученных результатов на рис. 3 приведена расчетная зависимость от отношения сигнал/шум среднеквадратической погрешности оценки запаздывания эхосигнала для высоты волны $H_w = 12$ м при прежних прочих исходных данных ($h = 100$ км, $W = 300$ МГц, $\theta_0 = 0,6$, $\zeta = 0$). На графике также нанесены маркерные точки, соответствующие результатам моделирования, и граница Крамера – Рао (пунктирная линия), отражающая зависимость потенциальной шумовой погреш-

ности от отношения сигнал/шум. Обращает на себя внимание уже отмеченная выше слабая зависимость погрешности от отношения сигнал/шум q . Природа этого явления заключается в том, что возрастание средней мощности флюктуирующего эхо-сигнала увеличивает в той же пропорции и дисперсию его замираний, так что выигрыш имеет место только в отношении интенсивностей сигнала и аддитивного шума, тогда как усредненная и случайная компоненты самого сигнала остаются в неизменном соотношении.

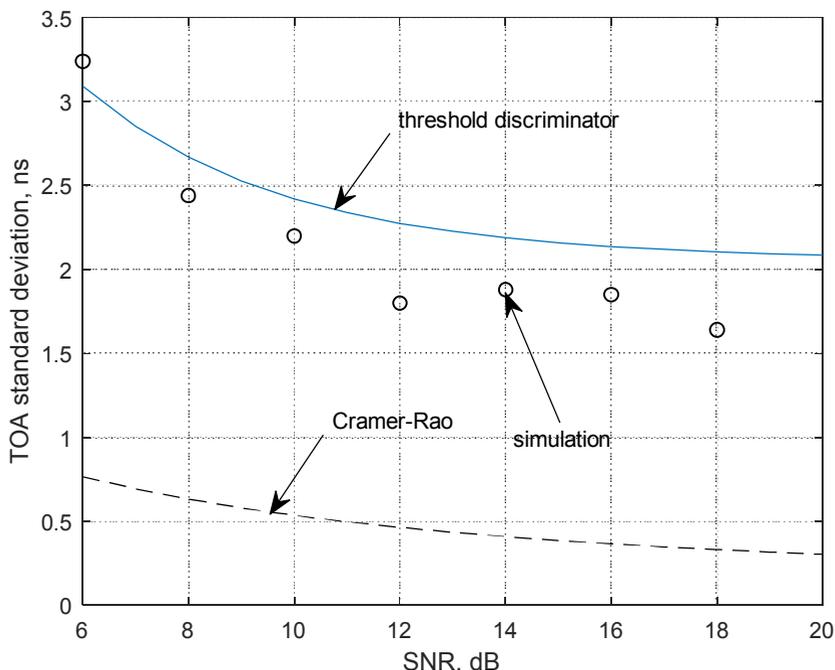


Рис. 3. Зависимости среднеквадратической ошибки порогового дискриминатора от отношения сигнал/шум для высоты волны 12 м

В целом, как показывает сравнение рис. 2 и 3, при принятии за основу классической модели эхосигнала и слабом волнении пороговый дискриминатор заметно эффективнее дискриминатора ОСОГ, однако с ростом высоты волны ситуация может меняться на противоположную. Объяснение этому уже было дано: по мере нарастания взволнованности акватории уменьшается крутизна переднего фронта усредненного профиля мощности, к чему дискриминатор центра тяжести практически нечувствителен, тогда как качество порогового дискриминирования при этом снижается. В то же время даже при слабом волнении в многообразии сценариев, типичных для прибрежных, шельфовых, сухопутных и пр. областей, дискриминатор ОСОГ вполне может оказаться конкурентоспособным по показателям робастности [3, 6 – 8].

Дискриминирование на базе физической модели эхосигнала. Обратимся теперь к процедуре дискриминирования, основанной на статистической подгонке априори выбранной кривой, детерминированно задаваемой некоторым множеством параметров, под принимаемый зашумленный эхосигнал. В рамках такой задачи параметры детерминированной функции времени подбираются с целью достижения ее

максимального сходства с последовательностью наблюдаемых отсчетов. Понятно, что увязка модельной кривой с известным механизмом формирования отклика исследуемой поверхности на зондирующий сигнал существенно повысила бы степень доверия к результатам подгонки.

В той или иной мере все применяемые физические модели эхосигнала опираются на допущение о том, что он представляет собой суперпозицию откликов независимых элементарных зеркальных отражателей в пределах засвечиваемого антенной пятна. Одной из исторически первых и наиболее часто используемых является модель Брауна [2 – 5 и др.]:

$$P_m(t) = A_1 \begin{cases} \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi\right) \Phi\left(\frac{t}{\sigma_c}\right), & t < 0, \\ \exp\left(-\frac{4}{\gamma} \sin^2 \xi - \frac{4ct}{\gamma h} \cos 2\xi\right) I_0\left(\frac{4}{\gamma} \sqrt{\frac{ct}{h}} \sin 2\xi\right) \Phi\left(\frac{t}{\sigma_c}\right), & t \geq 0, \end{cases} \quad (1)$$

где A_1 – масштабный коэффициент, не влияющий на форму усредненного эхосигнала; $\gamma = \theta_0^2 / 2 \ln 2$ – показатель остроты луча диаграммы направленности антенны в гауссовском приближении; θ_0 – ширина луча антенны по уровню половинной мощности, ξ – угловое отклонение (*mispointing*) луча антенны от направления в надири; $\sigma_c = \sqrt{\sigma_p^2 + (2\sigma_z / c)^2}$, $\sigma_p \approx 0,425\Delta_0$, Δ_0 – длительность гауссовского эквивалента сжатого зондирующего импульса по уровню половинной мощности; σ_z – среднеквадратическое возвышение за счет волнения водной поверхности; h – высота орбиты КА; c – скорость света; $I_0(\cdot)$ – модифицированная функция Бесселя нулевого порядка, а время t отсчитывается от момента $2h/c$.

Практические действия с модельной кривой состоят в ее подгонке под каждую реализацию усредненного за N зондирований профиля мощности.

При получении результата (1) в [4] использовалось приближение операции свертки, корректность которого неочевидна. Кроме того, не вполне удобно сшивание двух временных отрезков кривой (1). Поэтому в [1, 11] был предложен альтернативный вариант модели, справедливый для антенны высотомера с узким лучом ($\theta_0 < 1^\circ$) и малых отклонений луча от вертикали ($\xi < \theta_0 / 6$). Полученная при этом модель в отсутствие волнения ($\sigma_z = 0$) имеет вид

$$P_{m0}(t) = A_2 \Phi\left[2\sqrt{\beta}\left(t - \frac{\alpha\eta}{4\beta}\right)\right] \exp\left[-\alpha\eta\left(t - \frac{\alpha\eta}{8\beta}\right)\right], \quad (2)$$

где нулевой индекс у $P_{m0}(t)$ отражает факт отсутствия волнения; A_2 – масштабный коэффициент; $\beta = (2 \ln 2) / \Delta_0^2$ – показатель скорости убывания зондирующего колокольного импульса $\alpha = 4c / \gamma h$, $\eta = 1 - 4\xi^2 / \gamma$. Отметим, что множитель $\exp(-4\xi^2 / \gamma)$ в (2) отброшен, так как в актуальной области переменных он практически не отличается от единицы (при $\xi < 0,2^\circ$, $\theta_0 = 0,6^\circ$ $1 - \exp(-4\xi^2 / \gamma) < 10^{-8}$).

Как было установлено, при $\xi > \theta_0 / 6$ кривые (1) и (2) заметно расходятся в зоне спадающего фронта. Некоторое расширение зоны действенности модели по отклонению от вертикали достигается приближением второго порядка для функции Бесселя [12] в ходе вывода этого равенства, что модифицирует (2) как

$$P_{m0}(t) = A_2 \left\{ 2\Phi \left[2\sqrt{\beta} (t - \alpha\eta_1 / 4\beta) \right] \exp \left[-\alpha\eta_1 (t - \alpha\eta_1 / 8\beta) \right] - \right. \\ \left. - \Phi \left[2\sqrt{\beta} (t - \alpha / 4\beta) \right] \exp \left\{ -\alpha \left[(t - \alpha / 8\beta) \right] \right\} \right\}, \quad (3)$$

где $\eta_1 = 1 - 2\xi^2 / \gamma$.

Переход от (2) – (3) к соотношениям, учитывающим волнение водной поверхности, осуществляется по стандартной методике свертки $P_{m0}(t)$ с плотностью вероятности $W_z(z)$ возвышения волны z относительно среднего уровня [2, 4, 5]. Возвышение z приводит к изменению запаздывания отраженного сигнала на величину $2z/c$, означая, что при отсчете времени от прежнего момента $2z/c$ принятая средняя мощность в момент t окажется равной $P_{m0}(t - 2z/c)$. Усреднение этой величины по z с учетом статистики возвышений даст результат

$$P_m(t) = \int_{-\infty}^{\infty} W_z(z) P_{m0}(t - 2z/c) dz, \quad (4)$$

являющийся искомым средним профилем мощности, учитывающим случайный характер возвышения элементарного отражателя над спокойной поверхностью. После замены переменных $2z/c = u$ (4) примет вид интеграла свертки

$$P_m(t) = \frac{c}{2} \int_{-\infty}^{\infty} W_z \left(\frac{cu}{2} \right) P_{m0}(t - u) du. \quad (5)$$

Простейшим из принятых в литературе приближений плотности вероятности $W_z(z)$ является гауссовское. При этом, как показано в [1], для колокольного зондирующего импульса операции в (4), (5) эквивалентны его растяжению по времени, так что вычисление среднего профиля мощности сведется к подстановке в (2) – (3) вместо β измененной величины

$$\beta_1 = \frac{\beta}{1 + 16\beta \left(\frac{\sigma_z}{c} \right)^2}. \quad (6)$$

При волнении водной поверхности между моделями Брауна (1) и (2) – (3) (при подстановке в последние (6)) обнаруживается расхождение, возрастающее по мере роста σ_z . Наблюдаемый сдвиг эпюры модели Брауна влево приведет к смещению оценки запаздывания, подлежащему компенсации при калибровке. Причина отмеченного факта, вероятно, кроется в довольно грубом приближении, использованном в

[4] при вычислении свертки (5) и предполагающем ширину плотности вероятности $W_z(z)$ малой по сравнению с интервалом существенных вариаций второго операнда в (4). Если расчеты для модели Брауна произвести путем усреднения согласно (5), куда в роли $P_{m0}(t)$ подставить зависимость (1) при $\sigma_z = 0$, то кривые для модели Брауна полностью совпадают с таковыми для модели (2) – (3) с учетом модификации (6) параметра β .

Алгоритмы подгонки параметров модели под наблюдения. Рассмотрим практические механизмы статистической подгонки модельной кривой под отсчеты усредненного по N зондированиям эхосигнала, наблюдаемые в следящем окне. Асимптотически (при большом превышении сигнала над шумом) оптимальной стратегией подгонки является метод максимума правдоподобия (МП). В [1, 13, 14] показано, что в рамках допущения независимости сигнальных отсчетов достаточная статистика для оценивания альтиметрических параметров имеет вид:

$$Z(\Lambda) = \frac{1}{2\sigma_n^2} \sum_{k=1}^N \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \frac{q\varphi(i\delta; \Lambda) y_k^2(i\delta)}{1 + q\varphi(i\delta; \Lambda)} - N \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \ln[1 + q\varphi(i\delta; \Lambda)] \quad (7)$$

где σ_n^2 – мощность аддитивного шума; q – отношение сигнал/шум по мощности; $\varphi(t; \Lambda)$ – нормированная к максимальному значению модельная кривая, задаваемая вектором измеряемых параметров Λ , $y_k(t)$ – огибающая наблюдаемой смеси эхосигнала с шумом на k -м зондировании ($k = 1, 2, \dots, N$), а δ – интервал дискретизации, n_c – число отсчетов в пределах следящего окна. Таким образом, МП-оценка предполагает подстановку в (7) наблюдаемых отсчетов и максимизацию полученной функции по Λ и q .

Заметим, что $u_i(\Lambda) = 1 + q\varphi(i\delta, \Lambda)$ есть не что иное, как i -й отсчет предвычисленной усредненной кривой мощности зашумленного эхосигнала в зависимости от параметра Λ после нормировки к среднему значению протектированного шума $P_n = 2\sigma_n^2$. Введем аналогичную нормировку для накопленных за N зондирований наблюдений:

$$\hat{u}_i = \frac{1}{2N\sigma_n^2} \sum_{k=1}^N y_k^2(i\delta), \quad i = -n_c/2 + 1, -n_c/2 + 2, \dots, n_c/2. \quad (8)$$

Добавив и вычтя единицу в числителе в первой сумме (7), после отбрасывания слагаемого, не зависящего от измеряемых параметров, приходим к достаточной статистике, повторяющей приведенную в [15, 16], если из последней удалить члены, не участвующие в максимизации по Λ :

$$Z(\Lambda) = -N \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \left[\frac{\hat{u}_i}{u_i(\Lambda)} + \ln u_i(\Lambda) \right]. \quad (9)$$

Полезное приближение достаточной статистики можно получить, прибегнув к гауссовской аппроксимации переменных (8), оправданной при $N \gg 1$. После несложных преобразований можно получить выражение вида

$$\chi^2(\Lambda) \approx \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \left[\frac{\hat{u}_i - u_i(\Lambda)}{u_i(\Lambda)} \right]^2 = \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \left[\frac{\hat{u}_i}{u_i(\Lambda)} - 1 \right]^2. \quad (10)$$

Как видно, процедура оценивания альтиметрических параметров может быть сведена к применению взвешенного МНК [3, 15, 16]. Веса $w_i = 1/u_i(\Lambda)$, участвующие в формировании метрики (19), выравнивают наблюдаемые отсчеты по уровню флюктуаций экосигнала. Хотя в рамках допущения $N \gg 1$ статистика (10) достаточна для получения МП-оценки, во многих публикациях предпочтение отдается невзвешенному МНК, предполагающему минимизацию по Λ квадрата евклидова расстояния

$$\chi^2(\Lambda) \approx \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} [\hat{u}_i - u_i(\Lambda)]^2. \quad (11)$$

Моделирование процедур подгонки. В рамках проведенного исследования было установлено, что подгонка на основе прямого перебора в режиме камеральной дообработки может оказаться вполне осуществимой в плане потребного вычислительного ресурса. Помимо этого, ее неоспоримым достоинством является отсутствие рисков перепутывания глобального экстремума целевой функции с побочными и расходящими итераций. В настоящем разделе моделированию дискриминаторов с переборной подгонкой отданы приоритетные позиции с целью демонстрации как высокой точности соответствующих процедур, так и их умеренной ресурсной затратности.

С точки зрения последнего фактора, предпочтительным представляется невзвешенный алгоритм МНК (11). Моделирование выполнялось применительно к сценарию, когда оценке подлежат лишь два параметра: время запаздывания τ экосигнала (эквивалентно – высота КА над зондируемой поверхностью) и значимая высота волны H_w . В оправдание подобной суженной постановки можно напомнить, что оценка интенсивности сигнала часто выполняется с помощью отдельного контура авторегулировки усиления, а уровень шума можно оценить по участкам временной оси, заведомо свободным от экосигнала.

Для сопоставления точности МНК-оценок с потенциальной были рассчитаны границы Крамера – Рао, конкретизированные применительно к рассматриваемому двухпараметрическому случаю:

$$\sigma_\tau \geq \sqrt{\frac{\Phi_{HH}}{\Phi_{\tau\tau}\Phi_{HH} - \Phi_{\tau H}^2}}, \quad \sigma_H \geq \sqrt{\frac{\Phi_{\tau\tau}}{\Phi_{\tau\tau}\Phi_{HH} - \Phi_{\tau H}^2}}, \quad (12)$$

где

$$\Phi_{\tau\tau} = Nq^2 \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \left[\frac{\left. \frac{\partial\varphi(i\delta, \tau, H_{w0})}{\partial\tau} \right|_{\tau=\tau_0}}{1 + q\varphi(i\delta, \tau_0, H_{w0})} \right]^2,$$

$$\Phi_{HH} = Nq^2 \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \left[\frac{\left. \frac{\partial\varphi(i\delta, \tau_0, H_w)}{\partial H_w} \right|_{H_w=H_{w0}}}{1 + q\varphi(i\delta, \tau_0, H_{w0})} \right]^2,$$

$$\Phi_{\tau H} = \Phi_{H\tau} = Nq^2 \sum_{i=-n_c/2+1}^{n_c/2} \left[\frac{\left. \frac{\partial\varphi(i\delta, \tau, H_{w0})}{\partial\tau} \right|_{\tau=\tau_0} \left. \frac{\partial\varphi(i\delta, \tau_0, H_w)}{\partial H_w} \right|_{H_w=H_{w0}}}{1 + q\varphi(i\delta, \tau_0, H_{w0})} \right]^2,$$

а τ_0 и H_{w0} – истинное запаздывание экосигнала и значимая высота волны.

Для оптимальных оценок имеет место асимптотическая (при $q \gg 1$ или стремящемся к бесконечности объеме наблюдений) сходимость левых частей (12) к правым, устанавливающим тем самым потенциально достижимые точности измерений τ и H_w . Обратимся к таблице, позволяющей наглядно сопоставить точностные показатели оценок МНК с потенциальными при прежних исходных данных ($h = 100$ км, $W = 300$ МГц, $\theta_0 = 0,6$, $\zeta = 0$, $q = 10$ дБ) км,

Таблица

Сравнение результатов моделирования с потенциально достижимыми

H_{w0} , м	2	4	8	12	14	16	18	20
σ_{τ} , нс потенциал	0,305	0,462	0,556	0,635	0,640	0,675	0,705	0,714
σ_{τ} , нс (МНК)	0,396	0,489	0,608	0,757	0,820	0,896	0,919	0,951
σ_{τ} , нс (ОМП)	0,318	0,420	0,524	0,612	0,634	0,665	0,674	0,692
σ_H , см потенциал	15,5	24,0	25,7	28,5	27,6	29,0	30,3	30,0
σ_H , см (МНК)	30,5	35,3	38,8	41,9	42,7	43,8	43,9	43,8
σ_H , см (ОМП)	18,4	20,0	26,1	26,7	28,2	28,2	29,4	29,6

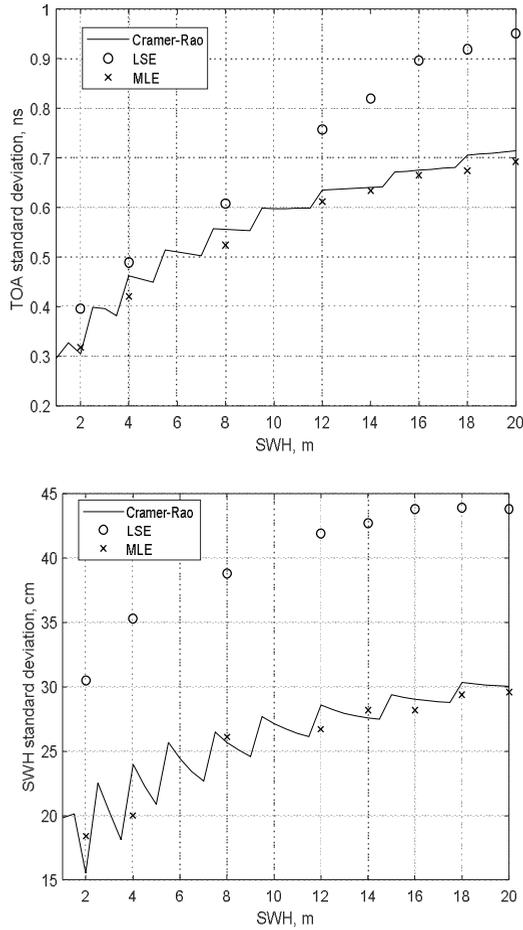


Рис. 4. Среднеквадратические погрешности оценки запаздывания (а) и высоты волны (б) в зависимости от значимой высоты волны

Потенциальные значения среднеквадратических ошибок, рассчитанные как правые части (12) для значений H_{w0} из первой строки, приведены во второй и пятой строках. Экспериментальные среднеквадратические отклонения МНК-оценок содержатся в третьей и шестой строках. Как можно видеть, проигрыш МНК-оценок запаздывания потенциалу, выраженный через отношение соответствующих среднеквадратических погрешностей, доходит до 33 %, тогда как аналогичная цифра для высоты волны составляет 45 – 97 %. Заметно лучше в этом плане оценки по максимуму правдоподобия (ОМП), формируемые согласно алгоритму (9). Соответствующие значения среднеквадратической ошибки измерения запаздывания, содержащиеся в четвертой строке таблицы, отличаются от потенциальных на единицы процентов, т.е. в пределах статистической погрешности, что неудивительно в свете асимптотической эффективности ОМП [17 – 19]. Расхождение ОМП с потенциалом для высоты волны несколько больше (до 20 %), однако и оно критическим ни в коей мере не является. Дополнительную иллюстрацию к сказанному дает рисунок 4, на котором в функции от истинного значения H_w показаны сплошными линиями зависимости потенциаль-

ных точностей измерения запаздывания (a) и высоты волны (b) вместе с маркерными точками, отображающими результаты моделирования для МНК и ОМП. В отношении потребляемого вычислительного ресурса переборные оценки по максимуму правдоподобия и МНК практически равноценны.

Заключение. Как показал проведенный анализ, дискриминаторы центра тяжести и пороговый, относимые рядом авторов к числу робастных из-за сниженной чувствительности к неоднородности отражающих характеристик освещаемого пятна, ощутимо уступают по точности дискриминатору, оптимальному в условиях зондирования эталонной водной поверхности. С другой стороны, дискриминирование путем подгонки параметров физической модели по максимуму правдоподобия позволяет выйти на уровень потенциальной точности совместных оценок запаздывания эхосигнала и значимой высоты волны при приемлемых для дообработки ресурсных затратах. В этом свете подгонка с помощью невзвешенного МНК менее привлекательна, обладая худшими точностными характеристиками при сопоставимой реализационной сложности.

Литература

1. Боровицкий Д. С., Жестерев А. Е., Ипатов В. П., Мамчур Р. М. Вопросы построения радиоинтерфейса спутникового высотомера // Под ред. В. П. Ипатова. – БХВ-Петербург, 2017.
2. Chelton D. B., Ries J. C., Haines B. J. et al. Satellite altimetry. In *Satellite altimetry and Earth science: a handbook of techniques and applications* / Ed. by L.-L. Fu and Cazenave, Academic Press. – 2001. – P. 1 – 132.
3. *Coastal altimetry* / Ed. by S. Vindinelly, A. Kostianoy, P. Cipollini, et al. Springer, 2011.
4. Brown G. S. The average impulse response of a rough surface and its applications // *IEEE Trans Antennas and Propagation*. – 1977. – Vol. 25. – № 1. – P. 67 – 74.
5. Hayne G. S. Radar altimeter mean return waveforms from near-normal-incidence ocean surface scattering // *IEEE Trans. on Antennas and Propagation*. – 1980. – Vol 28. – № 5. – P. 687 – 692.
6. Wingham D. J., Rapley C. G., Griffiths H. New techniques in satellite tracking system // In *Proceedings of IGARSS' 86 symposium, Zurich, 1986* – P. 1339 – 344.
7. Coastal gravity anomalies from retracked Geosat/GM altimetry: improvement, limitation and the role of airborne gravity data/ Hwang C., Guo J. Y., Deng X. L. et al. // *PJ Geod* 80. – 2006. – P. 204 – 216.
8. Davis C.H. Growth of the Greenland ice sheet: a performance assessment of altimeter retracking algorithms. *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*. – 1995. – Vol. 33. – № 5. P. 1108 – 1116.
9. Davis C. H. A robust threshold retracking algorithm for measuring ice-sheet surface elevation change from satellite radar altimeter // *IEEE Trans Geoscience Remote Sensing*. – 1997. – Vol. 35. – № 4. – С. 974 – 979.
10. Bao L., Lu Y., Wang Y. Improved retracking algorithm for oceanic altimeter waveforms. *Prog Nat Sci*. doi:10.1016/j.pnsc. – 2008.06.017.
11. Аналитическая модель эхосигнала спутникового высотомера / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // *Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника*. – 2017. – Вып. 3. – С. 39 – 45.
12. Amarouche et al. Improving the Jason-1 ground retracking to better account for attitude effects // *Marine Geodesy*. – 2004. – Vol. 27. – С. 171 – 197.

13. Потенциальная точность измерения запаздывания отраженного сигнала космическим альтиметром / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – Вып. 2. – С. 5 – 11.
14. Потенциальная точность совместной оценки параметров радиовысотометром космического базирования / Д. С. Боровицкий, А. Е. Жестерев, В. П. Ипатов, Р. М. Мамчур // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. – 2017. – Вып. 4. – С. 33 – 41.
15. Tokmakian R. T., Challenor P. G., Guymier H., Srokosz M. A. The U.K. EODC ERS-1 altimeter oceans processing scheme // Journal of Remote Sensing. – 1994. – Vol. 15. – P. 939 – 962.
16. Challenor P. G., Srokosz M. A. The extraction of geophysical parameters from radar altimeter return from a non-linear sea surface // Mathematics in remote sensing. – Oxford: Clarendon Press, 1989. – P. 257 – 268.
17. Левин Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники. – М. : Радио и связь, 1989.
18. Тихонов В. И. Статистическая радиотехника. – М. : Радио и связь, 1982.
19. Радиотехнические системы: Учебник для вузов / Ю. П. Гришин, В. П. Ипатов, Ю. М. Казаринов и др.; Под ред. Ю. М. Казаринова. – М. : Высшая школа.– 1990.

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ СБОРА, ХРАНЕНИЯ И ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ В АСПЕКТЕ ПРИМЕНЕНИЯ 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.** МЧС России активно применяет результаты космической деятельности для осуществления мероприятий по защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций. Для эффективного использования результатов космической деятельности в МЧС России создана Система космического мониторинга чрезвычайных ситуаций (СКМ ЧС). СКМ ЧС применяет большое количество источников информации. В последнее время наблюдается устойчивая тенденция роста объема получаемой информации. Также существует необходимость хранения уже имеющейся информации и обеспечение оперативного доступа к ней для отображения и обработки. Существует проблема в организации эффективной системы сбора, обработки и хранения информации, которая позволяет значительно снизить время на «накладные» расходы, связанные с техническими возможностями аппаратных средств (время чтения и скорости жестких дисков, скорость передачи по компьютерной сети и т. п.). В статье кратко описан анализ применения информационных систем СКМ ЧС, а также предлагается подход по организации функционирования информационных систем СКМ ЧС, основанный на применении распределенного хранения и многопоточной обработки информации (с использованием парадигмы MapReduce). Реализация данного подхода позволит повысить оперативность доступа к данным, а также эффективность организации хранения и обработки данных (в первую очередь – снизить экономические затраты на организацию хранилищ данных, а также времени обработки данных).*

***Ключевые слова:** MapReduce, система космического мониторинга МЧС России, геоинформационная система, ГИС, обработка изображений, мониторинг чрезвычайных ситуаций, хранение данных, передача данных, МЧС России, НЦУКС.*

Введение

Для обеспечения решения задач по прогнозированию и ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС) в МЧС России с 1997 г. функционирует Система космического мониторинга ЧС (СКМ ЧС). СКМ ЧС позволяет осуществлять ежесуточный оперативный космический мониторинг всей территории Российской Федерации, а также приграничных территорий. Вся получаемая информация аккумулируется в базах

данных и информационных системах. Опыт использования СКМ ЧС в деятельности МЧС России показывает ее эффективность при проведении мероприятий, направленных на снижение рисков и смягчения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера [1].

СКМ ЧС использует следующие источники получения результатов космической деятельности (РКД):

- информация, получаемая центрами приема и обработки СКМ ЧС;
- информация, получаемая с отечественных космических аппаратов дистанционного зондирования Земли;
- информация, получаемая в рамках активации Международной Хартии по космосу и крупным катастрофам;
- РКД из открытых источников информации;
- информация с Международной космической станции по программе Ураган;
- РКД, получаемые на возмездной основе.

Вся получаемая информация хранится в базах данных, основным источником отображения имеющейся информации являются геопорталы. Геопорталы позволяют пользователям оперативно получать необходимую информацию сразу после ее загрузки в базы данных. В последнее время наблюдается значительный рост получаемых данных. Также для реализации мероприятий по прогнозированию и оценки ЧС необходимо проводить оперативную обработку и анализ получаемых и имеющихся данных [2, 3].

Существующая проблема не позволяет применять РКД в полной мере для реализации мероприятий по защите населения и территорий от ЧС. Для решения данной проблемы предлагается применение распределенных файловых систем (РФС) и реализация парадигмы MapReduce (ПМР) для обработки данных. Применение РФС и ПМР в СКМ ЧС позволит реализовать процессы эффективного хранения данных (с обеспечением гарантированной сохранности данных), многопоточной обработки данных для последующего отображения результатов пользователям.

Общее описание

Для обеспечения эффективного применения РКД в СКМ ЧС предлагается следующее:

- для сбора данных применять автоматизированные системы.
- для хранения получаемых данных применять РФС, функционирующая поверх основной файловой системы операционной системы. При этом РФС будет обеспечивать гарантированное хранение данных без применения избыточных массивов независимых дисков.
- для повышения оперативности обработки данных применять многопоточную обработку в соответствии с ПМР.

Интеграция автоматизированного сбора данных с РФС и многопоточной автоматизированной обработкой данных позволит значительно повысить эффективность применения СКМ ЧС в МЧС России. Общая схема реализации процессов сбора, хранения и обработки представлена на рис. 1.

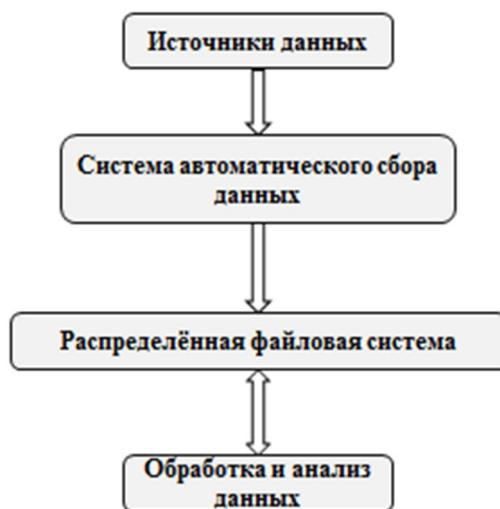


Рис. 1. Общая схема реализации процессов сбора, хранения и обработки данных

Реализация данной схемы позволит увеличить оперативность получения и передачи результатов обработки и анализа получаемых данных пользователям СКМ ЧС. Оперативность получения актуальной и достоверной информации при прогнозировании ЧС, а также при оценке динамики развития ЧС и складывающейся обстановки позволяет снизить риск гибели людей и нанесения материального ущерба имуществу граждан и объектам инфраструктуры. Ниже дано описание РФС и многопоточной обработки и анализа данных с использованием ПМР.

Распределенная файловая система

В настоящее время для хранения данных применяются сервера с расширенным объемом дискового пространства либо специализированные системы хранения данных. В данных аппаратных средствах для обеспечения гарантированного хранения данных применяются избыточные массивы независимых дисков, функционирующие с использованием специализированных аппаратных средств (контроллеров). Использование такого подхода требует значительных финансовых затрат как на их приобретение, так и на обеспечение их функционирования [4, 5].

В данной статье предлагается использовать распределенную файловую систему, которая будет функционировать поверх основной файловой системы операционной системы (в настоящее время реализовано для Linux). Процесс обеспечения сохранности данных от сбоев аппаратных средств будет обеспечено самой РФС. Ниже кратко представлен алгоритм работы РФС.

Для обеспечения функционирования РФС требуется создать узлы хранения данных (УХД). Каждый УХД может быть представлен сервером либо персональным компьютером. РФС состоит из управляющего узла (УЗ), желательно предусмотреть 2 УЗ. УЗ отвечает за распределение поступающих на запись в РФС данных по УХД, а также учета данных в УХД. Вся поступающая информация разбивается на одинаковые по размеру блоки (за исключением последнего) и записывается на УХД в соответствии с выбранным коэффициентом репликации (по умолчанию – 3). УЗ хранит

информацию о каждом блоке – на каких УХД он записан и о коэффициенте репликации. При этом Уз контролирует функционирование УХД. При выходе из строя жесткого диска УХД или самого УХД Уз перезаписывает хранящиеся блоки по другим УХД.

Процесс чтения из РФС представлен следующим образом: запрос на чтение поступает Уз, после этого Уз формирует ответ, содержащий список УХД, хранящих необходимые блоки и находящихся ближе к источнику запроса. В соответствии с ответом Уз пользователь получает запрашиваемые данные.

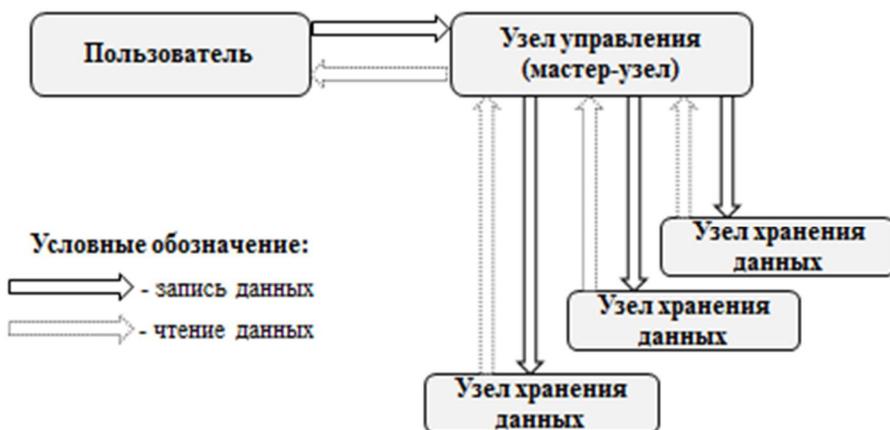


Рис. 2. Общая схема функционирования РФС

Использование РФС позволяет:

- обеспечить гарантированное хранение данных без использования дорогостоящей аппаратной инфраструктуры;
- повысить скорость чтения и записи данных;
- обеспечивает возможность реализации многопоточной обработки данных с использованием ПМР.

Многопоточная распределенная обработка данных

Развитие компонентов серверного оборудования и персональных компьютеров позволяет выполнять многопоточную обработку данных. Подобная обработка выполняется в большинстве случаев с использованием возможностей современных центральных процессоров, реже – с использованием видеокарт. Эффективность многопоточной обработки данных очевидна, однако эффективная ее реализация зависит от следующих факторов:

- квалификации программиста, реализующего алгоритм многопоточной обработки;
- наличия соответствующей аппаратной инфраструктуры.

В то же время «узким» местом при реализации многопоточной обработки является именно «человеческий» фактор. Также многопоточная обработка предусматривает обработку данных на конкретном аппаратном средстве. Также в данном случае данные должны быть локально размещены там, где проводится обработка. При обработке и анализе РКД это приводит к значительным простоям при копировании данных от источника хранения к источнику обработки данных [6 – 8].

Для решения данной проблемы предлагается использовать РФС и ПМР. Это позволяет организовать многопоточную обработку данных, а также осуществлять ее распределенно. Для этого выполняется передача не данных к коду, а кода к данным. Это позволяет снизить время на передачу данных и простоя системы.

ПМР состоит из двух этапов: отображения и свертки. Аппаратный аспект реализации ПМР представлен координационным узлом (КУ) и узлами обработки (УО). На этапе отображения выполняется предварительная обработка данных: КУ в соответствии с запросом пользователя распределяет и передает задачи на обработку УО. После обработки каждый УО отправляет КУ результат обработки. После этого происходит реализация этапа свертки. КУ, получив ответы от всех УО, формирует решение задачи, поступившей от пользователя.

Таким образом, возможно осуществить распределенную многопоточную обработку данных. Это реализуется за счет выполнения этапа отображения на каждом УО независимо друг от друга, а также реализации этапа свертки на разных КУ. Также КУ обеспечивает выполнение всех задач при сбое. В этом случае задача передается другому УО. Результат обработки записывается в РФС.

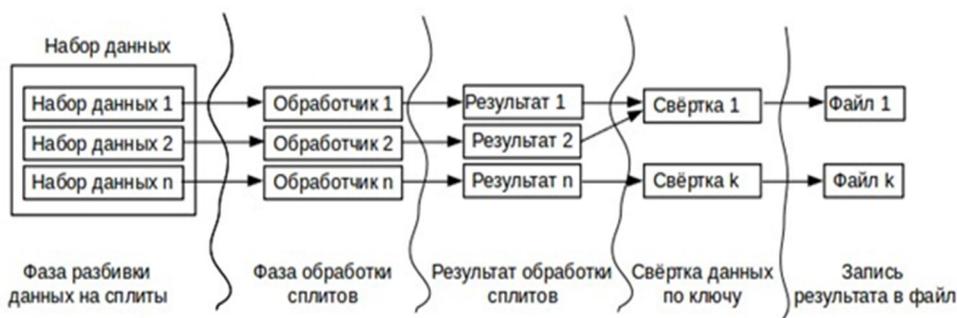


Рис. 3. Распределенная многопоточная обработка данных

Заключение

При прогнозировании и реагировании на ЧС важно получать оперативную актуальную и достоверную информацию. Опыт реагирования на ЧС показывает актуальность использования для этих целей РКД. Однако при использовании РКД требуется реализация процессов сбора, хранения и обработки больших объемов информации. Ввиду этого оперативность получения пользователем информации снижается за счет потери времени при передаче данных и ее обработки. Для решения данной проблемы в статье было предложено использовать:

- автоматический сбор данных;
- распределенную файловую систему;
- реализацию процессов обработки и анализа выполнять по ПМР.

Для подтверждения правильности предложенного подхода был проведен эксперимент.

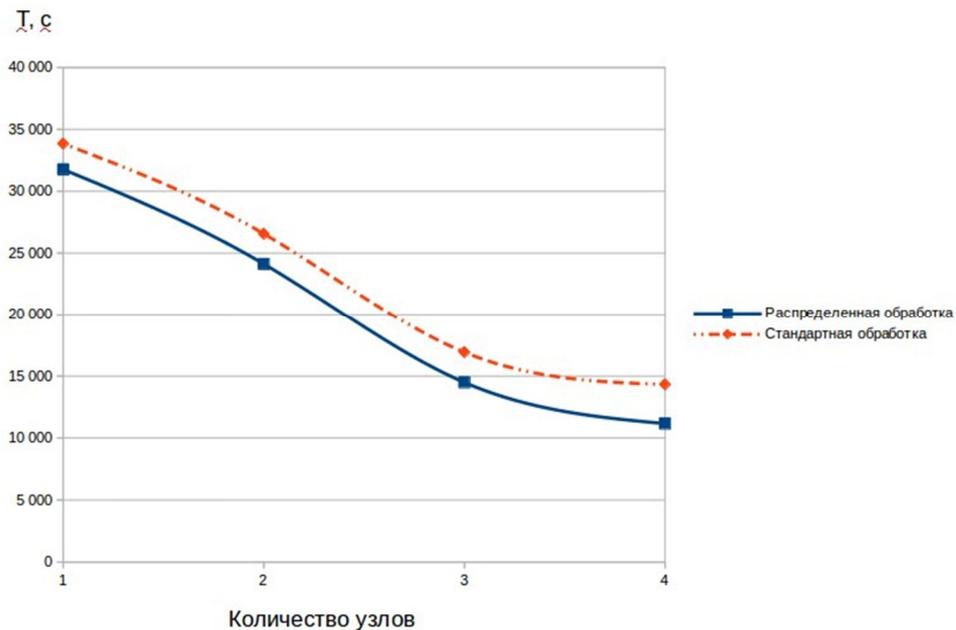


Рис. 4. Результаты эксперимента

Был создан кластер из 4 УХД (УО) и 1 УЗ (КС), коэффициент репликации – 3. Исходные данные – космические снимки в формате GEOTIFF с космического аппарата типа «Ресурс-П». Общий объем данных – 140 Гбайт. Каждый узел кластера имел следующие характеристики:

- центральный процессор: двухъядерный, тактовая частота 2,2 ГГц;
- оперативная память: 8 ГБ;
- жесткий диск: 600 ГБ.

В ходе эксперимента была реализована задача по выделению изменений на территории на основе разновременной космической съемки. В ходе эксперимента было выполнено поэтапное увеличение количества УХД.

Результаты эксперимента подтверждают актуальность использования предлагаемого метода, а также то, что время, необходимое на обработку, напрямую зависит от УО.

Литература

1. Алексеенко Я. В. Применение данных дистанционного зондирования Земли российской орбитальной группировки космических аппаратов для обеспечения эффективных управленческих решений в системе антикризисного управления в чрезвычайных ситуациях // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – С. 417 – 417.
2. Еременко С. П. и др. Интеллектуальные информационные системы космического мониторинга // Транспорт России: проблемы и перспективы. – 2015. – С. 91 – 99.

3. Фахми Ш. С., Алексеенко Я. В., Костикова Е. В. Интеллектуальные транспортные видеосистемы на основе технологии «система на кристалле» // Вопросы радиоэлектроники. – № 6.
4. Camps-Valls G. et al. Remote sensing image processing // Synthesis Lectures on Image, Video, and Multimedia Processing. – 2011. – Т. 5. – № 1. – С. 1 – 192.
5. San-Miguel-Ayaz J. et al. Comprehensive monitoring of wildfires in Europe: the European forest fire information system (EFFIS) // Approaches to managing disaster-assessing hazards, emergencies and disaster impacts // InTech. – 2012.
6. Schowengerdt R. A. Techniques for image processing and classifications in remote sensing // Academic Press, 2012.
7. Wang L. et al. A parallel file system with application-aware data layout policies for massive remote sensing image processing in digital earth // IEEE Transactions on Parallel and Distributed Systems. – 2015. – Т. 26. – № 6. – С. 1497 – 1508.
8. Талалаев А. А. Организация конвейерно-параллельных вычислений для обработки потоков данных // Информационные технологии и вычислительные системы. – 2011. – №. 1. – С. 8 – 13.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЛЬЕФА СЕВЕРНЫХ АРКТИЧЕСКИХ ТЕРРИТОРИЙ РФ ДЛЯ ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Ю. Г. Кутинов^{1,2}, А. Л. Минеев¹,
З. Б. Чистова¹, Е. В. Полякова¹

¹ ФИЦКИА им. ак. Н. П. Лаверова РАН, г. Архангельск
² САФУ им. М. В. Ломоносова, г. Архангельск

Аннотация. Проведенный авторами анализ существующих, находящихся в свободном доступе, глобальных цифровых моделей рельефа ЦМР (GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, ETOPO2 и ASTER GDEM) показал, что наиболее подходящей из существующих цифровых моделей рельефа для северных территорий РФ является модель ASTER GDEM v2. Авторами проведен сравнительный анализ наиболее распространенных географических информационных систем (ГИС: ArcGIS (модуль Spatial Analyst); MapInfo (модуль Vertical Mapper); SAGA (модель Terrain Analysis); GRASS; QGIS (Quantum GIS); gvSIG (модель SEXTANTE) и др.) и их возможностей для обработки рельефа. В целом SAGA GIS (группа модулей Terrain Analysis) обладает возможностью расчета наибольшего числа геоморфометрических параметров, как пространственного их распределения (карты), так и статистики. На основе разработанной ЦМР и рассчитанных геоморфометрических параметров рельефа, создан комплект геоэкологических карт и выделены на региональном и локальном уровнях районы, характеризующиеся различной интенсивностью протекания эрозионных и аккумулятивных процессов. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-05-60024.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, ASTER GDEM v2, SAGA GIS, алгоритм обработки, кластерный анализ, геоморфометрические параметры.

Введение

В настоящее время при изучении состояния природной среды и результатов техногенного воздействия в мировой практике широко применяются материалы различных космических съемок с искусственных спутников Земли (ИСЗ). Для геологической среды – это, в первую очередь, изучение экзогенных геологических процессов. При выделении геоэкологических объектов, единых правил извлечения информации из космических снимков до сих пор не существует. Наиболее распространены приемы непосредственного распознавания конкретных объектов, структур или следов прошедших процессов, а также формального выделения различных элементов ландшафта с последующей, качественной и количественной интерпретацией результатов. Большинство показателей, необходимых для количественной оценки морфологии рельефа и спецификации эрозионных процессов, можно получить с использованием цифровой модели рельефа (ЦМР) и/или цифровых моделей местности (ЦММ). Значительная часть информации может быть получена на основании анализа геоинформационных моделей мезорельефа, а также карт пространственного распределения различных расчетных параметров, полученных на основе ЦМР. Использование ЦМР позволяет оценить скорости протекания эрозионных процессов на исследуемой территории и выделить площади аккумуляции осадков, в т. ч. и загрязняющих веществ,

и площади развития деструктивных процессов. Создание цифровых моделей рельефа связано со значительными затратами средств и времени. В то же время с помощью «открытых» ЦМР можно получать исходные материалы в масштабе до 1:25 000. Т. е., для глобального и регионального уровней геоэкологических исследований возможно использование ЦМР свободного доступа, которых на настоящий момент вполне достаточно.

Таким образом, использование современных данных ДЗЗ и ГИС-технологий позволяет провести геоэкологическое районирование территории на качественной цифровой основе, выделить участки развития экзогенных процессов и оценить устойчивость рельефа.

Выбор ЦМР, программного обеспечения и алгоритма обработки данных

Для проведения исследований на первом этапе был осуществлен анализ и выбор ЦМР и программного обеспечения (рис. 1).

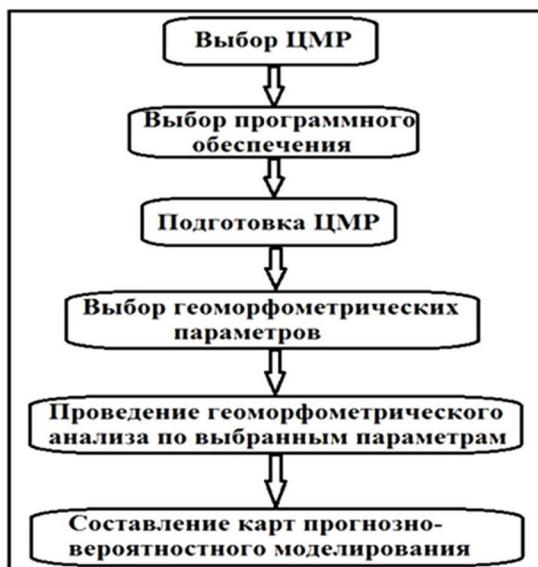


Рис. 1. Анализ и выбор ЦМР и программного обеспечения

Нами было проведено сравнение свободно распространяемых ЦМР – SRTM 3, SRTM-30, ASTER GDEM v.1, ASTER GDEM v2, ASTER GDEM v3, GTOPO30, ACE2, ETOPO2 и GMTED2010. Наиболее точными по разрешению являются SRTM и ASTER GDEM v2 и v3. Первая из них в значительной степени «очищена» от артефактов и пустот, но не покрывает полностью исследуемую территорию. Модели GTOPO30, GMTED2010, ACE2, ETOPO и др. имеют более «грубое» разрешение и достаточно неоднородны по используемому исходному материалу, что влечет за собой меняющуюся точность по площади. Наиболее оптимальной (имеющей детальное пространственное разрешение в сочетании с точностью по высоте и «однородностью» исходного материала) являются ASTER GDEM v2 и v3. В принципе различия между второй и третьей версией ASTER GDEM не принципиальны. В последней версии были частично удалены присущие модели артефакты, но эти операции не изменили существенно качество модели.

Для выбора программного обеспечения был проведен анализ наиболее распространенных ГИС: ArcGIS (модуль Spatial Analyst); MapInfo (модуль Vertical Mapper); SAGA (модуль Terrain Analysis); GRASS; QGIS (Quantum GIS); gvSIG (модуль SEXTANTE) и др.) (рис. 1).

Анализ проводился для сопоставления возможностей расчета геоморфометрических параметров рельефа для геоэкологического районирования. Т. е. анализировались возможности и разнообразие модулей обработки ЦМР, входящие в структуру ГИС или привлекаемых из других ГИС. Учитывая задачи исследования, наиболее пригодной является SAGA GIS, обладающая возможностью расчета наибольшего числа геоморфометрических параметров [2, 4].

Подготовка ЦМР территории состояла из следующих операций: 1) извлечения и объединения данных; 2) замены аномальных значений высотных отметок и «пустот»; 3) устранения шероховатостей, шума и ошибок; 4) заполнения впадин с применением метода [7]. Все операции производились в свободном программном продукте SAGA GIS. С помощью модуля Clip Grid with Polygon из ASTER GDEM v2 были извлечены данные на область исследования. Для заполнения недостающих данных в ЦМР ASTER GDEM v2 нами были использованы данные из ЦМР GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки до 1". Для обнаружения выбросов анализировались методы: среднеквадратического отклонения; Z-Score; модифицированный метод Z-Score; абсолютного медианного отклонения; правила медианы. В результате авторами был написан сценарий (язык программирования Python), позволяющий рассчитывать вероятные диапазоны значений (и отбрасывать выбросы) по всем пяти методам. Для устранения шероховатостей, шума и ошибок наложения снимков использовался модуль DTM Filter и были устранены погрешности на границах между областями с разным размером стэка и в областях, где размер стэка мал. Для сглаживания цифровой модели рельефа был применен фильтр Smooth. Алгоритм подготовки цифровой модели рельефа отражен на рис. 2, 3.

Для проверки точности (надежности) построенной ЦМР Архангельской области было проведено сопоставление с открытыми векторными данными ГИС Панорама (табл. 1), полученными в результате оцифровки топографических карт масштаба 1:50 000; с цифровой моделью рельефа Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт масштаба 1:200 000 в ПО ГИС GRASS [1].

Данные ГИС Панорама на Архангельскую область включают в себя около 770 векторных слоев (каждый из которых соответствует номенклатурному листу топографической карты) и распространяются в формате SXF. ПО SAGA GIS не позволяет напрямую считывать данные формата SXF, поэтому для конвертации данных ГИС Панорама в формат SHAPE была применена ГИС QuantumGIS. В результате были получены векторные слои формата SHAPE, содержащие точечные объекты с координатами и значениями высоты. Полученные слои были импортированы и «сшиты» средствами ПО SAGA GIS. Было извлечено 69 048 точечных объектов, из которых 62 548 объектов располагается в пределах Архангельской области.

Цветом выделен авторский сценарий выбора метода выделения участков с аномальными высотами.

Подробно методика построения изложена в [2, 4].

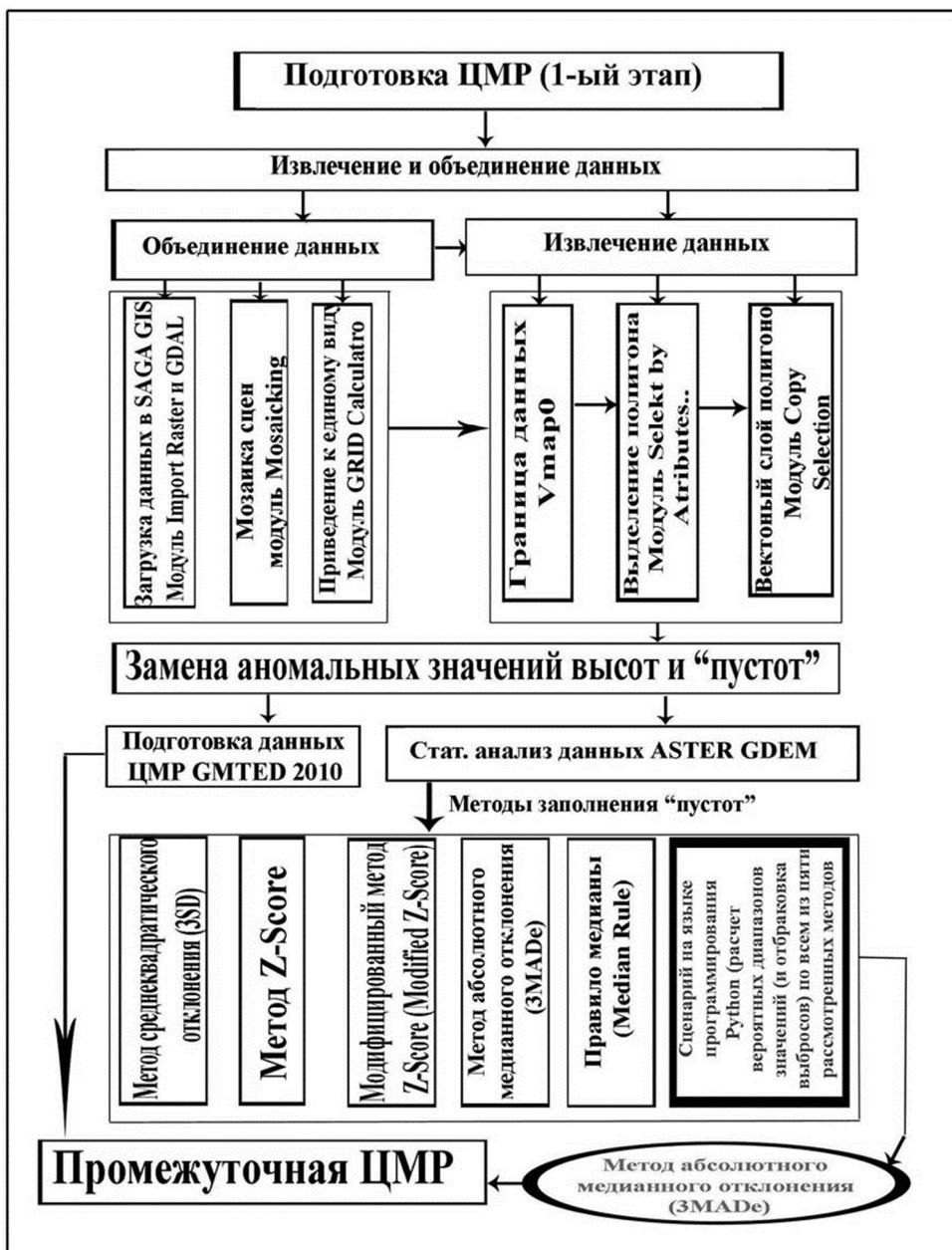


Рис. 2. Алгоритм подготовки цифровой модели рельефа [2]

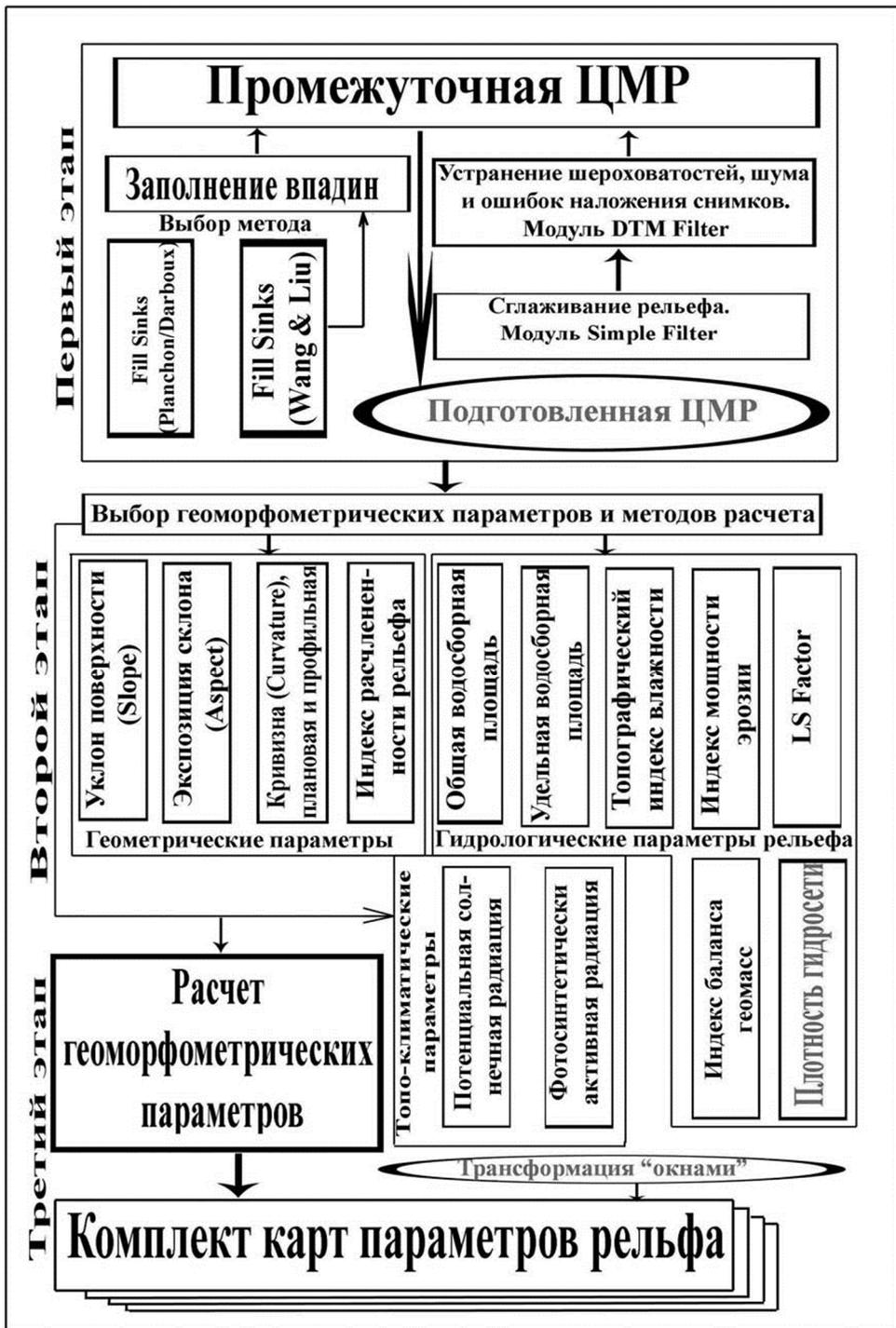


Рис. 3. Алгоритм подготовки цифровой модели рельефа и выбора параметров (продолжение рис. 2) [2]

Таблица 1

**Абсолютные разности значений высот между данными с ГИС Панорама
и ЦМР Архангельской области**

Абсолютная разность по высоте, м	Количество высотных отметок	Доля, %
0 – 10	46541	74,4085
11 – 20	14615	23,3661
21 – 30	1226	1,9601
31 – 40	101	0,1615
41 – 50	33	0,0528
51 – 60	19	0,0304
61 – 70	6	0,0096
71 – 80	3	0,0048
100 – 130	4	0,0064
Среднее арифметическое разности		7,45 м
Стандартное отклонение		5,62 м
Максимальная разность		126,71 м (1 высотная отметка)
Минимальная разность		0 м

Из табл. 1 видно, что абсолютная разность большинства высотных отметок (74 %) не превышает 10 метров, 24 % отметок укладываются в интервале от 11 до 20 м, и лишь 2 % значений имеют расхождение свыше 20 м. Эти остаточные значения пространственно совпадают с территорией, где отсутствовали данные ASTER GDEM v2, и пустоты заполнялись данными GMTED2010.

Сопоставление с ЦМР Беломорско-Кулойского плато, построенной с использованием топографических карт [1], показало, что построенная нами модель является более точной, поскольку метод трансформации окнами является более «щадящей» процедурой, нежели применение сглаживания сплайн-функцией.

Таким образом, на основе цифровой модели рельефа (ЦМР) ASTER GDEM v2 с использованием программного обеспечения ГИС SAGA создана корректная ЦМР территории Архангельской области для количественной оценки морфологии рельефа и специфики эрозионных процессов.

Для более четкого выделения разноранговых структур и неоднородностей рельефа исходные поля подвергались дальнейшей обработке, заключающейся в выделении их региональной и локальной составляющих различными окнами фильтрации – 480×480 м (~15"× 15"), 960 × 960 м (~30" × 30") и 1920×1920 м (~ 60" × 60") и кластерном анализе с различным количеством классов [3]. Кроме пространственного распределения параметров, была проведена статистическая обработка материала для оценки их доли в общей площади исследований.

При расчетах в окне 960 × 960 метров диапазон значений высоты на территории Архангельской области составил [0; 458] метров. В окне 1920×1920 метров – [0; 437]. В окне 30×30 метров (разрешение ASTER GDEM) – [0; 474]. Также меняется и диапазон значений углов наклона склонов на территории Архангельской области – [0; 4,59] градусов при расчетах в окне 960×960 метров. В окне 1920×1920 метров – [0; 2,71]. В окне 30×30 метров (разрешение ASTER GDEM) – [0; 35, 45] [3]. Это обстоятельство особенно актуально для равнинных территорий, к которым относится район исследований, т. к. значения геоморфометрических параметров характерные для района относительно невелики. Учитывая также, что высота, угол наклона склонов применяются при расчете большинства геоморфометрических параметров, то

при увеличении ячейки («окна») значения этих параметров будут уменьшаться. В то же время анализ цифровых моделей рельефа с использованием разных окон показал тождественность пространственного распределения высот [3].

На растровых ЦМР различного разрешения множество геоморфометрических параметров будут иметь различные значения и, следовательно, выделять различные объекты. Если размер ячейки достаточно мал (несколько сантиметров), анализ определит крутые склоны даже на тех участках, которые выглядят абсолютно плоскими (равнины, речные террасы). Как только разрешение растра становится грубее, среднее значение углов наклона уменьшается. Если размер ячейки достаточно большой, склоны на ЦМР будут очень пологими даже на участках, характеризующихся большими значениями углов наклона.

Наши расчеты показывают, что на значения геоморфометрических параметров оказывает влияние не только размер ячейки ЦМР, но и ряд других факторов, например, используемые алгоритмы для устранения артефактов, параметры сглаживания ЦМР, методы аппроксимации, – другими словами, весь комплекс работ по разработке ЦМР, начиная от наблюдения и заканчивая исправлением ошибок. Поэтому значения рассчитанных геоморфометрических параметров будут зависеть не только от источника ЦМР (что вполне естественно), но и от корректности работы, проведенной ГИС-специалистом для подготовки ЦМР к решению определенных задач. Такое явление затрудняет анализ протекающих на территории эрозионных процессов, так как при количественной оценке геоморфометрических параметров, имея разные значения этих параметров в разных расчетах, возникает ряд вопросов, таких как: это конкретное значение параметра ошибочно или верно; следует ли считать это конкретное значение большим, средним или малым для данной территории; при прогнозировании следует ли считать это значение характеризующим дальнейшее протекание того или иного процесса?

Правильно оценить, верны ли рассчитанные параметры в принципе, могут эксперты, знакомые с характеристикой исследуемой территории. Однако в большинстве случаев (например, если источник ЦМР один, но расчеты проведены в разных окнах), абсолютные значения параметров будут разными, хотя характер проявления процесса, описываемого этими параметрами, останется относительно постоянным. Подтвердить это можно, оценив значения параметра не количественно, а качественно. Воспользовавшись, например, одним из методов классификации и выделив в выборке схожие по значениям классы, можно апеллировать не абсолютными значениями (в которых могут быть расхождения), а категориями значений (которые сохраняют относительное постоянство). Одним из таких методов классификации является кластерный анализ.

Наиболее популярный метод кластеризации k -means (k -средних) основан на итеративном перемещении значений между кластерами. Метод k -средних чаще служит как способ количественной и качественной оценки набора данных, чем как способ деления набора на уникальные, конечные группы. Еще одна роль метода k -средних – это снижение сложности данных [6].

Существует несколько алгоритмов реализации метода k -средних. В общем случае алгоритм состоит из следующих шагов [5]: а) выбора начальных центров k кластеров; б) соотнесения каждого элемента выборки с ближайшим центром кластера; в) вычисления новых значений центров каждого кластера, исходя из разделения, произведенного на предыдущем шаге; г) повторения шагов 2 и 3 до тех пор, пока разделение не стабилизируется, то есть закончить, когда классификация будет оставаться постоянной на каждой последующей итерации. Другими словами, для множества точек ме-

тод k -средних пытается отыскать множество центров кластеров так, чтобы было минимальным суммарное отклонение точек от центров своих кластеров. В SAGA GIS применяется алгоритм метода k -средних автора Forgy [6], в котором начальные центры кластеров выбираются случайным образом.

Выбор начальных центров зависит от конкретной реализации алгоритма, например, начальные центры могут быть указаны пользователем программного обеспечения или выбраны программой случайно. В SAGA GIS применяется также метод hill climbing (поиск восхождением к вершине), целью которого является поиск локальных минимумов или максимумов путем сравнения текущего значения с соседними значениями. Первое значение выбирается случайно и помечается как текущее. На последующих итерациях текущее значение сравнивается с возможными соседними значениями и если среди соседних значений находится более оптимальное, то оно помечается как текущее. Цикл продолжается до тех пор, пока у текущего значения не будет таких «лучших соседей» (т. е. больших или меньших в зависимости от цели сравнения).

Рассмотрим пример выполнения кластерного анализа на имитационной ЦМР (рис. 4, А) и реальной ЦМР (рис. 4, Б, В).

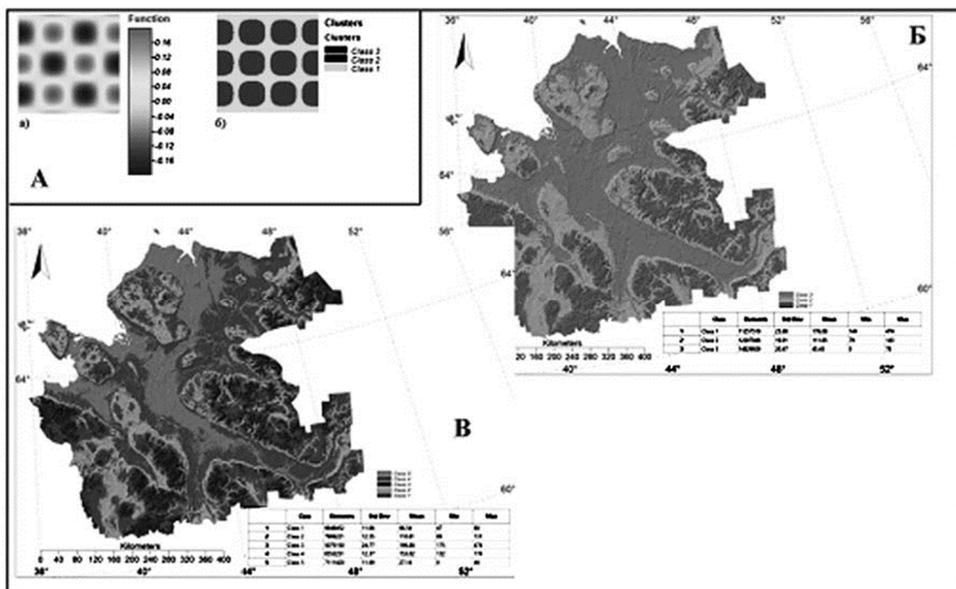


Рис. 4. Пример выполнения кластерного анализа на имитационной и реальной ЦМР [3]: А – кластерный анализ имитационной ЦМР: а – ЦМР, созданная с помощью функции $z = \sin(x)\cos(x)$, б – три кластера; Б – кластерный анализ подготовленной ЦМР с разбиением на 3 класса; В – кластерный анализ подготовленной ЦМР с разбиением на 5 классов

На рис. 4, А видно, что при выполнении кластерного анализа было выбрано количество кластеров, равное 3. При этом анализ выделил в отдельные кластеры зоны понижений, зоны повышений и плоские зоны. Кластерный анализ в SAGA GIS позволяет получить статистику по каждому кластеру (табл. 2).

Таблица 2

Статистика кластеров имитационной ЦМР

Номер кластера	Min	Max	Mean	StdDev	%
1	- 0,064337	0,064312	- 0,000009	0,032603	47,83
2	0,064315	0,200000	0,128638	0,039846	26,07
3	- 0,200000	- 0,064340	- 0,128669	0,039842	26,09

Таким образом, применение кластерного анализа для обработки ЦМР и геоморфометрических параметров позволяет получать статистические данные по классам, не теряя информации, как при использовании разноразмерных ячеек. Сопоставление ЦМР в разных ячейках с ЦМР, рассчитанными при помощи кластерного анализа, показывает, что в последнем случае выделение не только общего тренда, но и границ проявления эрозионных процессов более наглядно и корректно.

Учитывая достаточно большое количество и многообразие используемых геоморфометрических параметров, одной из задач данного исследования был выбор параметров и методик их расчета для геоэкологического анализа (рис. 3).

Для тестовых вычислений параметров нами была создана упрощенная теоретическая ЦМР с использованием функции.

Тестовые вычисления были также проведены для территории Онежского полуострова, который был выделен как тестовый участок по следующим причинам [3]: относительно небольшая замкнутая площадь при достаточно хорошо выраженном рельефе; наличие протерозойских и палеозойских отложений; наличие тектонических структур (рифейский Онежский грабен и вендский Унский грабен), выраженных в рельефе; наличие водораздела.

Такие же расчеты по упрощенной теоретической ЦМР и территории Онежского полуострова были проведены и для всех геоморфометрических параметров для выбора последних.

На основе созданной ЦМР были составлены (рассчитаны) карты: глубин заполнения впадин; направления потоков; экспозиции склонов; уклона поверхности склонов; профильной и плановой кривизны; обобщенной профильной и плановой кривизны (классификация Трёх«); индекса потенциала плоскостной эрозии (LS Factor); индекса расчлененности рельефа; индекса мощности эрозии; индекса баланса геомасс; общей и удельной водосборных площадей; топографического индекса влажности, потенциальной приходящей солнечной радиации (прямая, рассеянная, совокупная инсоляции) и фотосинтетически активной радиации (ФАР).

Общий алгоритм исследования показан на рис. 5.

Таким образом, был получен комплект монофакторных геоэкологических карт, позволяющих выделить зоны сноса и накопления осадочного материала, оценить пространственное положение и дать количественные характеристики процессам эрозии и аккумуляции и выделить зоны транзита осадочного материала, а также оценить потенциальную устойчивость и/или склонность к эрозии различных участков исследованной территории.



Рис. 5. Общий алгоритм исследования [3]

Выводы

Анализ существующих, находящихся в свободном доступе ЦМР (GTOPO30, SRTM, SRTM Void Filled, GMTED2010, ACE2, ETOPO2 и ASTER GDEM), показал, что наиболее подходящей из существующих цифровых моделей рельефа для северных территорий РФ является модель ASTER GDEM v2.

Сравнительный анализ наиболее распространенных ГИС программ (QGIS, GRASS, gvSIG, SAGA, MapInfo Professional, ArcGIS), их возможностей, методов обработки рельефа показал, что, учитывая задачи исследования, наиболее пригодной для геоморфометрического анализа рельефа является SAGA GIS.

Для создания корректной ЦМР на основе ASTER GDEM необходимо проведение следующих операций: 1) извлечение и объединение данных; 2) замена аномальных значений высотных отметок и «пустот» с использованием метода стат. анализа абсолютного медианного отклонения и данных GMTED2010 с искусственно уменьшенным размером ячейки; 3) устранение шероховатостей, шума и ошибок, возникающих при наложении снимков (модуль DTM Filter и модуль Simple Filter); 4) заполнение впадин.

Применение кластерного анализа для обработки ЦМР и геоморфометрических параметров позволяет получать статистические данные по классам, не теряя информации, как при использовании разноразмерных ячеек. Сопоставление ЦМР в разных ячейках с ЦМР рассчитанными при помощи кластерного анализа показывает, что в последнем случае выделение не только общего тренда, но и границ проявления эрозионных процессов более наглядно и корректно.

На основе созданной среднemasштабной цифровой модели рельефа и современных ГИС-технологий могут быть рассчитаны геоморфометрические параметры рельефа, позволяющие на количественной основе проводить оценку современных эрозионных процессов и оценивать возможность накопления загрязняющих веществ. Расчет геоморфометрических параметров рельефа позволяет создать комплект монофакторных геоэкологических карт, позволяющих выделить зоны сноса и накопления осадочного материала, оценить пространственное положение и дать количественные характеристики процессам эрозии и аккумуляции и выделить зоны транзита осадочного материала, а также оценить потенциальную устойчивость и/или склонность к эрозии различных участков исследованной территории.

Литература

1. Гофаров М. Ю., Болотов И. Н., Кутинов Ю. Г. Ландшафты Беломорско-Кулойского плато: Тектоника, подстилающие породы, рельеф и растительный покров. – Екатеринбург, 2006. – С. 158.
2. Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Подготовка цифровой модели рельефа для исследования экзогенных процессов северных территорий Российской Федерации // *Пространство и Время*, 2015а. – № 3(21). – С. 278 – 291. – Стационарный сетевой адрес: 2226 – 7271provrg_st3-21.2015.83.
3. Минеев А. Л., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б., Полякова Е. В. Геоэкологическое районирование территории Архангельской области с использованием цифровых моделей рельефа и ГИС-технологий // *Пространство и Время*. – 2017. – № 2 – 4 (28-29-30). – С. 267 – 288. – Стационарный сетевой адрес: 2226-7271provrg_st2_3_4-28_29_30.2017.92.
4. Минеев А. Л., Полякова Е. В., Кутинов Ю. Г., Чистова З. Б. Методические аспекты создания цифровой модели рельефа Архангельской области на основе ASTER GDEM v2 // *Современные проблемы науки и образования* – 2015б. – № 2. – URL: www.science-education.ru/129-21949.

5. Komarasamy G., Wahi A. A new algorithm for selection of better K value using modified hill climbing in IN K-means algorithm // *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*. – 2013. – Vol. 55. – №. 3.
6. Morissette L., Chartier S. The k-means clustering technique: General considerations and implementation in Mathematica // *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*. – 2013. – Vol. 9. – №. 1. – P. 15 – 24.
7. Wang L., Liu H. An efficient method for identifying and filling surface depressions in digital elevation models for hydrologic analysis and modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2006. – Vol. 20(2). – P. 193 – 213. – doi.org/10.1080/13658810500433453.

ОБ ИЗМЕРЕНИИ РЕЛЬЕФА МЕСТНОСТИ ПРИ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ СЪЕМКЕ ПО ТЕХНОЛОГИИ РСА

А. Е. Евграфов, В. Г. Польш, С. В. Шостак
(АО «НПО Лавочкина», г. Москва)

***Аннотация.** Рассмотрены принципы определения третьей координаты по радиолокационному изображению, полученному по технологии синтезированной апертуры РСА. Эта координата рассматривается как высота элемента разрешения над общеземным эллипсоидом, определенная относительно него. Даются оценки необходимой точности измерений и ее связь с системными параметрами мониторинга.*

***Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, радиолокация с синтезированной апертурой, радиолокационный интерферометр, цифровая модель рельефа.*

Введение

Дистанционное зондирование Земли в оптическом диапазоне давно нашло свое прочное место в практике космического мониторинга. Вслед за этим появились системы получения плановых радиолокационных изображений (РЛИ) по технологии СА, и они также вошли в арсенал средств наблюдения земной поверхности [1 – 3]. Наконец, в последнее двадцатилетие в практику международного космического мониторинга стало входить радиолокационное определение земного рельефа.

Сегодня на очереди стоит задача практического освоения подобной технологии и в России, однако в данной области ощущается дефицит методической информации. Поэтому представляет интерес рассмотреть определение рельефа в общей и системной постановке, основанное на использовании пары измерений наклонной дальности, полученных двумя КА до одной и той же точки наблюдаемого объекта [4, 5].

Измерения рельефа участка местности по таким измерениям основаны на решении двух основных операций, а именно:

- разработки оптимального и практически приемлемого алгоритма определения высот выбранных точек местности;
- организации совместного полета двух космических носителей РСА в конфигурации, обеспечивающей измерения высот выбранных точек наблюдаемой поверхности с заданным качеством.

В данной статье рассматривается первая из указанных операций.

1. Навигационное обеспечение космической съемки рельефа

Из самой схемы измерения рельефа по его наблюдениям с двух КА следует, что она требует корректно формализованных геометрических соотношений между тремя точками, отнесенными к той или иной системе координат (СК). Этими точками являются два КА и точка наблюдаемой поверхности (рельефа). Следовательно, необходимо иметь текущие положения обоих носителей РСА. Далее необходимо задаться определенным положением конкретной точки наблюдаемого рельефа в той же СК. Такой точкой служит пиксель РЛИ объекта.

В практике космической съемки текущие координаты КА поставляются службой космического глобального навигационного единого координатно-временного обеспечения (ЕС КВО) полета КА (типа ГЛОНАСС). При этом собственно траектория

КА определяется в геоцентрической связанной (гринвичской) системе прямоугольных пространственных координат (ГССПК) и дополняется равноправной и *неотъемлемой* от них временной координатой. Положение пикселя РЛИ как точки рельефа также необходимо определить в той же ЕС КВО. При необходимости пространственные координаты пикселя всегда могут быть пересчитаны в геодезическую систему координат. Последняя опирается на общеземной эллипсоид (ОЗЭ) и служит основой составления различных карт и радиолокационных изображений, где временная координата неявно исключается.

В геодезии и картографии возвышение любой точки рельефа определяется по нормали к поверхности относимости, за которую принята поверхность ОЗЭ. Тогда измерение рельефа местности необходимо определять как разность пространственных координат точки рельефа и находящейся по вертикали под ней точки поверхности самого ОЗЭ. Эта точка поверхности и есть точка привязки РЛИ пикселя к ОЗЭ (основание). Координаты основания пикселя РЛИ всегда можно найти, зная координаты и вектор скоростей КА в ЕС КВО [6], и их можно считать известными.

2. Принцип и схема измерения высоты рельефа

Геометрия определения рельефа местности, использующая измерения двух наклонных дальностей от 2-х КА до одного и того же текущего пикселя РЛИ, представлена на рис. 1. Введем вспомогательную (локальную) текущую геоцентрическую систему прямоугольных координат XYZ , получаемую из стандартной ГССПК очевидными поворотами. Здесь ось Z проходит через середину текущего положения базы, соединяющей КА1 и КА2, и она играет роль местной вертикали. Ось X направлена по вектору скорости середины реальной базы, а плоскость ZY является траверсной. Пиксель РЛИ расположен в плоскости YZ , и его привязка к поверхности ОЗЭ по оси Y задана координатой L .

Тогда координаты КА, поверхности ОЗЭ и пикселя РЛИ во вспомогательной СК XYZ очевидны. Измеряемый пиксель представлен точкой h , лежащей на нормали n_0 к ОЗЭ и проведенной через точку привязки (основание) пикселя РЛИ. Угол, составляемый нормалью n_0 к ОЗЭ с осью Z , указан символом σ , а проекции пикселя с высотой h на оси координат YZ обозначены, соответственно, как h_y и h_z . Примем, что координаты обоих КА и пикселя в ГССПК известны. Пусть они отсчитываются относительно центра реальной базы в осях ГССПК. Тогда координаты обоих КА и пикселя запишутся как

$$(dx_1, -dy_1 + L, H - dz_1) \text{ и } (-dx_2, dy_2 - L, H + dz_2),$$

а длина базы d , по определению, будет равна

$$d = 2[(dx_1)^2 + (dy_1)^2 + (dz_1)^2]^{0.5}.$$

Координаты основания пикселя РЛИ на поверхности ОЗЭ есть $(0, L, 0)$, а координаты самого пикселя h , отсчитываемые по осям вспомогательного варианта ГССПК, составят $(0, L + h_y, h_z)$. Расстояния R от концов базы до поверхности ОЗЭ и пикселя определяются известным соотношением $R = \sum [(x_{iКА} - x_{iПЭР})^2]^{0.5}$.

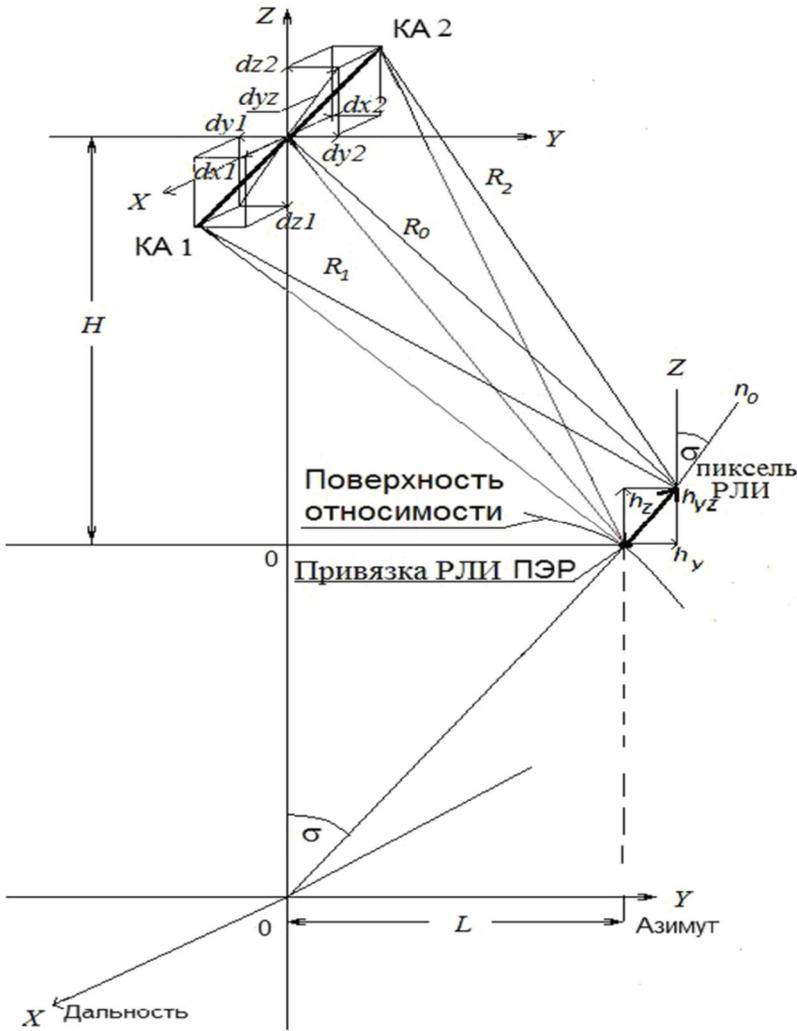


Рис. 1. Определение высоты рельефа в общем случае

Наклонная дальность R_0 от центра базы до основания пикселя на ОЗЭ равна $R_0 = (L^2 + H^2)^{0.5}$. Тогда наклонные дальности, отсчитываемые от КА 1, 2 до пикселя h , можно записать в виде:

$$R_{1h} = [(dx_1)^2 + (-dy_1 - L - hy)^2 + (H - dz_1 - hz)^2]^{0.5};$$

$$R_{2h} = [(-dx_2)^2 + (dy_2 - L - hy)^2 + (H + dz_2 - hz)^2]^{0.5}.$$

Вынося величину R_0^2 из под радикала и используя первое приближение для квадратного корня вида $(1 + \epsilon)^{0.5} \approx (1 + 0.5\epsilon)$, получим выражения измеренных (реальных) наклонных дальностей от КА 1, 2 до пикселя h :

$$R_{1h} \approx R_0 \{ [R_0^2 + 0.5d^2 + (Ldy_1 - Hdz_1) + 0.5h^2 - Hhz + hzd_1 + Lhy + dy_1hy] / R_0^2 \};$$

$$R_{2h} \approx R_0 \{ [R_0^2 + 0,5d^2 - (Ldy_2 - Hdz_2) + 0,5h^2 - Hhz - hzdz_2 + Lhy - dy_2hy] / R_0^2 \}.$$

Введя обозначения $dx1 = dx2 = dx$, $dy1 = dy2 = dy$, и $dz1 = dz2 = dz$, получим первую разность наклонных дальностей, $dR_{21h} = R_{2h} - R_{1h}$, от КА до точки h :

$$dR_{21h} = [2(Ldy - Hdz) + 2hzdz + 2hydy] / R_0.$$

Получив первую разности dR_{21h} наклонных дальностей dR_{2h} , dR_{1h} , запишем для основания точки h (по известным данным) аналогичную первую расчетную (виртуальную) разность $dR_{21h0} = dR_{2h0} - dR_{1h0}$ при $hy = hz = 0$. Затем найдем вторую разность dR_h первых разностей dR_{21h} и dR_{21h0} . В итоге получим вторую разность dR_h первых разностей dR_{21h} , dR_{210} в виде:

$$dR_h = dR_{21h} - dR_{210} = (hy2dy + hz2dz) / R_0 = (\mathbf{h}_{yz} \cdot \mathbf{d}_{yz}) / R_0. \quad (1)$$

Из выражения (1) следует, что величина dR_h есть просто скалярное произведение векторов $\mathbf{h}_{yz}(hy, hz)$ и $\mathbf{d}_{yz}(2dy, 2dz)$, деленное на скаляр R_0 . Здесь вектор \mathbf{d}_{yz} есть проекция реальной базы на плоскость YZ СК. По определению скалярного произведения $(\mathbf{h}_{yz} \cdot \mathbf{d}_{yz})$ правую часть выражения (1) можно записать иначе как:

$$dR_h = |\mathbf{h}_{yz}| \cdot |\mathbf{d}_{yz}| \cos(\vartheta) / R_0, \quad (2)$$

где угол ϑ есть *пространственный* угол между векторами \mathbf{h}_{yz} и \mathbf{d}_{yz} . Угол вектора \mathbf{d}_{yz} , отсчитанный от оси Z (по часам) определяется проекциями реальной базы d , а угол σ вектора пикселя \mathbf{h} относительно оси Z , отсчитанный по часам, есть угол радиус-вектора точки привязки (основания) измеряемой высоты, отсчитанный относительно оси Z (также по часам). Разность этих двух углов и равна углу ϑ . Строго говоря, определяя угол ϑ , следовало бы учесть поправку на различие между географической и геодезической широтами. Однако это различие по факту не превышает $\approx 12'$ на широте 45° [7], и поэтому им можно пренебречь.

Тогда, найдя величину $\cos(\vartheta)$ по компонентам векторов \mathbf{d}_{yz} и \mathbf{h}_{yz} , из выражения (2) находим высоту рельефа h как модуль $|\mathbf{h}_{yz}|$ вектора \mathbf{h}_{yz}

$$|\mathbf{h}_{yz}| = (dR_h R_0) / (|\mathbf{d}_{yz}| \cos(\vartheta)) = dR_h (R_0 / d_{\vartheta\phi}). \quad (3)$$

Модуль вектора $|\mathbf{d}_{yz}| \cos(\vartheta)$ (то есть проекция вектора реальной базы \mathbf{d}_{yz} на вектор \mathbf{h}_{yz}) можно называть *эффективной базой*, и далее он будет обозначаться просто как $d_{\vartheta\phi} = |\mathbf{d}_{yz}| \cos(\vartheta)$. Следовательно, высота пикселя h определяется второй разностью наклонных дальностей dR_h , наклонной дальностью пикселя R_0 , и эффективной базой $d_{\vartheta\phi}$. Заметим, что если точка привязки рельефа не лежит в траверсной плоскости, то вектор пикселя имеет все три компоненты $\mathbf{h}_{xyz} = (h_x, h_y, h_z)$, и выражение (1) принимает вид:

$$dR_h = dR_{21h} - dR_{210} = (hx2dx + hy2dy + hz2dz) / R_0 = (\mathbf{h}_{xyz} \cdot \mathbf{d}_{xyz}) / R_0, \quad (4)$$

оставляя ход анализа и предыдущие выводы практически неизменными.

Выражения (1 – 3) для траверсного пикселя можно упростить. Очевидно, что при наблюдении пикселя с орбиты КА угол σ невелик и не превышает значений $\sigma \approx 10^\circ$. Так как hz есть проекция вектора \mathbf{h}_{xyz} на ось Z , а величина $\cos(10^\circ) = 0,985 \approx 1$, то

практически всегда для значения высоты h можно принять $h \approx hz$. Тогда эффективная база $d_{\text{эф}}$ оказывается равной удвоенной проекции dz , $d_{\text{эф}}=2dz$, а выражения (1, 3) приобретают вид:

$$dR_h = h(d_{\text{эф}}/R_0), \quad (4)$$

$$h = dR_h(R_0/d_{\text{эф}}), \quad (5)$$

в котором они и встречаются в литературе, цитированной выше.

3. Об особенностях фазовых измерений высот рельефа

Вторая разность dR_h в (1) образована двумя компонентами. Первая из них есть разность реальных измерений наклонных дальностей от КА, составляющих базу d , до пикселя h — точки измеряемого рельефа. Вторая же компонента, виртуальная, есть первая разность расчетных измерений до основания пикселя h , поскольку все необходимые для расчета данные (координаты обоих КА и точки основания пикселя h на ОЗЭ) известны.

Из выражения (5) следует, что величина h зависит, прежде всего, от измерений наклонных дальностей dR_h (в линейной мере), а также отношения $R_0/d_{\text{эф}}$. Взяв производные высоты h по переменным dR_h , R_0 и $d_{\text{эф}}$, видим, что относительные ошибки по ним составляют соответственно $\Delta(dR_h)/dR_h$, $\Delta R_0/R_0$ и $-\Delta d_{\text{эф}}/d_{\text{эф}}$. Так, например, космических наблюдений сразу видно, что относительная ошибка рельефа практически зависит от двух таких ошибок измерений, а именно, dR_h и эффективной базы $d_{\text{эф}}$.

Далее, из выражения (2), видно, что определяемая высота рельефа $|h_{yz}|$ умножается на малый коэффициент $(|d_{yz}|\cos(\theta))/R_0 \ll 1$. Отсюда следует, что для практически используемого диапазона высот полета КА результирующие абсолютные значения измеряемой величины dR_h будут весьма малы. Поэтому измерения дальности приходится вести по более мелкомасштабной шкале *полной* фазы φ_h несущей, имея в виду, что $\varphi_h \geq 2\pi$ [5,8]. Так как сами переменные дальность R и фаза φ в естественной нормировке тождественны ($R/\lambda = \varphi/2\pi$), то наклонные дальности $dR_h = \lambda\varphi_h/2\pi$, измеренные в РЛС по временному запаздыванию сигнала dR_h , эквивалентны измерению дальности по сдвигу *полной фазы* φ_h несущей принятых сигналов.

В литературе определение высот рельефа по несущей (по сути – фазометрические измерения пары дальностей) часто ошибочно интерпретируются как интерферометрические измерения углов, хотя здесь фактически ведется измерение двух дальностей и их разности по переменной полная фаза φ_h , что совсем другое дело. Тогда, заменяя вторую разность дальностей dR_h в формулах (4, 5) на вторую разность полных фаз $\varphi_h/2\pi$ получим альтернативные выражения, полностью эквивалентные формулам (4, 5),

$$dR_h = h(d_{\text{эф}}/R_0) = \lambda(\varphi_h/2\pi), \quad (6)$$

$$h = \lambda(\varphi_h/2\pi)(R_0/d_{\text{эф}}). \quad (7)$$

Видно, что фазовые измерения высоты h в *линейной мере* являются периодическими величинами. Тогда их собственный период, обозначаемый как $h_{2\pi}$, находится по формуле (7) при $\varphi_h=2\pi$, равен:

$$h_{2\pi} = \lambda(R_0/d_{\text{эф}}). \quad (8)$$

На практике высота рельефа h определяется по *измеряемой* разности фаз φ_0 , которая, по определению, определена лишь в *одном* цикле фазы ($\varphi_0 \leq 2\pi$). Поэтому в формуле (7) полная фаза равна $\varphi_h/2\pi = \varphi_0/2\pi + N_h$. Здесь φ_h – *реальное* число, выраженное в единицах 2π , а φ_0 – его *дробная* реальная часть. Напротив, N_h – *целое*, и есть число циклов 2π полной фазы φ_h . Вспомнив выражение (8), найдем, что измеряемая высота h равняется:

$$h = [(\varphi_0/2\pi) + N_h]h_{2\pi}, \quad (9)$$

где член $(\varphi_0/2\pi)h_{2\pi}$ есть отсчет высоты h_0 , измеряемой по шкале размером $h_{2\pi}$, а член $N_h h_{2\pi}$ дополняет отсчет значением полной шкалы N_h раз.

Из выражения (9) видно, что ошибки измерения величины h возникают вследствие погрешностей в измеряемой фазе $\varphi_0/2\pi$ и периоде однозначности $h_{2\pi}$. Величина $h_{2\pi}$ представляет собой коэффициент перехода от фазы несущей φ_0 к мере расстояний, представляющих высоту h_0 , и является функционалом параметров схемы определения высот, а именно, λ , R_0 и d_{φ} . Рассмотрим ошибки, возникающие в составляющих выражения (9).

Положим, что ошибки обоих компонент выражения (9) аддитивны, и тогда реальные измерения, помеченные штрихом, представим в виде:

$$\varphi'_0/2\pi = \varphi_0/2\pi + d\varphi_0/2\pi, \quad h'_{2\pi} = h_{2\pi} + dh_{2\pi}.$$

Теперь реальные измерения можно записать, развернув выражение (9):

$$h' = (\varphi_0/2\pi)h_{2\pi} + (d\varphi_0/2\pi)h_{2\pi} + (\varphi_0/2\pi)dh_{2\pi} + (d\varphi_0/2\pi)dh_{2\pi} + N_h h_{2\pi} + N_h dh_{2\pi}. \quad (10)$$

Далее удобно рассматривать относительную ошибку измерения высот:

$$dh' = (h' - h)/h_{2\pi} = (d\varphi_0/2\pi) + [(\varphi_0/2\pi) + N_h](dh_{2\pi}/h_{2\pi}) + (d\varphi_0/2\pi)(dh_{2\pi}/h_{2\pi}). \quad (11)$$

Рассматривая члены выражения (11) можно видеть, что последний из них представляет поправку второго порядка малости. Следовательно, на данной стадии оценок потенциальных возможностей схемы измерения высот этот член можно просто не учитывать. Тогда оказывается, что ошибки dh' измерения высоты h определяются двумя основными позициями выражения (11), представляющими собой ошибки определения измеряемой разности фаз φ_0 (первый член выражения (11)), а также погрешности функционала $h_{2\pi}$ (второй оставшийся член).

Рассмотрим первую позицию. Известно, что для измерения разности фаз необходимым условием является когерентность несущих. Это условие в любой системе измерения высот рельефа всегда должно обеспечиваться специальными системными мерами и должно выполняться в любой конкретной схеме формирования пар фазовых измерений наклонной дальности. Далее, богатая практика фазовых измерений в радиотехнике показывает, что погрешности измерения фазы определяются шумовыми и систематическими ошибками. Практически их сумма в хорошо спроектированной системе лежит в пределах от 1 % до 10 % от величины 2π (ориентировочно), и соответствующая абсолютная ошибка измерения высот dh' будет составлять эту долю от величины периода однозначности $h_{2\pi}$.

Отсюда следует, что желаемые абсолютные ошибки определения высот для проектируемой системы сразу определяют ту величину $h_{2\pi}$, которую необходимо обеспечить в схеме измерений для гарантии требуемого качества измерения высот. В первую очередь, это обеспечивается выбором нужного значения эффективной базы $d_{\text{эф}}$ в выражении (8).

Далее, вид оставшегося второго члена выражения (11) показывает, что нужно найти зависимость относительной ошибки функционала $h_{2\pi}$ от параметров λ , R_0 и $d_{\text{эф}}$, которая, в свою очередь, определяется соответствующими производными величины $h_{2\pi}$, определенной выражением (8). Это производные имеют вид:

$$dh_{2\pi}/d\lambda = R_0/d_{\text{эф}}, \quad dh_{2\pi}/R_0 = \lambda/d_{\text{эф}}, \quad dh_{2\pi}/d_{\text{эф}} = -\lambda R_0/(d_{\text{эф}})^2, \quad (12)$$

и они позволяют найти искомые частные относительные ошибки в нормировке по величине $dh_{2\pi}$. Обратившись к значению функционала (8), найдем эти ошибки, и выпишем их:

$$dh_{2\pi}/h_{2\pi} = \Delta\lambda/\lambda; \quad dh_{2\pi}/h_{2\pi} = \Delta R_0/R_0; \quad dh_{2\pi}/h_{2\pi} = -\Delta d_{\text{эф}}/d_{\text{эф}}. \quad (13)$$

Рассматривая выражения (13), можно видеть, что поскольку значение несущей частоты всегда известно с высокой точностью, то и величина λ будет известна с той же точностью. Поэтому ее вкладом в общие ошибки всегда можно пренебречь. Далее, поскольку реальные ошибки определения наклонных дальностей R_0 примерно на два-три порядка меньше самих значений наклонных дальностей, то их влияние также будет незначительным. Исключение могут составлять лишь случаи плохих измерений высот рельефа на небольших наклонных дальностях порядка десятков километров, хотя такой случай представить на практике затруднительно.

В результате можно считать, что и здесь сами ошибки в определении величины $h_{2\pi}$ будут практически определяться относительными ошибками определения значений эффективной базы $d_{\text{эф}}$. Напомним, что величина эффективной базы есть проекция реальной базы на вектор определяемой высоты, а в первом приближении эффективная база может оцениваться как проекция реальной базы на местную вертикаль. Однако величина такой проекции существенно зависит от конкретной пространственной ориентации реальной базы. Например, при совместном полете двух космических носителей РЛС эта ориентация представляет собой динамически меняющийся объект, требующий особого рассмотрения.

В итоге оказывается, что за исключением коэффициента N_h , все остальные параметры в (11), определяющие ошибки измерения высот, находятся в распоряжении разработчика схемы измерений высот. Определение же ошибок конкретного значения N_h (так называемых грубых ошибок неоднозначности) составляет самостоятельную и сложную задачу разрешения неоднозначности периодических многозначных измерений, и выносится за рамки настоящей статьи.

Для иллюстрации типичных соотношений между ошибками измерения высоты h и размерами величин $h_{2\pi}$ и $d_{\text{эф}}$ рассмотрим несколько характерных оценочных ситуаций. Для этого используем случай, определения высот рельефа в космическом радиолокационном обзоре. Для конкретности примем, что $\lambda = 3$ см, $R_0 = 1000$ км, а $N_h = 1$, а желаемые относительные ошибки высот заключены в пределах $dh = (0,01 \div 0,10)h_{2\pi}$. Такие пределы ошибок измерений фазы ориентировочно характеризуют практически весь диапазон возможных случаев приема радиолокационных сигналов – от хорошо

измеримых фаз несущих по сильным сигналам, и до измерений, производимых на пороговых уровнях [5]. Поскольку функционал высоты $h_{2\pi}$ практически определяется величиной эффективной базы $d_{эф}$, то приняв ее за основу будем, изменяя размер $d_{эф}$ шагами, определять остальные характеристики измерений высот.

Получившиеся варианты размеров баз, отношений ($R_0/d_{эф}$), периодов однозначности $h_{2\pi}$ и пределов абсолютных ошибок измерения высот dh' (в линейных мерах) представлены в таблице.

Таблица

Ошибки измерения высоты dh при $R_0 = 1000$ км и $\lambda = 3$ см

$d_{эф}$, м	100	300	1000	3000	10000	30000
$R/d_{эф}$, б/р	10^4	$3,3 \cdot 10^3$	10^3	$3,3 \cdot 10^2$	10^2	$3,3 \cdot 10^1$
$h_{2\pi}$, м	300	100	30	10	3,0	1,0
dh , м	3 ÷ 30	1 ÷ 10	0,3 ÷ 3	0,1 ÷ 1,0	0,03 ÷ 0,3	0,01 ÷ 0,1

Из приведенной таблицы следует, что преобладающим фактором, определяющим и одновременно ограничивающим определение высот рельефа h с точностью на уровне единиц метров, в первую очередь являются значение периода однозначности $h_{2\pi}$, не превышающее сотни метров.

Отсюда следует, что необходимый размер эффективной базы, может быть несколько больше, но, во всяком случае, должен лежать в пределах немногих сотен метров. Также очевидно, что ее относительные ошибки могут составлять значения порядка немногих метров. Таким образом, требуемые ошибки определения координат РЛС как концов базы также могут лежать в этих же пределах.

При системном проектировании комплексов радиолокационного наблюдения это условие вполне обеспечивается при использовании современного в ЕС КВО типа ГЛОНАСС. Необходимо отметить, часто рекомендуемого измерения или управления текущими относительными координатами носителей РЛС РСА с точностями порядка долей длины волны несущей принципиально не требуются. Поэтому разработчику комплекса радиолокационного наблюдения необходимо беспокоиться лишь об использовании подсистемы или способа обеспечения когерентности пары принимаемых сигналов, обеспечивающих измерение наклонных дальностей. Отмеченное обстоятельство пока не нашло своего достаточно ясного отражения в доступной литературе, хотя оно, как вполне очевидно, заслуживает этого.

Литература

1. Реутов А. П., Михайлов Б. А., Кондратенков Г. С., Бойко Б. В. Радиолокационные станции бокового обзора. – М. : Советское радио, 1970. – С. 360 .
2. Буренин Н. И. Радиолокационные станции с синтезированной антенной. – М. : Советское радио, 1972. – 160 с.
3. Верба В. С., Неронский Л. Б., Осипов И. Г., Турук В. Э. Радиолокационные системы землеобзора космического базирования. – М. : Радиотехника, 2010. – 674 с.

4. Krieger G. et al. Interferometric Synthetic Aperture Radar (SAR) Missions Employing Formation Flying // Proc. of the IEEE. – 2010, May. – V. 98. – № 5. – P. 816 – 843.
5. Евграфов А. Е., Поль В. Г. К вопросу космической съемки рельефа земной поверхности радиолокатором с синтезированием апертуры // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. – 2014. – № 4. – С. 44 – 49.
6. Евграфов А. Е., Поль В. Г. Геометрия космического радиолокационного зондирования Земли по технологии синтезированной апертуры и координатная привязка полученных изображений // Вестник НПО им. С. А. Лавочкина. – 2015. – № 2. – С. 14 – 187.
7. Абалакин В. К. Астрономический календарь, постоянная часть. – М. : ГР ФМЛ, 1981. – С. 704.
8. Кокорин В. И., Поль В. Г. Технология радиолокации с синтезом апертуры. Красноярск : СФУ, 2007. – 204 с.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРИЗНАКОВ ТЕКСТУРНОЙ ИНФОРМАТИВНОСТИ КОСМИЧЕСКИХ СНИМКОВ БКА НА ОСНОВЕ КЛАСТЕРНОГО АНАЛИЗА

А. А. Золотой, А. В. Урбанович

(Научно-инженерное республиканское унитарное предприятие
«Геоинформационные системы» НАН Беларуси, г. Минск)

***Аннотация.** Рассмотрены вопросы определения вектора признаков текстурной информативности для космических снимков Белорусского космического аппарата (БКА) с использованием кластерного анализа. Описана методика оценки информативности текстурных признаков для космических снимков БКА. Приведены результаты исследования информативности текстурных признаков и даны рекомендации по их использованию при формировании состава вектора признаков для текстурной декомпозиции космических снимков БКА.*

***Ключевые слова:** дистанционное зондирование Земли, космический снимок, текстура, признак, информативность, информационная энтропия, кластеризация, анализ, декомпозиция.*

Введение

Задача подготовки исходных данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) сверхбольшого размера для тематической обработки в условиях ограниченности вычислительных ресурсов часто возникает перед разработчиками систем анализа и мониторинга аэрокосмической информации. Если раньше объемы поставок аэрокосмической информации не превышали 2 – 4 ГБ вместе с сопутствующими метаданными и могли обрабатываться на современных ПЭВМ, то с появлением формата данных BigGeoTIFF, позволяющим хранить изображения, значительно превышающие 4 ГБ, поставщики аэрокосмических снимков получили возможность предоставлять данные ДЗЗ большего размера, и, соответственно, лучшего разрешения и качества. Сверхбольшой размер получаемой аэрокосмической информации требует специальных программных и технических решений по ее загрузке, хранению и обработке. Современные технические характеристики рабочих станций и суперкомпьютеров позволяют хранить и обрабатывать сверхбольшие объемы данных для имеющихся и перспективных геоинформационных систем. Однако алгоритмические и программные решения, предоставляемые с подобными системами, часто не способны выполнять тематическую обработку сверхбольших объемов данных ДЗЗ либо требуют для этого колоссальных вычислительных и временных ресурсов. Это сказывается на производительности как самого программного комплекса, так и вычислительной среды, в которой он функционирует. При этом из огромного набора данных часто пользователь интересуется только определенным их сегментом, являющийся незначительной частью всего массива исходной информации.

Подготовку исходных данных ДЗЗ сверхбольшого размера целесообразно выполнять с использованием алгоритмов блочно-параллельных вычислений, распределенных в условиях локальной вычислительной системы или высокопроизводительной среды типа суперкомпьютера. Это позволит значительно сократить время подготовки

данных в рамках существующей или перспективной геоинформационной системы. Однако при таком подходе исходная космическая информация должна подвергаться разбиению, или декомпозиции, на блоки заданного размера и с заданными параметрами, которые далее могут рассматриваться в качестве входных данных к алгоритмам блочно-параллельной обработки в условиях распределенных вычислительных систем. За счет использования оценок информативности таких блоков целевой информации (ЦИ), можно сократить общий объем данных, которые необходимо обработать. Оценки информативности могут быть получены из анализа каждого блока ЦИ с целью нахождения объектов, влияющих на информативность блока космической информации, например, облака, тени, помехи снимающей аппаратуры и др.

Декомпозиция данных ДЗЗ сверхбольшого размера позволяет фильтровать космическую информацию, поступающую от существующих и перспективных аэрокосмических аппаратов, с учетом используемых вычислительных ресурсов и технических характеристик многопроцессорных гетерогенных сред. Оценка информативности блоков ЦИ позволят исключать из технологического процесса данные, не несущие информативной нагрузки для задачи тематической обработки.

Частью подготовки космических снимков сверхбольшого размера для тематической обработки является их текстурная декомпозиция, по результатам которой формируется дескриптор в виде файла текстурного метаописания снимка. Дескрипторы текстурной информативности сверхбольших космических снимков содержат метаописание фрагментов снимков, обладающих текстурным сходством (например, леса, луга, поля, торфоразработки, населенные пункты и т. д.). Располагая таким дескриптором, отпадает необходимость обработки всего массива данных космического снимка сверхбольшого размера с целью нахождения областей интереса для тематической обработки, которые на нем могут вообще отсутствовать.

Признаки текстурной информативности

Текстурная информативность растровых изображений количественно выражается текстурными признаками Харалика [0, 0], Лавса [0, 0], SFTA [0, 0] и др. Однако не все текстурные признаки являются информативными для изображений конкретного типа. Исходными данными для выполнения данной работы являлись космические снимки в формате BigGeoTIFF, полученные Белорусским космическим аппаратом (БКА), и подготовленные образцы текстур, выделенные из данных снимков на основе анализа, выполненного вручную. Целью работы, являлось определение предварительного состава вектора текстурной информативности космических снимков БКА.

На первом этапе была выполнена грубая оценка информативности текстурных признаков путем прямой текстурной кластеризации исходных космических снимков. Опытным путем были отобраны текстурные признаки Харалика и Лавса, позволяющие хоть как-то разделять представленные на данных космических снимках однородные текстуры. Кластеризация выборки однородных текстур, полученных из космических снимков БКА, выполнялась методом k -средних.

На втором этапе производился отбор наиболее весомых признаков для формирования предварительного состава вектора текстурной информативности. Состав вектора текстурной информативности выбирался из анализа качества кластеризации однородных текстур, представленных на космических снимках методом k -средних. Качество кластеризации однородных текстур определялось относительной величиной информационной энтропии Шеннона, принимающей значения от 0 до 1. В случае независимых случайных событий x с n возможными состояниями, распределенных с

вероятностями p_i ($i = 1 \div n$) относительная величина информационной энтропии Шеннона вычисляется по формуле [0]:

$$H(x) = \frac{\sum_{i=1}^n p_i \log_2(p_i)}{\log_2(n)}. \quad (1)$$

За независимое случайное событие в данном случае принималось отнесение вектора текстурных признаков, вычисленного при определенном положении скользящего окна анализа изображения к тому или иному кластеру, определяющему тип текстуры (лес, поле и т. п.). Вероятность данного события p_i определялась по формуле:

$$p_i = \frac{k_i}{N}, \quad (2)$$

где k_i – число векторов текстурных признаков, отнесённых к i -му текстурному кластеру; N – общее число текстурных кластеров.

Информационная энтропия характеризует степень неопределённости или непредсказуемости информации. Поэтому, чем ниже энтропия, тем выше будет качество кластеризации текстур на синтезированном изображении. В идеальном случае, когда все текстурные признаки однородной текстуры после кластеризации становятся отнесенными к одному кластеру, текстурные признаки другой однородной текстуры – к другому кластеру и так далее, значение информационной энтропии будет равно нулю. Поэтому, чем ближе вычисленное значение относительной информационной энтропии к нулю, тем более информативным является состав вектора текстурных признаков.

Определение компонентов вектора признаков текстурной информативности для космических снимков БКА производилось путём минимизации среднеквадратического значения относительной информационной энтропии F , вычисляемой при кластеризации группы образцов однородных текстур по формуле:

$$F = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M H_i^2}{M}}, \quad (3)$$

где M – количество образцов однородных текстур в группе; H_i – значение относительной информационной энтропии, вычисленное в результате кластеризации i -го текстурного образца.

Для анализа информативности отобранных текстурных признаков была подготовлена выборка синтезированных изображений размером 128×128 пикселей. Каждое изображение было построено из четырёх фрагментов панхроматических космических снимков БКА, содержащих однородные текстуры разных видов.

Исследование информативности набора из 12 текстурных признаков Харалика производилось путем обработки исходных изображений скользящим окном 13×13 пикселей, в котором вычислялись текстурные признаки Харалика для четырех вариантов смещения пикселей (табл. 1) [2].

Таблица 1

**Рассматриваемые варианты смещений при вычислении
текстурных признаков Харалика**

Вариант смещения пикселей	Сдвиг по строкам (Δr)	Сдвиг по столбцам (Δc)
Соседство справа	0	1
Соседство снизу	1	0
Соседство справа и снизу	1	1
Соседство справа и сверху	-1	1

Квантование уровней яркости матрицы исходного изображения при этом не производилось. В результате для каждого варианта смещения, формировалась матрица нормированных по критерию минимакса признаков Харалика размером $116 \times 116 \times 12$ элементов.

Исследование информативности текстурных признаков Лавса производилось для набора, полученного на основе сверток комбинаций одномерных пятикомпонентных векторных фильтров Лавса (табл. 2) с изображением [3].

Таблица 2

Одномерные векторные фильтры Лавса

Название	Обозначение вектора	Значение
Level Detection	L	[1 4 6 4 1]
Edge Detection	E	[-1 -2 0 2 1]
Spot Detection	S	[-1 0 2 0 -1]
Wave Detection	W	[-1 2 0 -2 1]
Ripple Detection	R	[1 -4 6 -4 1]

Свертки комбинаций одномерных векторных фильтров Лавса с исходным изображением формируют набор из 15 текстурных признаков $T_1 - T_{15}$, образующих верхнюю треугольную матрицу вариантов комбинаций [3]:

	L	E	S	W	R
L	T_1	T_6	T_7	T_8	T_9
E	T_6	T_2	T_{10}	T_{11}	T_{12}
S	T_7	T_{10}	T_3	T_{13}	T_{14}
W	T_8	T_{11}	T_{13}	T_4	T_{15}
R	T_9	T_{12}	T_{14}	T_{15}	T_5

Значения текстурных признаков Лавса $T_1 - T_{15}$, для заданного изображения вычисляются по формулам [3, 4]:

$$\left. \begin{aligned}
T_1 &= \sum |(\mathbf{L}^T \mathbf{L}) \otimes \mathbf{I}|; & T_6 &= \sqrt{\sum ((\mathbf{L}^T \mathbf{E}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{E}^T \mathbf{L}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_2 &= \sum |(\mathbf{E}^T \mathbf{E}) \otimes \mathbf{I}|; & T_7 &= \sqrt{\sum ((\mathbf{L}^T \mathbf{S}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{S}^T \mathbf{L}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_3 &= \sum |(\mathbf{S}^T \mathbf{S}) \otimes \mathbf{I}|; & T_8 &= \sqrt{\sum ((\mathbf{L}^T \mathbf{W}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{W}^T \mathbf{L}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_4 &= \sum |(\mathbf{W}^T \mathbf{W}) \otimes \mathbf{I}|; & T_9 &= \sqrt{\sum ((\mathbf{L}^T \mathbf{R}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{R}^T \mathbf{L}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_5 &= \sum |(\mathbf{R}^T \mathbf{R}) \otimes \mathbf{I}|; & T_{10} &= \sqrt{\sum ((\mathbf{E}^T \mathbf{S}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{S}^T \mathbf{E}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_{11} &= \sqrt{\sum ((\mathbf{E}^T \mathbf{W}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{W}^T \mathbf{E}) \otimes \mathbf{I})^2}; & T_{12} &= \sqrt{\sum ((\mathbf{E}^T \mathbf{R}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{R}^T \mathbf{E}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_{13} &= \sqrt{\sum ((\mathbf{S}^T \mathbf{W}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{W}^T \mathbf{S}) \otimes \mathbf{I})^2}; & T_{14} &= \sqrt{\sum ((\mathbf{S}^T \mathbf{R}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{R}^T \mathbf{S}) \otimes \mathbf{I})^2}; \\
T_{15} &= \sqrt{\sum ((\mathbf{W}^T \mathbf{R}) \otimes \mathbf{I})^2 + \sum ((\mathbf{R}^T \mathbf{W}) \otimes \mathbf{I})^2},
\end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где \mathbf{I} – изображение; \otimes – операция свёртки двух матриц.

Формируя случайные комбинации текстурных признаков Харалика и Лавса, последовательно производилась текстурная кластеризация выборки синтезированных изображений методом k -средних с вычислением функции качества кластеризации. В результате нескольких расчётов кластеризации для каждого синтезированного изображения определялся состав текстурных признаков, обеспечивающий наименьшее значение целевой функции, что соответствовало наилучшему качеству кластеризации текстур на данном изображении. По окончании расчётов для всех подготовленных синтезированных изображений выборки определялись коэффициенты информативности для каждого текстурного признака. Коэффициент информативности текстурного признака рассчитывался в виде суммы взвешенных значений использования (0 – не используется или 1 – используется) данного текстурного признака в лучших комбинациях при кластеризации всех изображений выборки. Весами являлись значения, инверсные наименьшим значениям f целевых функций, которых удавалось достигнуть при кластеризации каждого изображения выборки. Если значение целевой функции f характеризует относительную «загрязнённость» кластеров по результатам кластеризации, то инверсная величина $\bar{f} = 1 - f$ характеризует относительную «чистоту» кластеров. Формула для вычисления коэффициента информативности текстурного признака может быть определена в виде:

$$K = \sum_{i=1}^n (1 - f_i) p_i, \quad (5)$$

где n – размер выборки синтезированных изображений; f_i – наименьшие значения целевой функции, которые удавалось достигнуть при кластеризации каждого изображения выборки (вещественные числа от 0 до 1); p_i – значения использования текстурного признака в комбинациях с которыми достигались наименьшие значения целевой функции (может принимать значения 0 – если текстурный признак не использовался в лучшей комбинации, или 1 – если использовался).

В табл. 3 – 6 приведены коэффициенты информативности текстурных признаков Харалика, вычисленные по лучшим результатам кластеризации пяти изображений выборки для четырёх вариантов смещения пикселей.

Таблица 3

Коэффициенты K информативности текстурных признаков Харалика, вычисленные для варианта смещения $\Delta r = 0, \Delta c = 1$ на основе лучших результатов кластеризации пяти изображений выборки

№	H ₁₂	H ₁₁	H ₁₀	H ₉	H ₈	H ₇	H ₆	H ₅	H ₄	H ₃	H ₂	H ₁	Маска	1 - f
1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	8D5	0,784
2	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	994	0,782
3	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	C94	0,780
4	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1	0	0	CFC	0,765
5	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	BD4	0,755
K	3,866	1,545	0,755	1,537	3,866	2,304	0,765	3,866	0,765	3,866	0,000	0,784		

Таблица 4

Коэффициенты K информативности текстурных признаков Харалика, вычисленные для варианта смещения $\Delta r = 1, \Delta c = 0$ на основе лучших результатов кластеризации пяти изображений выборки

№	H ₁₂	H ₁₁	H ₁₀	H ₉	H ₈	H ₇	H ₆	H ₅	H ₄	H ₃	H ₂	H ₁	Маска	1 - f
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	C80	0,804
2	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	C88	0,800
3	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	D80	0,798
4	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	C84	0,796
5	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	C8C	0,791
K	3,989	3,989	0,000	0,798	3,989	0,000	0,000	0,000	1,591	1,587	0,000	0,000		

По результатам табл. 3 (для смещения пикселей $[\Delta r, \Delta c] = [0 1]$) наибольшую информативность продемонстрировали 3, 5, 8 и 12 признаки, а наименьшую – 2 признак Харалика при среднем значении относительной чистоты кластеров 0,773. Низкую информативность в табл. 3 показали 1, 4, 6 и 10 признаки. В табл. 4 (для смещения пикселей $[\Delta r, \Delta c] = [1 0]$) наибольшую информативность показали 8, 11, 12 признаки, а наименьшую – 1 2 5 6 и 7 признаки Харалика при среднем значении относительной чистоты кластеров 0,798. Низкую информативность в табл. 4 показал 9 признак.

Таблица 5

Коэффициенты K информативности текстурных признаков Харалика, вычисленные для варианта смещения $\Delta r = 1, \Delta c = 1$ на основе лучших результатов кластеризации пяти изображений выборки

№	H ₁₂	H ₁₁	H ₁₀	H ₉	H ₈	H ₇	H ₆	H ₅	H ₄	H ₃	H ₂	H ₁	Маска	1 - f
1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	8D0	0,730
2	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	CD0	0,721
3	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	9B0	0,716
4	1	0	0	1	1	0	1	1	0	1	0	0	9B4	0,714
5	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	CD1	0,708
K	3,589	1,429	0,000	1,430	3,589	2,159	1,430	3,589	0,000	0,714	0,000	0,708		

В табл. 5 (для смещения пикселей $[\Delta r, \Delta c] = [1 1]$) наибольшую информативность показывают 5, 8 и 12 признаки, а наименьшую – 2, 4 и 10 признаки Харалика при среднем значении относительной чистоты кластеров 0,718. Низкую информативность в табл. 5 показали 1 и 3 признаки. В табл. 6 (для смещения пикселей $[\Delta r, \Delta c] = [-1 1]$) наибольшую информативность показал 12 признак, а наименьшую – 1, 2 и 4 признаки Харалика при среднем значении относительной чистоты кластеров 0,643. Высокую

информативность показали 5, 8 и 11 признаки. Низкую информативность в табл. 6 показали 6, 9 и 10 признаки.

Таблица 6

Коэффициенты K информативности текстурных признаков Харалика, вычисленные для варианта смещения $\Delta r = -1, \Delta c = 1$ на основе лучших результатов кластеризации пяти изображений выборки

№	H ₁₂	H ₁₁	H ₁₀	H ₉	H ₈	H ₇	H ₆	H ₅	H ₄	H ₃	H ₂	H ₁	Маска	1 - f
1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	CD0	0,678
2	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	C90	0,676
3	1	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	C94	0,669
4	1	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	C14	0,634
5	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	BE0	0,560
K	3,217	2,657	0,560	0,560	2,583	1,238	0,560	2,657	0,000	1,303	0,000	0,000		

Для обобщения оценок информативности текстурных признаков Харалика по результатам, полученным в табл. 3 – 6, составлена табл. 7, в которой по каждому текстурному признаку приведены коэффициенты информативности, рассчитанные для каждого варианта смещения пикселей. Из табл. 7 видно, что для всех рассматриваемых вариантов смещения пикселей наибольшей текстурной информативностью для космических снимков БКА обладают 8 и 12 признаки Харалика. Хорошей информативностью обладают 5 и 11 признаки. Слабо информативными являются 1, 2, 4, 6 и 10 признаки. Признаки 7 и 9 являются средне информативными. Поэтому при использовании простых алгоритмов кластеризации текстур космических снимков БКА, таких как метод k -средних, в состав вектора текстурных признаков могут быть включены 5, 8, 11 и 12 признаки Харалика для четырех вариантов соседства пикселей (табл. 1).

Таблица 7

Коэффициенты K информативности текстурных признаков Харалика, вычисленные для четырех вариантов смещения пикселей

Смещение	H ₁₂	H ₁₁	H ₁₀	H ₉	H ₈	H ₇	H ₆	H ₅	H ₄	H ₃	H ₂	H ₁
[0 1]	3,866	1,545	0,755	1,537	3,866	2,304	0,765	3,866	0,765	3,866	0,000	0,784
[1 0]	3,989	3,989	0,000	0,798	3,989	0,000	0,000	0,000	1,591	1,587	0,000	0,000
[1 1]	3,589	1,429	0,000	1,430	3,589	2,159	1,430	3,589	0,000	0,714	0,000	0,708
[-1 1]	3,217	2,657	0,560	0,560	2,583	1,238	0,560	2,657	0,000	1,303	0,000	0,000
Ср. знач.	3,665	2,405	0,329	1,081	3,507	1,425	0,689	2,528	0,589	1,868	0,000	0,373

При использовании сложных алгоритмов кластеризации или классификации текстур космических снимков БКА, таких как SVM или нейронные сети, целесообразно использовать еще 3, 7 и 9 признаки Харалика, так как они тоже обладают определенной информативностью для рассматриваемых вариантов соседства пикселей. Эта информативность может оказаться критичной для разделения близких и схожих текстур на космических снимках.

В табл. 8, 9 приведены коэффициенты информативности 15 текстурных признаков Лавса T₁ – T₁₅, вычисленные по лучшим результатам кластеризации пяти изображений выборки. По результатам данных таблиц наибольшую информативность продемонстрировали 3, 4, 5, 13, 14 и 15 признаки Лавса при среднем значении относительной чистоты кластеров 0,812.

Таблица 8

Коэффициенты K информативности текстурных признаков $T_1 - T_8$ Лавса, вычисленные на основе лучших результатов кластеризации пяти изображений выборки

№	T_8	T_7	T_6	T_5	T_4	T_3	T_2	T_1	Маска	$1 - f$
1	0	1	0	1	1	1	0	0	795C	0,723
2	0	0	0	1	1	1	0	0	751C	0,837
3	1	1	0	1	1	1	0	0	74DC	0,814
4	0	0	1	1	1	1	0	0	7A3C	0,902
5	1	0	0	1	1	1	0	0	779C	0,786
K	1,600	1,537	0,902	4,062	4,062	4,062	0,000	0,000		

Таблица 9

Коэффициенты K информативности текстурных признаков $T_9 - T_{15}$ Лавса, вычисленные на основе лучших результатов кластеризации пяти изображений выборки

№	T_{15}	T_{14}	T_{13}	T_{12}	T_{11}	T_{10}	T_9	$1 - f$
1	1	1	1	1	0	0	1	0,723
2	1	1	1	0	1	0	1	0,837
3	1	1	1	0	1	0	0	0,814
4	1	1	1	1	0	1	0	0,902
5	1	1	1	0	1	1	1	0,786
K	4,062	4,062	4,062	1,625	2,437	1,688	2,346	

На рис. приведены результаты кластеризации пяти рассматриваемых синтезированных изображений выборки методом k -средних.

Состав вектора признаков текстурной информативности, использованный при кластеризации, состоял из:

1. Текстурных признаков Харалика [1] для четырех вариантов смещения пикселей (табл. 1):

– корреляция

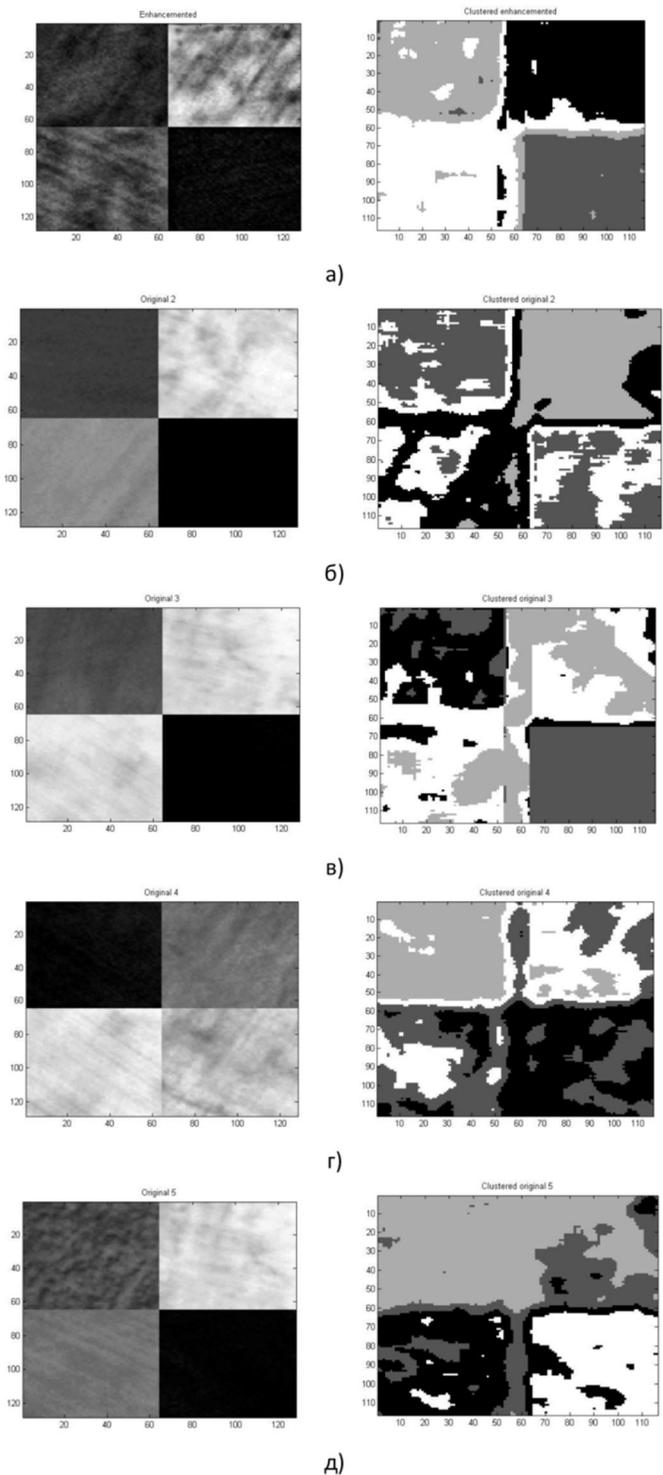
$$H_5 = \frac{\sum_{i,j} (i - \mu_i)(j - \mu_j) P_d(i, j)}{\sigma_i \sigma_j}, \quad (6)$$

$$\sigma_i = \sqrt{\sum_i (i - \mu_i)^2 \sum_j P_d(i, j)}, \quad \sigma_j = \sqrt{\sum_j (j - \mu_j)^2 \sum_i P_d(i, j)},$$

$$\mu_i = \sum_i i \sum_j P_d(i, j), \quad \mu_j = \sum_j j \sum_i P_d(i, j);$$

– нормированное среднее суммы

$$H_8 = \frac{SA}{M}, \quad (7)$$



a)

б)

в)

г)

д)

Результат кластеризации синтезированных изображений

$$SA = \sum_{i=0}^{2M-2} \left((i+2) \sum_{k+j=i} P_d(k, j) \right);$$

– нормированная энтропия разностей

$$H_{12} = \frac{DE}{10}, \quad (8)$$

$$DE = - \sum_{i=0}^{M-1} \left(\sum_{|k-j|=i} P_d(k, j) \log_2 \left(\sum_{|k-j|=i} P_d(k, j) \right) \right),$$

где P_d – матрица вхождений Харалика; σ_i , σ_j – среднеквадратические отклонения сумм, вычисленных по матрице вхождений в направлении строк и столбцов изображения; μ_i , μ_j – средние значения, вычисленные по строкам и столбцам матрицы вхождений; M – число уровней матрицы вхождений; SA – средняя сумма по матрице вхождений; DE – разностная энтропия матрицы вхождений.

2. Текстурных признаков Лавса: T_3 , T_4 , T_5 , T_{13} , T_{14} и T_{15} , вычисляемых по формулам (4).

Среднее значение относительной чистоты кластеров в результате кластеризации пяти изображений выборки на рис. получилось равным 0,786.

Заключение

Работа выполнена НАН Беларуси в рамках задания Государственной программы научных исследований Республики Беларусь «Информатика, космос и безопасность». Произведена оценка информативности текстурных признаков растровых изображений для решения задач, связанных с текстурной декомпозицией космических снимков БКА сверхбольшого размера. Выполнен анализ информативности текстурных признаков и даны рекомендации по формированию состава вектора текстурных признаков для решения задач текстурной кластеризации и текстурной классификации космических снимков БКА.

Литература

1. Haralick R. M. Statistical and structural approaches to texture / R. M. Haralick // Proceedings of the IEEE. – 1979. – Vol. 67. – No. 5. – P. 768 – 804.
2. Haralick R. M. Textural features for image classification / R. M. Haralick, K. Shanmugam, I. Dinstein // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. – 1973. – Vol. 3. – P. 610 – 621.
3. Laws K. I. Rapid texture identification / K. I. Laws // SPIE. – 1980. – Vol. 238. – P. 376 – 380.
4. Suresh Kumar S. Texture Classification Using Wavelet Based Laws Energy Measure/ S. Suresh Kumar, L. Ganesan // International Journal of Soft Computing 3 (4). – P. 293 – 296.

5. Alceu Ferraz Costa. An Efficient Algorithm for Fractal Analysis of Textures / Alceu Ferraz Costa, Gabriel HumpireMamani, Agra Juci Machado Traina // 25th SIB-GRAPI Conference on Graphics, Patterns and Images. – 2012.
6. Ilackiya R. Fractal texture based image classification / R. Ilackiya [et al] // International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2015, September. – Vol. 4. – Issue. 9. – P. 192 – 198.
7. Шеннон К. Э. Работы по теории информации и кибернетике. – М., 1963. – 829 с.

АПРИОРНАЯ ОЦЕНКА КИНЕМАТИЧЕСКИХ СМЕЩЕНИЙ И ПОГРЕШНОСТЕЙ КООРДИНАТ ТОЧЕК ИЗОБРАЖЕНИЯ ПРИ СКАНЕРНОЙ СЪЕМКЕ ЗЕМЛИ С КА

В. Я. Геча, М. Ю. Жилень, А. О. Бабаков
(АО «Корпорация «ВНИИЭМ», г. Москва)

***Аннотация.** Свойство бортовой оптико-электронной аппаратуры (БОЭА) ДЗЗ при орбитальной съемке Земли передавать контраст изображения характеризует функция передачи модуляции (ФПМ) изображения, полученного космической системой. Причем ФПМ «смаза» изображения при космическом ДЗЗ является наиболее сложно прогнозируемой. Показан способ априорной оценки ФПМ «смаза» изображения в ОЭА от скорости его движения при использовании минимального набора данных об орбите КА и его БОЭА ДЗЗ. Проведены оценки значений скорости движения изображения по краям фокальной плоскости при надирной съемке и при вариации углов крена и рыскания, а также – оценки ФПМ «смаза».*

***Ключевые слова:** оптико-электронная аппаратура, космический аппарат, скорость движения изображения (СДИ), дистанционное зондирование Земли, функция передачи модуляции «смаза» изображения.*

На ранних стадиях проектирования космических систем (КС) ДЗЗ одним из важных направлений разработок, связанных с оценкой эффективности таких комплексов, является комплексная априорная оценка влияния статических и кинематических параметров орбитальной съемки Земли на геометрические искажения, смещения и функцию передачи модуляции (ФПМ) «смаза» первичного изображения, формируемого только бортовой оптико-электронной аппаратурой (БОЭА) ДЗЗ без преобразований. При этом оценка геометрического качества и ФПМ «смаза» первичного изображения для условий съемки «в надира» позволит определить тот максимум качества изображения, который можно ожидать от КС ДЗЗ. Отклонения от надира ОЭА ДЗЗ очевидно, приведут только к снижению указанных качеств изображения Земли, а их расчет и анализ требуют больших затрат.

Однако, при создании перспективных КС ДЗЗ, частью которой является и КА с его оборудованием, бывают случаи, когда проектируемый КА оснащается БОЭА наблюдения Земли, основанной на тех принципах, которые до этого не применялись для орбитального ДЗЗ, или когда из параметров БОЭА ДЗЗ известен только самый минимальный набор из ее фокусного расстояния, размеров фокальной поверхности (ФП) и пикселя дискретного приемника излучения (ПИ).

При этом известно [1], что рассогласование вектора скорости движения изображения (СДИ) по ФП ОЭА с потребным во время текущей съемки приводит к кинематическому направленному «смазу», то есть росту ФРТ и снижению ФПМ формируемого изображения, снижению отношения сигнал/шум (С/Ш) на выходе ПИ БОЭА [2], неодинаковыми значительным смещениям отображаемой поверхности по его полю, к интегральным геометрическим искажениям первичного снимка до его стандартных и других коррекций [3 – 5], а следовательно – к снижению эффективности съемки с КА. В свою очередь, это приводит к снижению реальной эффективности и произво-

дительности КА и КС ДЗЗ в целом в части получения снимков с заданными разрешением и детальностью в заданное время и других основных характеристик КС [5, 6].

Кроме прочего, при оценках КА и КС ДЗЗ следует учитывать, что результаты съемки при ДЗЗ орбитальными средствами обычно используются потребителями в виде растровых условных кадров (УК), которые формируются массивами фотозон ПИ фокальной плоскости ОЭА не одновременно, а при сканировании земной поверхности за заданный интервал времени. Реже используются целые протяженные во времени растровые маршруты съемки (МС), которые формируются в виде общего поля пикселей нескольких виртуальных УК за заданный интервал времени и из которых при обработке «вырезаются» стандартные УК, передаваемые пользователям. Соответственными должны быть и анализируемые интервалы времени действия факторов орбитальной съемки Земли.

Поэтому следует иметь в виду, что во время орбитальной съемки Земли ее вращение, орбитальное движение КА и его вращения вокруг собственного центра масс (ц. м.) порождают параллелограмм векторов, формирующие составляющие вектора СДИ точек на ПИ ФП БОЭА ДЗЗ. При этом данные параллелограммы СДИ в пределах ширины полосы захвата (ШПЗ), УК и МС могут значительно изменяться, что приводит к соответствующим изменениям указанных выше характеристик изображения и его разрешения. А так как УК и МС – это те основные единицы растрового изображения, которые формируются, оцениваются по их качествам и используются в ДЗЗ, то для данных единиц и следует производить оценки действующих параметров и оцениваемых качеств результирующих первичных растровых изображений, которые получатся средствами КК ДЗЗ. Естественно, чем больше протяженность по времени МС (УК), тем больше могут накапливаться погрешности отработки режима съемки системами КА и его БОЭА ДЗЗ, что накладывает требования к их точности и стабильности.

Поэтому важными задачами при проектировании КК ДЗЗ являются оценки влияния смещений точек изображения в БОЭА ДЗЗ и за время экспозиции ПИ БОЭА ДЗЗ и за интервал времени формирования соответствующих примерно квадратных УК соответствующего покрытия земной поверхности, сторона которого обычно примерно равна ШПЗ БОЭА ДЗЗ при заданных условиях съемки Земли.

Следовательно, исходя из обеспечения необходимых заданных требований к ТТХ КС ДЗЗ при достаточной спектральной облученности ПИ БОЭА КА с одной стороны, и исходя из ограничений по исходным данным, указанным выше, проектирование КК ДЗЗ необходимо производить при анализе, как минимум:

1) допустимости на интервале времени съемки МС расчетного параллелограмма составляющих векторов СДИ по ФП БОЭА ДЗЗ, порождаемого движениями осей КА и собственными скоростями снимаемых точек земной поверхности;

2) согласованности и допустимости векторов СДИ, смещений изображения и ФПМ «смаза» по соответствующей оси ФП в пределах данного УК или МС.

Исходя из данных предпосылок, в настоящей разработке представлен способ, с помощью которого при минимальном наборе исходных данных о параметрах БОЭА ДЗЗ, о ее носителе (КА, служебной платформе) и их взаимодействии во время «надирной» орбитальной съемки Земли можно произвести упрощенную априорную оценку величин:

а) смещения изображения по фотозонам БОЭА ДЗЗ за заданный интервал времени;

б) вклада смещений первичного изображения земной поверхности в ФПМ «смаза» изображения и без учета зависящих от них координат изображения в фотозонах БОЭА ДЗЗ.

При минимальном наборе исходных данных об орбите КА, таких как 6 кеплеровых элементов, и о его ОЭА ДЗЗ, величины проекций V_x и V_y вектора $V_{\text{СДИ}}$ в ОЭА ДЗЗ при «надирной» съемке можно вычислить с использованием системы уравнений из [8]:

$$V_x = \frac{an(1 + e \cos \vartheta)}{u\sqrt{1 - e^2}} - \frac{f_{o\phi}n(1 + e \cos \vartheta)^2}{(1 - e^2)^{\frac{3}{2}}} + \omega \left(y \sin i \sin(g + \vartheta) + f_{o\phi} \cos i + \frac{R \cos i}{u} \right), \quad (1)$$

$$V_y = -\omega \sin i \left(x \sin(g + \vartheta) - f_{o\phi} + \cos(g + \vartheta) - \frac{R \cos i(g + \vartheta)}{u} \right)$$

где a – большая полуось орбиты КА; n – среднее движение спутника по орбите; e – эксцентриситет орбиты; ϑ – истинная аномалия; g – аргумент перигея; $f_{o\phi}$ – фокусное расстояние (ФР) БОЭА; i – наклонение орбиты; R – радиус-вектор КА; ω – угловая скорость вращения Земли; x, y – координаты на ФП БОЭА по осям абсцисс и ординат. Значения элементов орбиты на время съемки рассчитываются по известным формулам, изложенным, например в [9], и множестве других.

Для оптико-электронной съемки высокого разрешения при вычислении ФПМ «смаза» необходимо использовать зависимости, которые учитывают возможный разворот фотоприемника относительно вектора СДИ. Для этого в качестве первого приближения можно использовать формулу расчета ФПМ «смаза» из [1]:

$$T_{lm}(v', a) = \frac{\sin[\pi a v' \cos(\alpha - \gamma)]}{\pi a v' \cos(\alpha - \gamma)}, \quad (2)$$

где γ – угол разворота оси дискретного фотоприемника по отношению к вектору СДИ; v' – пространственная частота; α – угол ориентации миры. При линейном движении точка изображения смещается на $a = vt_e$, где v – скорость движения изображения, которая находится по (1) в виде V_x и V_y , а t_e – время экспозиции.

Из формулы (2), кроме прочего, видно, что если на заданный момент времени формирования изображения дискретными фотоприемниками ПЗС (ФПЗС) ОЭА ДЗЗ значение $a = vt_e$, или угла γ значительно отличаются от требуемых при управлении КА, то это будет соответствовать рассинхронизации в управлении ФПЗС, например вследствие нарушений взаимодействия между управлением ориентацией и стабилизацией осей КА и управлением средствами его ОЭА ДЗЗ.

Основные источники искажений изображения, его смещений, «смаза» и ухудшения качества представлены довольно широко [3 – 5]. В случае космической съемки Земли угол γ в (2) практически соответствует систематической погрешности наведения (разворота от заданного положения) осей БОЭА ДЗЗ, которые связаны с фотозонной ФПЗС, относительно заданной номинальной проекции вектора СДИ при данной съемке. В свою очередь, погрешность наведения осей фотозоны ФПЗС включает в себя множество статических и кинематических источников. Среди них при проектировании КС ДЗЗ высокого разрешения можно выделить несколько регулируемых, ключевых параметров, неверный расчет и отработка которых может привести к тому, что на разных участках ФП ОЭА будут значительно разные значения СДИ, и они будут отличаться от потребных. Основными при этом, как правило, являются:

- а) кинематический закон сканирования МС на земной поверхности проекциями ФПЗС БОЭА ДЗЗ, заданный в бортовой комплекс управления (БКУ) КА;
- б) погрешность знания эффективного ФР БОЭА ДЗЗ при данной съемке;
- в) погрешности отработки во времени съемки заданных угловых скоростей и ускорений при программных угловых движениях (ПУД) осей МКА и наводимых осей ФПЗС БОЭА относительно поверхности Земли на интервале времени съемки УК и МС.

В свою очередь, в наведение осей КА и ФПЗС БОЭА ДЗЗ относительно поверхности Земли входят погрешности:

1) знания взаимного углового положения ФПЗС БОЭА и базовой системы координат (СК) системы ориентации и стабилизации (СОС) МКА, за которую обычно принимается приборная СК (ПСК) одного из датчиков данной системы;

2) несанкционированных разворотов осей КА относительно МС на Земле из-за отклонений во времени отработки их заданных ПУД в комплексе с отклонением в векторе состояния КА на орбите от расчетных значений, заданных для интервала времени конкретного МС в маршрутном полетном задании (МПЗ), заложенном в БКУ с Земли или другим образом, то есть из-за погрешностей координатно-временной привязки задания и отработки ПУД осей КА относительно точки в геодезической СК и шкалы Всемирного времени UTC.

В любом случае, при задании и отработке параметров режимов съемки Земли всегда имеются статические и кинематические факторы, их дрейфы, случайные, методические и компенсированные и некомпенсированные систематические погрешности величин [1, 4, 5, 10 – 13], задаваемых для съемки конкретного МС на Земле, в том числе, в части наведения осей БОЭА ДЗЗ на МС на Земле. То же относится к отработке МПЗ средствами КА и БОЭА.

При этом, значительно влияющую приблизительную величину систематической погрешности угла разворота γ фотозон ПИ относительно вектора СДИ для расчета ФПМ «смаза» по (2) можно вычислять исходя из того, что развороты осей КА и его БОЭА ДЗЗ при съемке МС обычно задаются в МПЗ и могут производиться с коррекциями по калибровкам бортовых средств КА и его ОЭА или без них.

Если не производятся калиброванные коррекции составляющих погрешности наведения (наихудший случай), то систематическая погрешность угла разворота (наведения) ФПЗС, например вокруг главной оптической оси БОЭА ДЗЗ, из-за систематической погрешности смещения бортовой шкалы времени δt на интервале времени Δt УК или МС и других систематических погрешностей на данном интервале наиболее простом виде [13] может быть представлена в виде:

$$\delta\gamma = \delta\gamma_0 + \delta\omega \cdot \delta t + \frac{\varepsilon \cdot \delta t^2}{2}, \quad (3)$$

где: ω – систематическая погрешность угловой скорости разворота МКА при съемке; ε – угловое ускорение разворота БСК СОС; $\delta\gamma_0$ – систематическая погрешность определения (знания) начального значения угла разворота оси ФПЗС относительно вектора СДИ; δt – время экспозиции. Вычисление угла γ для подстановки в (2) производится по формуле:

$$\gamma = \gamma_0 + \delta\gamma. \quad (4)$$

В табл. 1 даны расчетные значения $\delta\gamma$ от δt . При этом были приняты следующие исходные данные для расчета: $\delta\gamma_0 = 3,5$ угл. с; погрешность угловой скорости $\delta\omega = 0,10$ °/с; программное угловое ускорение вращения БСК СОС $\varepsilon = 1,3 \times 10^{-4}$ °/с².

Таблица 1

Зависимость $\delta\gamma$ от δt (интервал от 0 до 160 мс)

δt , мс	$\Delta\gamma$, "	δt , мс	$\Delta\gamma$, "	δt , мс	$\Delta\gamma$, "	δt , мс	$\Delta\gamma$, "
0	3,50	50	21,50	100	39,50	150	57,50
10	7,10	60	25,10	110	43,10	160	61,11
20	10,70	70	28,70	120	46,70		
30	14,30	80	32,30	130	50,30		
40	17,90	90	35,90	140	53,91		

Из табл. 1 видно, что при росте интервала времени накопления погрешность угла разворота $\delta\gamma$ может расти в отсутствие ее коррекций. Например, при времени экспозиции в 160 мс значение $\delta\gamma$ для снимаемого УК изображения Земли может составить ≈ 61 угл. с. Подставляя в (2) $\delta\gamma$ из табл. 1, можно рассчитать ФПМ «смаза» на заданный момент УК.

Аналогично, вычислив по (1) СДИ, по (2) получим ее влияние на ФПМ «смаза».

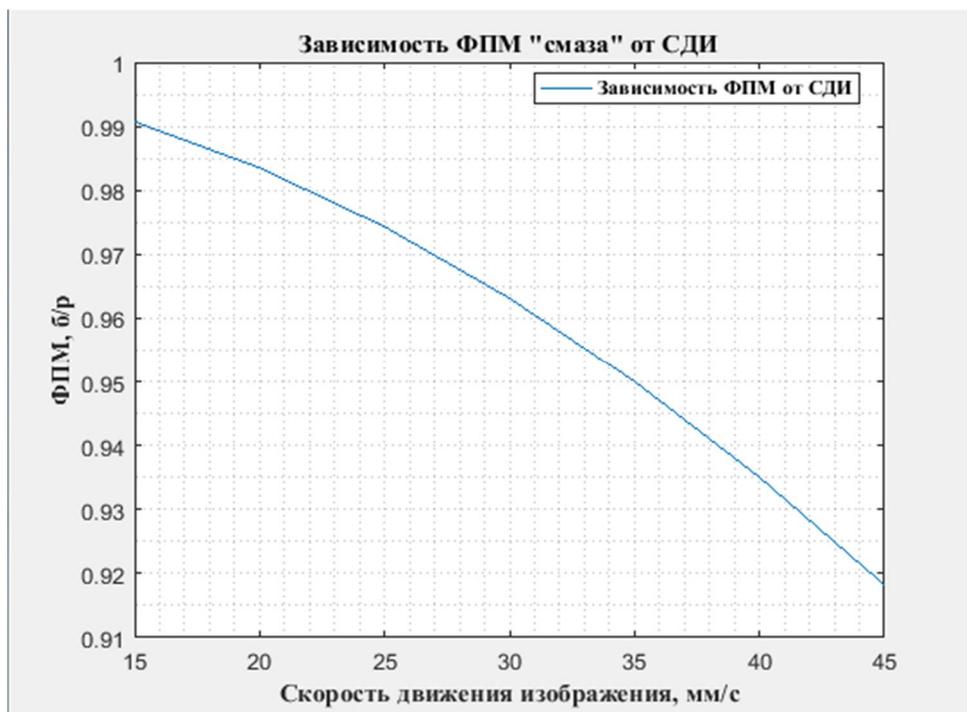


Рис. 1. Зависимость ФПМ от СДИ ($V_{\text{СДИ}} = 15...45$ мм/с)

На рис. 1 приведен график зависимости ФПМ «смаза» от СДИ при варьировании значения СДИ при пространственной частоте 300 лин/мм. Из него видно, что при размахе СДИ 30мм/с изменения ФПМ составили более 0,07, что подтверждает достаточно значительное влияние диапазона фактических СДИ в БОЭА ДЗЗ на ФПМ «смаза». Расчет про-

водился при условии съемки Земли в наدير, так как система уравнений (1) служит для этих целей.

Для учета ракурсов космического ДЗЗ при участии соавторов [7], был создан также программный комплекс (ПК), основной задачей которого является моделирование векторов СДИ по ФП БОЭА при наклонной съемке эллиптической Земли при тех же входных параметрах. С его помощью получены расчеты, сведенные в табл. 2 и 3.

Таблица 2

СДИ при высоте полета КА $H_S = 349$ км и различных углах крена и рыскания

Углы КА, град.			Скорость движения изображения, мм/с			Разница между краями, мм/с		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Крен	Тангаж	Рыскание	Слева	Центр	Справа	5 – 4	5 – 6	6 – 4
0	0	0	41,116	41,118	41,116	0,002	0,002	0,000
0	0	2,2	41,116	41,118	41,116	0,002	0,002	0,000
30	0	0	36,204	35,293	34,376	-0,911	0,917	-1,828
30	0	2,2	36,204	35,293	34,376	-0,911	0,917	-1,828
-30	0	0	34,691	35,672	36,518	0,981	-0,846	1,827
-30	0	2,2	34,691	35,672	36,518	0,981	-0,846	1,827

Таблица 3

СДИ при высоте полета КА $H_S = 516$ км и различных углах крена и рыскания

Углы КА, град.			Скорость движения изображения, мм/с			Разница между краями, мм/с		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Крен	Тангаж	Рыскание	Слева	Центр	Справа	5 – 4	5 – 6	6 – 4
0	0	0	20,211	20,496	20,211	0,285	0,285	0,000
0	0	2,2	20,146	20,496	20,146	0,350	0,350	0,000
30	0	0	17,713	17,476	16,777	-0,237	0,699	-0,936
30	0	2,2	17,662	17,476	16,731	-0,186	0,745	-0,931
-30	0	0	16,777	17,475	17,713	0,698	-0,238	0,936
-30	0	2,2	16,731	17,475	17,662	0,744	-0,187	0,931

Как видно из табл. 2 и 3, СДИ между центром и краями и, тем более, двумя краями ФП БОЭА расходятся при обеих высотах H_S . Это приводит к разностям смещений изображения по полю ФП БОЭА и ФПМ «смаза» примут очень разные значения, что повлияет на разность качеств изображения по его полю. Из сравнения табл. 2 и 3 видно, что при увеличении H_S растет влияние разворота по рысканию (вокруг оптической оси БОЭА).

На рис. 2 представлен вид одного из выходных отчетов, генерируемых ПК для анализа выходных данных.

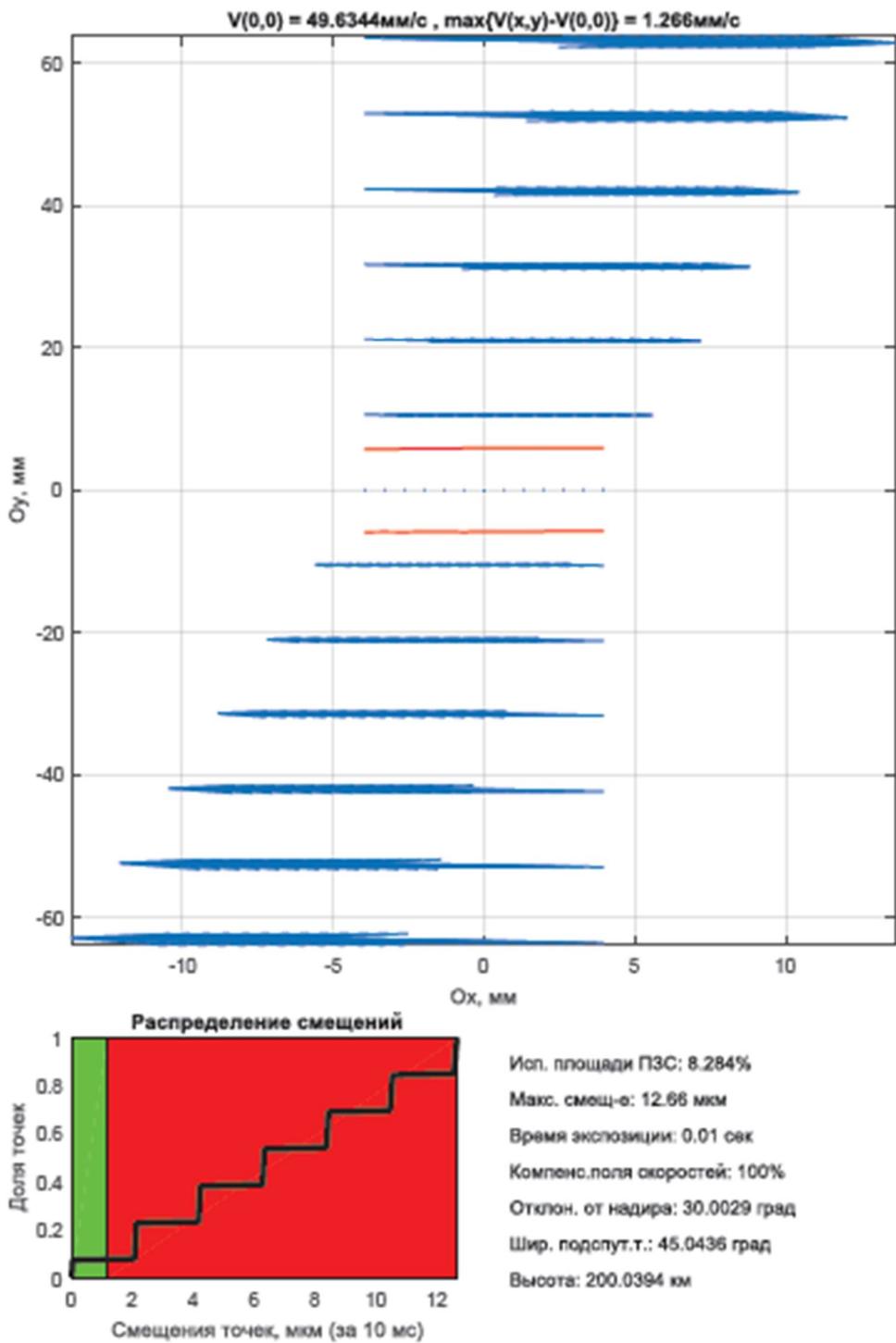


Рис. 2. Вид выходного отчета программного комплекса

Как видно из графического представления ФП БОЭА, на нем представлено поле СДИ на фокальной плоскости. В области, ограниченной красной линией, «смаз» изображения удовлетворяет критерию смещения за время накопления меньше $1/3$ пикселя ФПЗС, который задается в ПК. Из рис. 2 видно, что разработанный ПК имеет несколько анализаторов влияния векторов СДИ на количественные показатели смещений изображения. В фрейме «Распределение смещений» графически показана гистограмма смещения изображения по фокальной плоскости.

Кроме показанных анализаторов, в ПК имеются и другие, а также вычисляется ФПМ «смаза» по полю ФП БОЭА.

Выводы

Цифровые оптико-электронные космические системы ДЗЗ имеют ряд особенностей, которые должны быть учтены в процессе их проектирования при оценке разрешающей способности получаемых с их помощью данных ДЗЗ. Для этого необходим соответствующий вычислительный инструмент, позволяющий при заданном отношении С/Ш на выходе БОЭА КА оценить его снижение из-за действия ФПМ.

В данной статье показаны подходы и программный комплекс для приближенной априорной оценки качеств данных ДЗЗ, которая может применяться на начальных стадиях проектирования КА ДЗЗ. Показано, что при известном отношении С/Ш на выходе БОЭА для данных целей первоначально можно использовать минимальный набор данных об орбите КА и о ее БОЭА ДЗЗ, а также критерии смещения изображения и ФПМ его «смаза».

Литература

1. Бетенски Э., Хопкинс Р., Шеннон Р. Проектирование оптических систем. – М. : Мир, 1983. – 431 с.
2. Сикорский Д. А. Метод оценки пороговой частотно-энергетической характеристики оптико-электронного тракта // Исследовано в России: Электронный журнал. – <http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2003/112.pdf>. – С. 14.
3. John A. Richards, Xiuping Jia. Remote Sensing Digital Image Analysis. An Introduction. 4th Edition With 197 Figures. © Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
4. Макриденко Л. А., Волков С. Н., Геча В. Я., Жилнев М. Ю., Казанцев С. Г. Основные источники снижения качества изображений Земли, получаемых при орбитальной оптической съемке с борта МКА // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2018. – Т. 160. – № 5. – С. 3 – 19.
5. Jacobsen K. Characteristics of very high resolution optical satellites for topographic mapping. Leibniz University Hannover, Institute of Photogrammetry and Geoinformation jacobsen@ipi.uni-hannover.de. Commission I, WG I/4.
6. Жилнев М. Ю., Винтаев В. Н. Формула расчета движения изображения при орбитальной съемке планет оптико-электронной аппаратурой // Телекоммуникации (Telecommunications). – 2011. – № 7.
7. Геча В. Я., Жилнев М. Ю., Федоров В. Б., Хрычев Д. А., Худак Ю. И., Шатина А. В. Скорость движения изображения при оптико-электронной съемке поверхности планеты // Российский технологический журнал. – 2018. – Т. 6. – № 4.
8. Крылов В. И. Космическая геодезия. – М. : Недра, 2002. – 170 с.
9. Захаров А. И., Прохоров М. Е., Тучин М. С., Жуков А. О. Минимальные технические характеристики звездного датчика ориентации, необходимые для достижения

заданной погрешности // *Астрофизический бюллетень*. – 2013. – Т. 68. – № 4. – С. 507 – 520.

10. МИ 1317 – 2004. Методические указания. ГСОЕИ. Результаты и характеристики погрешности измерений. Формы представления. Способы использования при испытаниях образцов продукции и контроле их параметров.

11. МИ 1730 – 87. Методические указания. ГСОЕИ. Погрешности косвенных измерений характеристик процессов. Методы расчета.

12. МИ 2083 – 90 Рекомендация. ГСОЕИ. Измерения косвенные. Определение результатов измерений и оценивание их погрешностей.

13. Лебедев В. В., Гансвинд И. Н. Проектирование систем космического мониторинга. – М. : Наука, 2010. – С 388.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ РАСПОЗНАВАНИЯ СОСТОЯНИЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ПО ДАННЫМ АЭРОФОТОСЪЕМКИ

В. В. Ганченко, А. А. Дудкин

*(Объединенный институт проблем информатики,
г. Минск, Республика Беларусь)*

***Аннотация.** В данной работе рассматривается задача распознавания состояния сельскохозяйственной растительности по данным аэрофотосъемки различного пространственного разрешения. В качестве основы для распознавания используется классификатор, позволяющий осуществлять классификацию входного изображения на три класса: «здоровая растительность», «пораженная растительность» и «почва». Предложенный классификатор строится из двух сверточных нейронных сетей, позволяющих выполнять классификацию на два класса: «здоровая растительность» и «пораженная растительность», «растительность» и «почва».*

***Ключевые слова:** сверточная нейронная сеть, аэрофотосъемка, сельскохозяйственная растительность.*

Введение

Развитие точного земледелия предполагает наличие точной и оперативно обновляемой информации о состоянии растительности и почвы. Получение подобной информации возможно только при использовании дистанционного зондирования. Дистанционные методы мониторинга сельскохозяйственных полей дают возможность оперативно выявить пораженные болезнью участки растительности. Выявление заболеваний на ранних стадиях развития позволяет оперативно и с минимальными затратами локализовать и вылечить заболевание. Выделяют два основных подхода к решению задачи выявления пораженных участков – спектрометрический и оптический [1 – 7]. Спектрометрический подход позволяет определять многие заболевания на ранних стадиях развития. Однако, этот подход требует наличия многоспектрального съемочного оборудования, что не всегда возможно.

Использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) является эффективным методом сбора данных на местах. Использование БПЛА в сельском хозяйстве быстро распространяется, так как является более дешевым при более высокой по сравнению со спутниками оперативностью [8 – 9]. БПЛА предоставляют визуальную информацию о больших площадях сельскохозяйственных культур максимально быстро, что позволяет руководителям хозяйств принимать оперативные решения. Полученные изображения затем могут быть импортированы в базу данных ГИС для дальнейшей обработки и анализа.

Одним из наиболее успешных методов используемых при обработке аэрофотоснимков растительности является использование искусственных нейронных сетей [10].

В данной статье используется подход, основанный на использовании сверточных нейронных сетей (СНС). Сверточные сети успешно используются при решении различных задач точного земледелия.

В работах [11 – 13] показано выделение сорняков на полях с точностью выше 90 %, на данных, получаемых от робота, с использованием СНС как для классификации объектов, так и для семантической сегментации.

В [14] применены для классификации посевов (хотя они и составляют только часть искомым классов) по данным высотной аэрофотосъемки. При этом авторам удалось достичь точности около 89%, что превышает аналогичные показатели для SVM.

Очень широкое применение СНС нашли и в задаче классификации заболеваний растительности. Так работы [15 – 18] описывают использование СНС для классификации аномалий развития и заболеваний различных культурных растений с точностью, превышающей 90 %. Однако основной проблемой этих работ является то, что классификация, позволяя определить заболевание, требует наличия изображений отдельных листьев. Это значительно ограничивает применение этих результатов для получения карт пораженной растительности, так как подготовка таких карт требует оценки состояния растительной массы, а не каждого листика в отдельности.

Представленная работа фокусируется на распознавании участков растительности, состояние которой изменилось под влиянием заболевания. При этом классификация самого заболевания на таких участках на данном этапе не производится.

Объектом исследования являются цветные изображения сельскохозяйственных полей.

Цель работы состоит в разработке алгоритмов обработки цветных изображений растительных покровов, полученных с помощью цифровой съемки различного пространственного разрешения, а также их реализации в виде программных средств для систем компьютерного зрения.

Постановка задачи

Задачей исследования является разработка алгоритма преобразования $A: I_{orig} \rightarrow I_{result}$, позволяющего получить из исходного изображения сельскохозяйственного поля I_{orig} такое изображение I_{result} , каждый пиксель $I_{result}(x, y)$ которого получен из соответствующего пикселя изображения $I_{orig}(x, y)$, либо его окрестности. Каждый пиксель изображения I_{orig} соответствует точке в пространстве RGB. Каждый пиксель $I_{result}(x, y)$ соответствует одному из трех классов («здоровая растительность», «пораженная растительность» и «почва»).

Задачи классификации заболеваний растительности и поиска сорной растительности в данном исследовании не решались.

Материалами для исследований явились фотографии отдельных растений (около 3000) и экспериментального участка поля, засаженного картофелем (827 снимков разрешением 3474×2314 пикселей). Последние выполнялись с высоты 5, 15, 50 и 100 м [19 – 20]. Для получения данных небольшой участок поля был выделен при помощи четырех квадратных меток. Длина стороны квадрата равна одному метру, также на метку нанесены две черных линии шириной 20 см, при пересечении дающие крест. Наличие этих меток позволяет не только определять участок для исследований, но и вычислять пространственное разрешение снимков.

Наблюдению подвергались 3 группы растений:

- растения, зараженные болезнью из группы *alternaria*;
- растения, зараженные бактериальной болезнью *erwinia*;
- здоровые растения (контрольная группа).

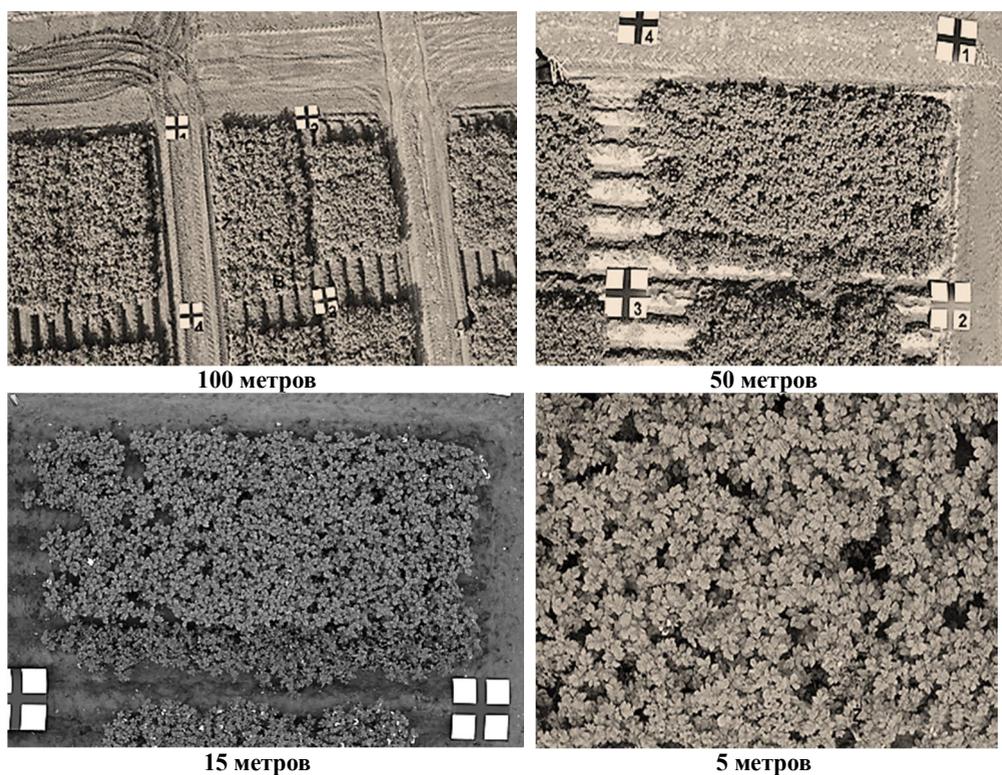


Рис. 1. Примеры исходных аэрофотоснимков

Исходные данные

Съемка растений проводилась ежедневно в 8, 10, 12, 14 и 16 часов на протяжении 8 дней июля.

В результате развития указанных заболеваний происходит разрушение хлорофилла в листьях картофеля, что приводит к изменению цвета растения. Необходимо отметить, что в ясную погоду, создаваемые солнцем блики на листьях также создавали эффект их пожелтения. Это вносило дополнительную ошибку при автоматической обработке.

Описание проблемы

Анализ цветовых характеристик различных типов объектов на базе их гистограмм показывает заметное их различие для почвы и растительности (для всех цветовых каналов), а также различие по синему каналу для здоровых и больных растений. К примеру, для изображений здоровой, пораженной заболеванием растительности и почвы на соответствующих гистограммах, приведенных на рис. 2, *a – в*, можно увидеть, что гистограмма почвы отличается от гистограмм растительности на каждом цветовом канале, а гистограммы каналов здоровой и пораженной растительности отличаются по форме. На рис. 2 гистограммы цветовых каналов (сплошные линии) соответствуют гистограммам красного канала, пунктирные – зеленого, штриховые – синего.

Однако наличие в выделенном участке изображений объектов нескольких типов приводит к искажению нормализованной редуцированной гистограммы идеального типового объекта – смещение и искажение пика гистограммы (рис. 2, *з*).

Подобные искажения, а также значительное подобие цветовых характеристик здоровой и пораженной заболеваниями растительности требуют информации о структуре изображений различных классов для их распознавания. Структурная информация может быть учтена при использовании СНС в качестве основы для алгоритма.

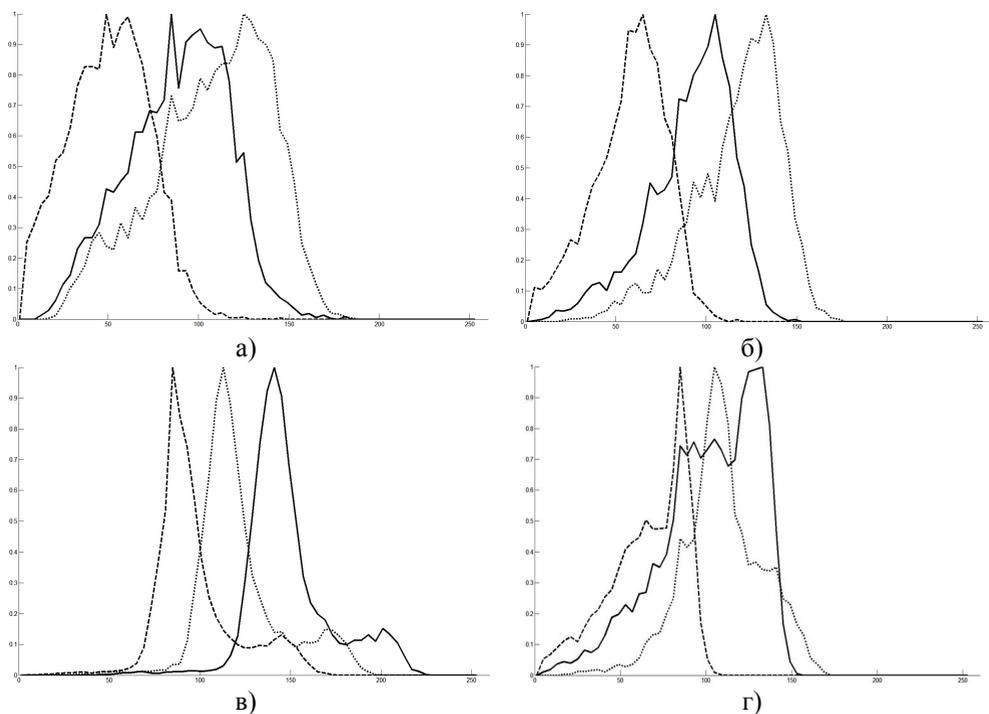


Рис. 2. Гистограммы: а – «пораженные заболеванием растения»; б – «здоровые растения»; в – «почва»; з – искаженная гистограмма изображения, содержащего почву и растительность

Классификатор «растительность – почва»

Классификатор «растительность – почва» $A_{p,s}$ представляет собой сверточную нейронную сеть (СНС) [21], осуществляющую классификацию входного изображения на два класса – «растительность» и «почва». В связи со значительными различиями в цветовых характеристиках этих двух классов данный классификатор не требует сложной структуры.

СНС имеет следующую структуру (параметры сети были выбраны эмпирически):

- размер входного слоя: $33 \times 33 \times 3$;
- сверточный слой № 1: размер фильтра = 3, количество фильтров = 4;
- сверточный слой № 2: размер фильтра = 3, количество фильтров = 8;
- полносвязный слой: количество нейронов = 16;
- выходной слой: количество нейронов = 2 (соответствуют классам «растительность» $A_{p,s}(C_p)$ и «почва» $A_{p,s}(C_s)$).

Обучение:

- размер обучающей выборки: 110528 изображений;
- размер валидационной выборки: 27632 изображений (20 % общей базы);
- результирующая точность на валидационной выборке: 96,9 %.

Обучающая выборка была получена путем «нарезки» имеющихся аэрофотоснимков с размеченными участками. При этом нарезались участки размером 32, 64 и 128 пикселей с перекрытием и добавлением поворотов на углы кратные 90°.

Классификатор «здоровая – пораженная растительность»

Классификатор «здоровая – пораженная растительность» $A_{h;d}$ также представляет собой СНС, осуществляющую классификацию входного изображения на два класса «здоровая растительность» и «пораженная растительность». В связи со значительными различиями в цветовых характеристиках этих двух классов данный классификатор потребовал более сложной структуры.

СНС имеет следующую структуру (параметры сети также были выбраны эмпирически):

- размер входного слоя: $33 \times 33 \times 3$;
- сверточный слой № 1: размер фильтра = 3, количество фильтров = 32;
- сверточный слой № 2: размер фильтра = 3, количество фильтров = 32;
- сверточный слой № 3: размер фильтра = 3, количество фильтров = 32;
- сверточный слой № 4: размер фильтра = 5, количество фильтров = 64;
- полносвязный слой № 1: количество нейронов = 128;
- полносвязный слой № 2: количество нейронов = 128;
- выходной слой: количество нейронов = 2 (соответствуют классам «здоровая растительность» $A_{h;d}(C_h)$ и «пораженная растительность» $A_{h;d}(C_d)$).

Обучение:

- размер обучающей выборки: 22244 изображений;
- размер валидационной выборки: 5560 изображений (20 % общей базы);
- результирующая точность на валидационной выборке: 93,8 %.

Объединение классификаторов

Так как требуется получить классификатор на три класса, то следует объединить полученные двухклассовые классификаторы в один.

Для этого воспользуемся тем, что классы «здоровая растительность» C_h и «пораженная растительность» C_d являются подклассами класса «растительность» C_p . Значение на выходе классификатора «растительность – почва» $A_{p;s}$, соответствующее классу «растительность» $A_{p;s}(C_p)$, находится в диапазоне $[0; 1]$ и может быть использовано в качестве коэффициента для выходов классификатора «здоровая – пораженная растительность» $A_{h;d}$.

Таким образом, искомый трехклассовый классификатор $A_{h;d;s}$ получает выходные значения принадлежности входного изображения I_{in} следующим образом:

1. Получить выходы $A_{p;s}(C_p)$ (растительность) и $A_{p;s}(C_s)$ (почва) классификатора $A_{p;s}$.
2. Получить выходы $A_{h;d}(C_h)$ (здоровая растительность) и $A_{h;d}(C_d)$ (пораженная растительность) классификатора $A_{h;d}$.
3. Получить выходы классификатора $A_{h;d;s}$ в виде:

$$\begin{cases} A_{h;d;s}(C_h) = A_{p;s}(C_p) \times A_{h;d}(C_h) \\ A_{h;d;s}(C_d) = A_{p;s}(C_p) \times A_{h;d}(C_d) \\ A_{h;d;s}(C_s) = A_{p;s}(C_s). \end{cases} \quad (1)$$

Алгоритм распознавания

В целом алгоритм распознавания (преобразование $A: I_{orig} \rightarrow I_{result}$) можно представить в следующем виде:

1. Загрузить исходное цветное изображение I_{orig} размером $M \times N$.
2. Для $\forall (x, y): x \in [0, M - 1], y \in [0, N - 1]$.
 - 2.1. Получаем окрестность $0(I_{orig}(x, y))$ пикселя в позиции (x, y) в виде цветного изображения размером 33×33 пикселя.
 - 2.2. Подаем полученное изображение $0(I_{orig}(x, y))$ на классификаторы $A_{p;s}$ и $A_{h;d}$.
 - 2.3. Выходные значения классификаторов $A_{p;s}$ и $A_{h;d}$ используем для вычисления выходов общего классификатора $A_{h;d;s}$.
 - 2.4. Получаем индекс класса:

$$index = argmax([A_{h;d;s}(C_h), A_{h;d;s}(C_d), A_{h;d;s}(C_s)]). \quad (2)$$

2.5. Присваиваем пикселю выходного изображения $I_{result}(x, y)$ значение, соответствующее псевдоцвету индекса класса: светло-серый – здоровая растительность, белый – пораженная растительность, темно-серый – почва.

3. Сохраняем полученное изображение I_{orig} .

Тестирование

Тестирование производилось в два этапа: тестирование объединения классификаторов и тестирование распознавания.

Тестирование объединения классификаторов осуществлялось на общей базе изображений классов: обучающая + валидационная выборка. При этом оценивалась точность классификации для каждого класса в отдельности. Полученные результаты тестирования приведены в табл.

Тестирование распознавания производилось на имеющихся аэрофотоснимках, на которых присутствуют заметные участки пораженной растительности (рис. 3). Полученная при тестировании точность – 75 – 84 % в зависимости от разрешения снимка, освещения на нем и количества «пятен» почвы в растительной массе.

Результаты тестирования объединения классификаторов

Класс	Пораженная растительность	Здоровая растительность	Почва
Точность, %	75,61	85,65	99,03

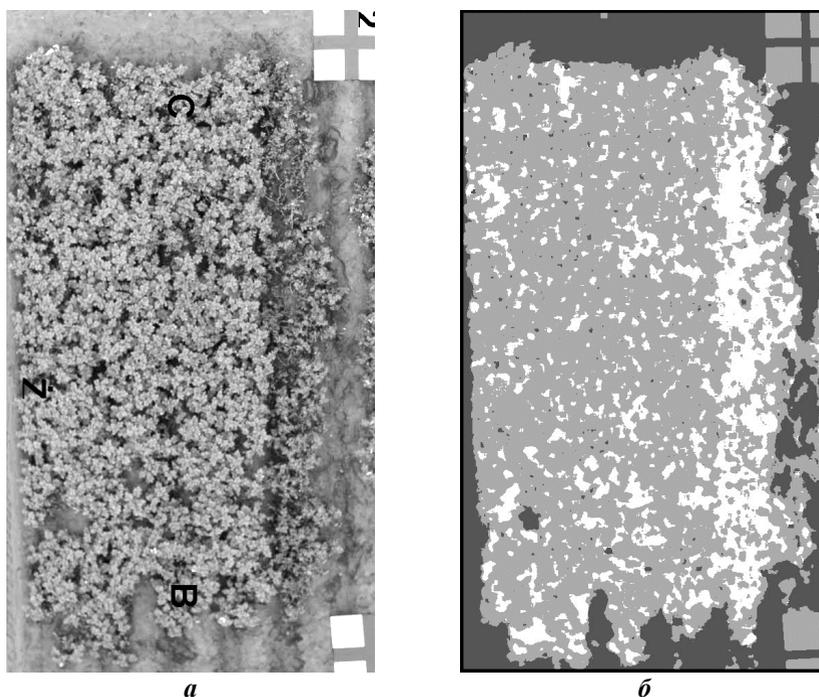


Рис. 3. Исходное изображение (а) и результат его распознавания (б)

Наибольшее количество ошибок возникало на участках, соответствующих границе здоровой растительности и почвы (в особенности в местах, где небольшие участки почвы окружены растительностью, создающей на этом участке почвы тень).

Выводы

Предложен и реализован с использованием библиотеки Tensorflow алгоритм распознавания состояния растительности на базе двух СНС по данным аэрофотосъемки. Предложенный алгоритм позволяет снизить влияние шумовых факторов (освещение, солнечные блики) на качество получаемых карт пораженной растительности за счет использования СНС. При этом использование двух СНС позволило снизить искажение цветовых характеристик изображений окрестностей пикселей при попадании в него растительности и почвы.

Дальнейшие исследования предполагают использование нейросетевого детектирования для выделения посторонних предметов, а также нейросетевой семантической сегментации для исключения необходимости дополнительного алгоритма и снижения количества ошибок в проблемных областях.

Литература

1. Беляев, Б. И. Оптическое дистанционное зондирование / Б. И. Беляев, Л. В. Катковский. – Минск : БГУ, 2006. – 455 с.
2. Шовенгердт Р. А. Дистанционное зондирование. Модели и методы обработки изображений: Пер. с англ. – М. : Техносфера, 2013. – 592 с.

3. Chao K. Machine vision technology for agricultural applications / K. Chao, Y. R. Chen. M. S. Kim // Elsevier science transactions on computers and electronics in agriculture. – 2002. – Vol. 36. – P. 173 – 191.
4. Do leaf surface' characteristics affect agrobacterium infection in tea [camellia sinensis (1.) / N. Kumar [et al.] // J. Biosci. – 2004. – Vol. 29. – № 3. – P. 309 – 317.
5. Identification of weed, corn using BP network based on wavelet features and fractal dimension / L. Wu [et al.] // Scientific Research and Essay. – 2009, November. – Vol. 4 (11). – P. 1194 – 1400.
6. Qin Zh. Detection of rice sheath blight for in-season disease management using multi-spectral remote sensing / Zh. Qin. M. Zhang // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2005. – Vol. 7. – P. 115 – 148.
7. Aksoy S. Automatic mapping of linear woody vegetation features in agricultural landscapes using very high-resolution imagery / S. Aksoy, H.G. Akcay, T. Wassenaar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2010, January. – № 48 (1, 2). – P. 511 – 522.
8. Abdullahi H. S. Advances of image processing in Precision Agriculture: Using deep learning convolution neural network for soil nutrient classification / Halimatu Sadiyah. Abdullahi, Oba Mustpha Zubair // Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST). – 2017, August. – Vol. 4 Issue 8. – P. 7981 – 7987.
9. Wright D., Rasmussen V., Ramsey R., Baker D. and Ellsworth J. Canopy Reflectance Estimation of Wheat Nitrogen Content for Grain Protein Management // GIScience Remote Sens. – 2004. – Vol. 41. – No. 4. – P. 287 – 300.
10. Mate K. A., Pooja G., Kavita Singh R. Feature Extraction Algorithm for Estimation of Agriculture Acreage from Remote Sensing Images. – 2016. – P. 5 – 9.
11. Huang H., Deng J., Lan Y., Yang A., Deng X., Zhang L. A fully convolutional network for weed mapping of unmanned aerial vehicle (UAV) imagery // PLoS ONE 13(4): e0196302. – 2018.
12. Inkyu Sa, weedNet: Dense Semantic Weed Classification Using Multispectral Images and MAV for Smart Farming / Inkyu Sa, Zetao Chen, Marija Popovic, Raghav Khanna, Frank Liebisch, Juan Nieto, Roland Siegwa // IEEE Robotics and Automation Letters. – 2018. – Vol. 3(1). – P. 588 – 595.
13. Potena C., Nardi D., Pretto A. Fast and Accurate Crop and Weed Identification with Summarized Train Sets for Precision Agriculture // IAS 2016: Intelligent Autonomous Systems 14. – 2017. – P. 105 – 121.
14. Yao, C., Zhang, Y., Zhang, Y., and Liu, H.: Application of convolutional neural network in classification of high resolution agricultural remote sensing images, Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci., XLII-2/W7. – 2017. – P. 989 – 992.
15. Atole R. R., Park D. A Multiclass Deep Convolutional Neural Network Classifier for Detection of Common Rice Plant Anomalies // (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2018. – Vol. 9, No. 1. – P. 67 – 70.
16. Rajmohan R., Pajany M., Rajesh R., Raghu D. Raman, Prabu U. Smart paddy crop disease identification and management using deep convolution neural network and SVM classifier // International Journal of Pure and Applied Mathematics. – Vol. 118. – № 15. – 2018. – P. 255 – 264.
17. Athanikar G., Badar P. Potato Leaf Diseases Detection and Classification System / International Journal of Computer Science and Mobile Computing. – 2016. – Vol. 5. – Issue. 2. – P. 76 – 88.

18. S. Sladojevic, M. Arsenovic, A. Anderla, D. Culibrk, and D. Stefanovic, Deep Neural Networks Based Recognition of Plant Diseases by Leaf Image Classification // Computational Intelligence and Neuroscience. – 2016. – 11 p.
19. Zastosowanie technik analizy obrazu do wczesnego wykrywania patogenow ziemniaka. Praca nie publicowana / B. Sobkowiak [et al.]. – Poznan: PIMR, 2006.
20. Zastosowanie technik analizy obrazu do wczesnego wykrywania zarazy ziemniaczanej w warunkach polowych. Praca nie publicowana / B. Sobkowiak [et al.]. – Poznan: PIMR, 2007.
21. Николенко С., Кадулин А. Архангельская Е. Глубокое обучение. – СПб. : Питер, 2018. – 480 с.

Робота вышолнена пры падтрымцы БРФФІ (праект № Ф18В-005) і ГКНТ Республікі Беларусь (праект № Ф18ПЛШГ-008П).

КОСМИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И УПРАВЛЕНИЕ ГОРНОРУДНЫМИ И КОММУНАЛЬНЫМИ ОТХОДАМИ

Л. А. Ведешин¹, А. А. Рихтер²

¹ Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт космических исследований
Российской академии наук, г. Москва,

² Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
«Научно-исследовательский институт
аэрокосмического мониторинга «Аэрокосмос», г. Москва)

Аннотация. *Описана комплексная методика автоматизированного дешифрирования территорий захоронения отходов по материалам космической съемки, состоящая из трех блоков: методика детектирования объектов захоронения отходов, основанная на методе контролируемой классификации, состоящая из трех последовательных стадий детектирования – обнаружение объектов, выделение объектов, выделение классов поверхности; методика оценки параметров объектов захоронения отходов, таких как температура поверхности, площадь, объем и др., и их изменения во времени, основанная на методах цифровой обработки космических изображений, в автоматизированном режиме; методика автоматизированной оценки влияния свалок на природную среду, основанная на использовании разработанных индексов реакции растительности на факторы окружающей среды, такие как температура.*

Ключевые слова: *свалки, полигоны ТБО, ТКО, объекты захоронения отходов, космический мониторинг, комплексная методика, детектирование, дешифрирование, параметры, индексы реакции растительности, индексы реакции почвы.*

Введение

Сложность решения этой проблемы определяется наличием большого количества объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов (ОЗО), распределенных на территории Российской Федерации, для которых трудно обеспечить экологический мониторинг традиционными методами.

По данным Счетной палаты, Россия ежегодно производит 90 млрд тонн отходов, которые скапливаются на территории в 4 млрд. гектаров, равной таким странам как Нидерланды или Швейцария. Ежегодно для размещения отходов выделяется 0,4 млн. гектар земли, а общий объем отходов каждый год увеличивается на 5 млрд тонн. Всего в России в настоящий момент действует более 1000 полигонов для отходов, 15 тыс. санкционированных свалок, 17 тыс. несанкционированных свалок и 13 тыс. несанкционированных мест размещения мусора. Особенно большое количество свалок бытовых отходов наблюдается вокруг крупных городов [1].

В стране перерабатывается менее 40 % и менее 10 % твердых бытовых отходов (ТБО). Решением этой проблемы занимаются 40 мусоросжигательных и мусороперерабатывающих заводов, а сортируют мусор 53 комплекса. По оценке Счетной палаты, количество таких предприятий необходимо утроить.

Ниже приведена классификация объектов коммунальных и промышленных отходов (с точки зрения космического мониторинга):

1. Санкционированные полигоны твердых коммунальных (ТКО) и промышленных (ПО) отходов.
2. Муниципальные городские свалки (МГС).
3. Терриконы (отвалы из пустых пород при добыче и переработке полезных ископаемых).
4. Несанкционированные свалки.
5. Рекультивируемые карьеры природных пород.
6. Рекультивируемые полигоны, закрытые для эксплуатации.
7. Захламленные территории.
8. Типовые свалки местного значения.
9. Производственные свалки мусора.
10. Горно-обогачительные комбинаты.

К методам экологического мониторинга относятся наземные, авиационные и космические методы.

Наземные методы экологического мониторинга предусматривают в основном маршрутные наблюдения, полевые, лабораторно-аналитические и камеральные работы. Их принципиальная особенность состоит в том, чтобы детально и на месте оценить состояние атмосферного воздуха, почвенного покрова и грунтовых вод, исследовать и проанализировать состав свалочного вещества, определить размеры и границы участка, административно-территориальную и муниципальную принадлежность объекта и т. д. По этой причине применение данных методов имеет существенное ограничение при мониторинге обширных территорий Российской Федерации.

С увеличением пространственного разрешения фотосъемки с российских и зарубежных космических аппаратов появилась возможность детального наблюдения за состоянием горнорудных и коммунальных отходов, составления тематических и экологических карт для оценки ущерба, наносимого растительному покрову, грунтовыми водам и загрязнению атмосферы.

Дистанционный мониторинг объектов захоронения отходов (ОЗО) имеет ряд преимуществ перед контактными методами и экономически выгоден при решении задач мониторинга обширных территорий, так как отсутствует прямой контакт с объектами исследования, он может быть проведен в труднодоступных местах (горные районы, северные территории и др.), для которых наземный мониторинг крайне затруднен или невозможен. Вместе с тем, до недавнего времени в недостаточной степени были разработаны методики и алгоритмы цифровой обработки, связанные с автоматизированной оценкой параметров объектов размещения отходов (ОРО) и их влияния на окружающую среду по данным космических изображений. При разработке комплексной методики (КМ) автоматизированного дешифрирования ОЗО по данным космической съемки рассматривается детектирование (обнаружение, выделение объектов, выделение классов поверхности и др.) и оценка параметров (геометрических, тепловых и др.) ОЗО, а также оценка влияния ОЗО на окружающую природную среду (ОПС), которая может быть выполнена для интересующих объектов. Обратное влияние, т. е. ОПС на ОЗО, в КМ не рассматривается, хотя оно также имеет место [2 – 5].

Общая схема комплексной методики (КМ)

На рис. 1 приведена общая схема КМ, разработанная в НИИ «АЭРОКОСМОС».

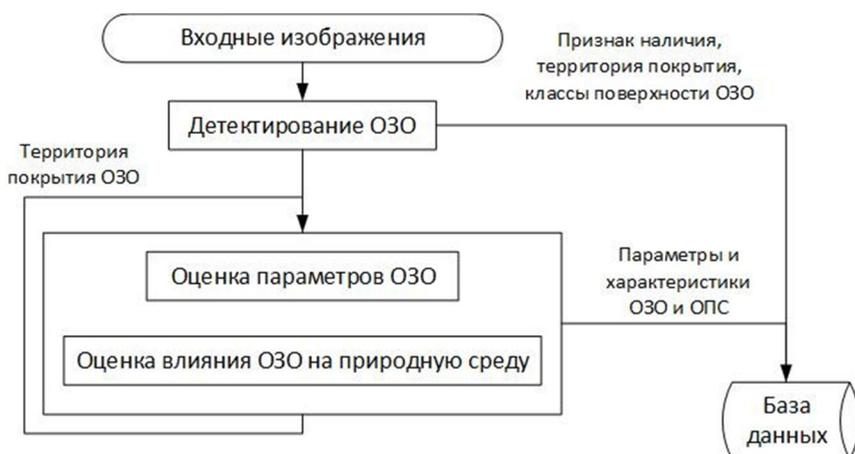


Рис. 1. Общая схема КМ

В качестве входных изображений могут быть целые космические снимки или их фрагменты. Космическое растровое панхроматическое (состоит из одного канала) или многозональное (состоит из более одного канала) изображение. Отсутствие экранирования поверхности Земли (облачность, задымленность, снежный покров и др.). Съемка поверхности Земли проводится в светлое время суток. Отсутствие элементов брака на снимке (регулярные полосы, участки искажений изображений, неровность краев снимков и др.). Отсутствие областей с нулевым значением коэффициента спектральной яркости (КСЯ) пикселей.

Изображения прошли предварительную обработку, включающую в себя географическую привязку к универсальной поперечной проекции Меркатор, ортотрансформирование и коррекцию (геометрическую, радиометрическую, атмосферную и др.). В основном, изображения, хранящиеся в базах данных либо приобретаемые под заказ, уже прошли процедуры ортотрансформирования и коррекции, поэтому достаточно географической привязки. Данные процедуры общеизвестны и могут быть выполнены в автоматическом режиме.

Ограничения на разрешения изображений:

1. Пространственное разрешение – изображения низкого ($h = 10 - 30$ м), среднего ($h = 2,5 - 10$ м), высокого ($h = 1 - 2,5$ м) и сверхвысокого ($h < 1$ м) разрешения (h – пространственное разрешение).

2. Спектральное разрешение – панхроматические ($k=1$), мультиспектральные ($k = 2 - 10$) и гиперспектральные ($k > 10$) изображения (k – число каналов).

3. Радиометрическое разрешение – видимые ($\lambda = 440 - 740$ нм), инфракрасные ($\lambda = 740$ нм – 2 мм) и стереометрические ($\lambda = 1 - 10$ см) изображения (λ – длина волны).

4. Частота съемки – единичные ($n = 1$) и временные серии ($n > 1$) изображений (n – количество изображений в единицу времени).

КМ состоит из 3 блоков (составляющих методик):

1. Блок А – Методика детектирования ОЗО (КМ1).

2. Блок Б – Методика оценки параметров ОЗО (КМ2).

3. Блок В – Методика оценки влияния ОЗО на природную среду (КМ3).

Сначала проводится детектирование ОЗО, лежащих на данной территории покрытия входными изображениями. Затем по тем же или другим снимкам для каждого

ОЗО оцениваются параметры и характеристики и состояние растительности на территории объекта и в его окрестности (по реакции растительности на факторы окружающей среды). Методика является простой в применении и использует только данные космического мониторинга.

Проведено комплексирование методов цифровой обработки изображений для решения задач автоматизированного детектирования. Разработанная комплексная методика мониторинга объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов позволяет в автоматизированном режиме детектировать ОЗО и давать оценку их параметров, определять места нахождения и образования объекта, области, занимаемой объектом и его компонентами (классами поверхности), а также дополнительно проводить оценку влияния горнорудных и коммунальных отходов на природную среду.

Проведена апробация разработанной комплексной методики космического мониторинга ОЗО на территории Московской области.

В результате апробации выяснено, что данная комплексная методика обладает следующими преимуществами по сравнению с другими:

1. Простота алгоритмической и программной реализации ввиду применения извещенных и наиболее простых методов цифровой обработки изображений.

2. Использование в качестве входных данных космических снимков, многие из которых являются бесплатными и общедоступными.

3. Возможность ее полной автоматизации без участия человека-оператора, что позволяет проводить масштабный контроль замусоривания на больших территориях суши.

4. Схема мониторинга состоит в простой последовательности этапов мониторинга: детектирование объектов, оценка параметров объектов на базе полученных областей детектирования, оценка влияния объектов на природную среду в окрестности обнаруженных объектов.

5. Многие параметры ОЗО оцениваются впервые не только методами дистанционного, но и контактного мониторинга.

Методика детектирования ОЗО

Методика автоматизированного детектирования ОЗО разделена на 3 последовательные стадии (табл. 1):

1. Обнаружение местоположения ОЗО.
2. Выделение ОЗО.
3. Выделение компонент ОЗО.

Таблица 1

Стадии детектирования ОЗО

№	Стадии детектирования	Исходные данные	Метод цифровой обработки	Результаты обработки
1	Обнаружение объекта	Изображения низкого пространственного разрешения	По ЭЗСЯ. На базе метода максимального правдоподобия	Признаки наличия ОЗО
2	Выделение объекта	Временная серия изображений низкого пространственного разрешения	По ИРР. На базе метода пороговой фильтрации	Территория покрытия ОЗО
3	Выделение классов поверхности объекта	Изображения высокого пространственного разрешения	По МИП. На базе метода ближайшего соседа	Классы поверхности ОЗО

В основе детектирования следов замусоривания лежит метод максимального правдоподобия. Он состоит в оценивании значения векторного аргумента функции правдоподобия, при котором она достигает экстремума. Детектирование следов замусоривания, т. е. признаков наличия свалок, по космическим изображениям состоит в выделении пикселей с эталонными значениями спектральной яркости (ЭЗСЯ). Данные значения получаются для некоторых эталонных областей, занятых свалкой.

На второй стадии используются временные серии мультиспектральных изображений одного типа среднего или высокого разрешения для выделения области ОЗО. Для выполнения соответствующих алгоритмов требуются РВ- и ближний ИК-каналы. Области замусоривания детектируются по значениям индексов реакции почвы (ИРП) как временной ряд значений индексов реакции растительности (ИРР) по индексу осолоненности. ИРР и ИРП – индексы подстилающей поверхности (ИПП), рассчитываемые для каждого пикселя.

На третьей стадии каждый пиксель области ОЗО причисляется к одному из некоторого множества классов поверхности (компонент ОЗО), для которых установлены зависимости яркостей на всех каналах от яркости на одном из каналов, по критерию минимизации расстояния от яркости пикселя до этой функции (в пространстве яркостных признаков). Каждая функция строится по соответствующему эталону класса поверхности, выделяемому на одноименном или другом изображении. Функции представляются в виде матриц информационных признаков (МИП).

По методике детектирования свалок могут быть установлены следующие области (формы) детектирования, полученные обработкой космических изображений:

1. След ОЗО – местоположение объекта.
2. Область ОЗО – территория покрытия замусориванием в текущий момент времени съемки.
3. Временная серия областей ОЗО – ряд этих областей в каждый момент времени съемки.
4. Очаг ОЗО – территория покрытия замусориванием в каждый момент времени съемки с наибольшим значением индекс реакции почвы.
5. Предсвалка – наиболее ранняя часть области свалки, которая может быть выделена по космическим изображениям.
6. Область компонента ОЗО – территория покрытия класса поверхности ОЗО.
7. Классификация поверхности ОЗО – причисление разных участков поверхности свалки к тому или иному классу поверхности.

По результатам первой стадии устанавливается форма (1), второй – формы (2) – (5), третьей – формы (6) – (7).

Методика оценки параметров ОЗО

К категориям основных параметров (характеристик) ОЗО, оцениваемых методами цифровой обработки космических изображений, относятся (табл. 2):

1. Тепловые параметры – минимальная, средняя и максимальная температура поверхности свалки и т. д.
2. Геометрические параметры на плоскости – периметр, площадь, концентрация замусоривания и т. д.
3. Геометрические параметры в пространстве – объем, высота, угол откоса и т. д. Также можно рассмотреть такие категории параметров, как параметры почвы и растительности, химических процессов, компонентные, технологические, информационные параметры и др. (в КМ2 не входят).

Параметры, оцениваемые по КМ

№	Категория	Параметры
1	Тепловые параметры	Сезонные изменения, Хронологические изменения, Разностные температуры, Суточные изменения, Риск тлений и возгораний, Разброс значений температур, Тепловые всплески и др.
2	Геометрические параметры на плоскости	Площадь, Периметр, Географические координаты, Концентрация по направлению, Перемещение и скорость перемещения границ, Вытянутость по направлению, Линия контура и др.
3	Геометрические параметры в пространстве	Площадь основания, Высота, угол откоса, Объем, Площадь поверхности, Пространственный периметр, Пространственный центр масс, Фигура поверхности и др.

Параметр ОЗО – некоторая числовая величина, описывающая объект и имеющая определенный физический смысл. Характеристика – представление параметров в различных формах (в виде рисунков, таблиц, графиков, диаграмм и др.).

Для расчета каждого параметра или характеристики – свой внутренний алгоритм (процедура) обработки, на входе которого могут быть не только данные космического мониторинга, но и внешние данные подспутникового мониторинга. Для расчета разных параметров требуются разные типы изображений (например, тепловых параметров – тепловые каналы, геометрических параметров на плоскости – изображения детектирования ОЗО, в пространстве – радарные изображения). На базе рассчитанного массива параметров и характеристик формируется детальное представление свалки (структура текста, рисунков, таблиц, графиков, диаграмм и др. форм информации).

Методика оценки влияния ОЗО на природную среду

В основе методики оценки влияния ОЗО на ОПС лежит расчет специальных ИПП по аэрокосмическим изображениям (ИРР и ИРП на те или иные факторы), показывающих реакцию растительности на различные внешние факторы окружающей среды (рис. 2).



Рис. 2. Зависимость между факторами, воздействующими на растительность, и реакцией растительности на них

ИРР задаются в общем виде, как:

$$\mathfrak{Z} = X' - Y', \quad Y' = \frac{Y - Y_{\min}}{Y_{\max} - Y_{\min}}, \quad X' = \begin{cases} \frac{X - X_{\min}}{X_m - X_{\min}}, & X < X_m \\ \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_m}, & X \geq X_m \end{cases},$$

где \mathfrak{Z} – ИРР, X' – нормированное значение фактора X , Y' – нормированное значение реакции Y растительности.

В качестве фактора может выступать как природный, так и антропогенный. X_{\min} и X_{\max} (в точках A и E) – минимальное и максимальное критические значения фактора X выживания растительности (диапазон выживания), X_m (в точке C) – оптимальное значение фактора, X – значение фактора в точке (x, y) изображения I , снятого в момент времени t . X_{\min} , X_{\max} и X_m отличаются для разных видов растений, произрастающих в различных географических областях поверхности Земли (но для растительного покрова в целом их можно считать постоянными). Y_{\min} и Y_{\max} – минимальное и максимальное значения вегетационного индекса Y , отличающиеся для географических областей (но их можно полагать постоянными). В качестве реакции Y может выступать тот или иной вегетационный индекс, вычисляемый по точным формулам в каждой точке (x, y) изображения I .

Расчет характерных значений $\{X_{\min}, X_{\max}, Y_{\min}, Y_{\max}, X_m\}$ проводится по статистическим зависимостям попиксельно между индексами вегетации (в частности, NDVI – нормализованный вегетационный индекс) и значениями фактора среды (в частности, поверхностная температура). Одна из закономерностей (см. рис. 2): чем ближе к пику «состояние» пикселя изображения, тем более комфортными считаются условия для «средней» растительности, а чем ближе к критическим значениям, но лучше состояние (выше NDVI), тем выносливее считается растительность к неблагоприятным значениям фактора.

Стабильное изменение ИРР во времени дает общую оценку состояния почвы. Для этого вводится специальный индекс – ИРП:

$$\aleph = \frac{\partial \mathfrak{Z}(t)}{\partial t}, \quad \aleph = \begin{cases} \frac{k}{k_1}, & k < 0 \\ 0, & k \approx 0, \quad k_1 = \min(k < 0), \quad k_2 = -\max(k > 0), \\ \frac{k}{k_2}, & k \geq 0 \end{cases}.$$

k – коэффициент наклона линии регрессии в каждой точке временного ряда значений ИРР. При $\aleph > 0$ происходит ухудшение реакции растительности на благоприятные значения фактора, при $\aleph < 0$ – улучшение, при $\aleph \approx 0$ – состояние растительности стабилизируется.

Общая схема космического мониторинга ОЗО

Предлагается общая схема построения системы космического мониторинга ОЗО, в которой КМ (наравне с другими методиками дешифрирования ОЗО по данным аэрокосмической съемки) является составной частью [6] – [9].

В общем виде система космического мониторинга ОЗО включает в себя следующие взаимосвязанные блоки (рис. 3):

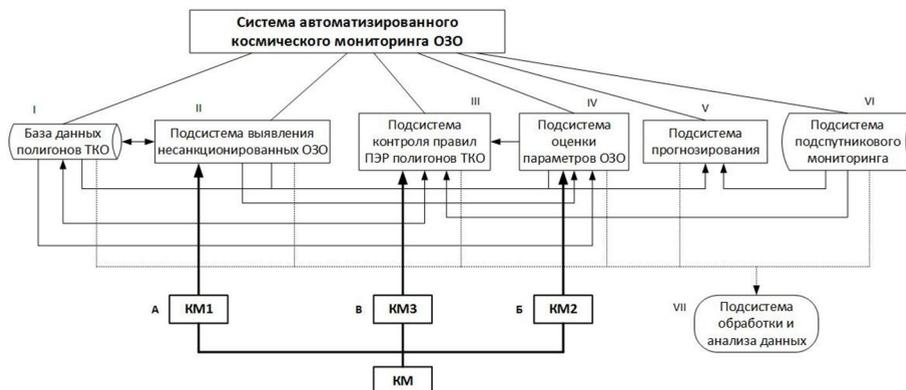


Рис. 3. Блок-схема системы космического мониторинга ОЗО и включение КМ в состав системы

I. База данных существующих официальных мест размещения отходов, которые числятся в государственном реестре объектов размещения отходов на текущий момент времени.

II. Подсистема выявления несанкционированных свалок на текущий момент времени.

III. Подсистема контроля правил проектирования, эксплуатации и рекультивации (ПЭР) действующих полигонов ТКО.

IV. Подсистема оценки параметров свалок и их влияния на окружающую среду.

V. Подсистема прогнозирования мест возникновения свалок, параметров свалок и их влияния на природную среду и здоровье человека.

VI. Подсистема подспутникового мониторинга.

VII. Подсистема обработки и анализа результатов космического мониторинга.

Система мониторинга ОЗО сводима к режиму работы в реальном времени.

Система функционирует следующим образом.

В блоке II осуществляется обработка космических снимков посредством автоматизации обработки космических изображений совместно с детектированием свалок (с подключением блока А). Сравнивая область детектирования с данными базы данных полигонов ТКО в блоке I, выявляются несанкционированные ОЗО, которые фиксируются в блоке II. В блоке IV выполняется оценка параметров свалок (с подключением блока Б) как для полигонов, представленных в блоке I, так и для несанкционированных ОЗО, представленных в блоке II. Используя данные блока VI, полученные с помощью методов подспутникового мониторинга, данные блока I и блока IV в блоке III проводится сбор, анализ поступающей информации, выявление нарушений правил ПЭР для существующих полигонов ТКО и выработка соответствующих природоохранных мер (с подключением блока В). Данные оценки параметров (блок IV) для известных (блок I) и неизвестных (блок II) свалок, а также данные подспутникового мониторинга (блок VI) поступают в блок V, где проводится прогнозирование состояния замусоривания заданной территории. Со всех блоков информация поступает в блок VII обработки и анализа полученной информации.

В данной схеме методы космического мониторинга являются центральными в исследовании свалок и включают в себя следующие направления работ:

1. Анализ свалок по данным дистанционных и наземных наблюдений.
2. Верификация результатов космического мониторинга свалок.
3. Исследование известных свалок по дистанционным и наземным данным.
4. Обнаружение неизвестных объектов размещения отходов.
5. Разработка программного обеспечения (программных блоков, средств интерфейса обработки космической информации).
6. Разработка баз и хранилищ данных по ОЗО.
7. Контроль за свалками в режиме реального и исторического времени.
8. Разработка информационных ресурсов в сети Интернет.
9. Разработка в внедрение учебно- и научно-методических основ объектов размещения отходов, в частности, аэрокосмического и наземного мониторинга свалок.
10. Разработка моделей и моделирование объектов размещения отходов.

В табл. 3 показаны частные случаи типов спутниковых систем и обеспечиваемое пространственное разрешение, благоприятное для мониторинга ОЗО.

Таблица 3

Типы космических изображений по пространственному разрешению в задаче дистанционного зондирования ОЗО

Разрешение	Тип спутниковой системы /разрешение, м/
Низкое	Landsat 4 – 5, 7, 8; Envisat, EO-1 /15 – 30/
Среднее	RapidEye /6,5/, Radarsat /3-8/, Монитор-Э /4 – 10/
Высокое	Канопус-В /2/, ALOS-2 /1 – 3/, Cartosat-1 /2 – 2,5/, EgyptSat-2 /1/
Сверхвысокое	GeoEye-1 /0,4 – 0,5/, QuickBird /0,6/, TerraSAR-X, TanDEM-X, WorldView /0,5/, Ресурс-П /0,7/

Чем лучше разрешения (пространственное, спектральное и др.) имеет снимок, больше область наблюдения и областей замусоривания на ней, тем шире круг решаемых задач космического мониторинга ОЗО. Например, гиперспектральные изображения лучше мультиспектральных, благодаря большему числу каналов. Если по мультиспектру оцениваются компоненты поверхности, то по гиперспектру может быть дана оценка химического состава свалок. Наиболее эффективные спутниковые системы, с точки зрения качества исходных данных, круга решаемых задач, финансовых и временных затрат и затрат памяти – Landsat 4, 5, 7, 8, GeoEye 1, WorldView 1-2, QuickBird 1-2, RapidEye.

Геометрические параметры могут быть оценены по детектированию ОЗО визуальными, автоматизированными или автоматическими методами. Оптико-электронные спутниковые системы (дающие панхроматические и мультиспектральные снимки) позволяют оценить геометрические параметры на плоскости (периметр, площадь покрытия и т.п.). Радарные системы (дающие стереометрические изображения) дают оценку геометрических параметров в пространстве (рельеф, объем и т.п.).

Основные каналы в составе космического снимка, применяемые в большинстве задач – каналы видимого спектра: сине-голубая (B, $\lambda = 440 - 500$ нм), зеленая (G, $\lambda = 500 - 565$ нм) и красная (R, $\lambda = 625 - 740$ нм) полосы. По ним целесообразно проводить визуальный мониторинг (и дедуктивный анализ как его частный случай) с той или иной точностью, в зависимости от пространственного разрешения. Оценку соблюдения правил ПЭР на полигонах ТКО приемлемо проводить при высоком про-

странственном разрешении. Множество видимых изображений (исторических и текущих) могут быть исследованы и получены по картам Google или Yandex, а также в программе Google Earth.

В любом случае, космический мониторинг ОЗО может быть проведен и по панхроматическим изображениям, в частности, по каждому спектральному каналу в отдельности. При добавлении к каналам видимого спектра каналов инфракрасного круг задач расширяется. Коротковолновая область ($\lambda = 740 - 2500$ нм), в частности, позволяет дать оценку состояния растительности по вегетационным индексам, а средневолновая область ($\lambda = 2,5 - 50$ мкм) – различных температурных параметров. Дальняя инфракрасная область может быть полезна в ночное время суток или холодное время года съемки объектов размещения отходов.

Заключение

Разработанная комплексная методика мониторинга объектов захоронения твердых коммунальных и промышленных отходов, позволяет в автоматизированном режиме детектировать ОЗО и давать оценку их параметров, а также дополнительно проводить оценку влияния горнорудных и коммунальных отходов на природную среду. Разработаны индексы реакции растительности и почвы на условия окружающей среды, рассчитываемые по данным космических съемок и наземных обследований, примененных в задаче оценки влияния ОЗО на окружающую природную среду по данным космического мониторинга. Полученные индексы подстилающей поверхности (индексы реакции растительности и почв) позволяют определять реакцию растительности и почв на изменчивость факторов окружающей среды по данным космических съемок и наземных обследований.

Оценена экономическая эффективность использования предлагаемой комплексной методики космического мониторинга ОЗО. Оценка эффективности позволяет сделать вывод о возможности ее практического применения для решения задач выявления несанкционированных мусорных свалок, контроля эксплуатации существующих полигонов твердых коммунальных и промышленных отходов и оценки влияния свалок на природную среду. На основе выполненных исследований подготовлены предложения и рекомендации для директивных органов по проектированию, эксплуатации и рекультивации полигонов твердых бытовых и промышленных отходов и их вторичному использованию.

Литература

1. Анализ проблем и оценки состояния сферы управления отходами производства и потребления в РФ / Счетная палата, 11 февраля 2018 г.
2. Бондур, Мурынин А. Б., Рихтер А. А., Шахраманьян М. А. Разработка алгоритма оценки степени деградации почвы по мультиспектральным изображениям // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 6 (131). – С. 130 – 135.
3. Рихтер А. А., Мурынин А. Б., Шахраманьян М. А. Оценка геометрических параметров областей замусоривания по мультиспектральным космическим изображениям // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 2 (13). – С. 2866 – 2870.
4. Рихтер А. А., Казарян М. Л., Шахраманьян М. Л. Обработка космических изображений с использованием средств мультимедиа и ее применение в космическом мониторинге объектов захоронения отходов // Фундаментальные исследования. – 2015. – № 8 (2). – С. 328 – 332.

5. Рихтер А. А., Казарян М. Л., Шахрамьян М. Л. Метод автоматизации обнаружения и выделения объектов захоронения отходов // *Фундаментальные исследования*. – 2015. – № 8 (2). – С. 281 – 286.
6. Ведешин Л. А., Корнейчук А. И., Семенов В. И. Инженерные решения для территориального планирования с помощью ДЗЗ и ГТ // *Материалы пятой международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»*. Приложение к журналу «Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ» за 2017 год. – М., С. 178 – 185.
7. Ведешин Л. А. *Глобальная система аэрокосмического мониторинга Земли и управление природными и природно-антропогенными процессами и явлениями: Монография* / Российская акад. наук. Институт космических исследований. – М., 2008. – С. 258.
8. Шаповалов Д. А., Груздев В. С., Ведешин Л. А. Экологический мониторинг влияния техногенных выбросов комбината «Северсталь» на экосистемы водохранилища в пределах побережья Шекснинского плеса // *Экологические системы и приборы*. – 2007. – № 8. – С. 18 – 25.
9. Кудрин И. В., Балтер Б. М., Егоров В. В., Ведешин Л. А. Концепция цикла мониторинга и управления состоянием природно-антропогенных комплексов // *Вопросы радиоэлектроники*. – 2002. – Выпуск 1, 2. – С. 150 – 156. – (Серия радиолокационная техника).

КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЙ И ГЕОФИЗИЧЕСКОЙ ОБСТАНОВКИ

А. В. Карелин, Е. М. Твердохлебова,
В. А. Шувалов, А. А. Яковлев
(ФГУП ЦНИИ_{маши},
г. Королев, Московская область)

***Аннотация.** Представлены состав и структурная схема основных геоэффективных процессов в околоземном космическом пространстве (ОКП), определяющих текущее состояние геофизических сред, параметры которых позволяют прогнозировать развитие гидрометеорологической и геофизической обстановки в краткосрочной и долгосрочной перспективе. Показано, что эти параметры являются исходными данными для разработки концепции полномасштабной перспективной космической системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки, включающей шесть группировок КА. Разработаны основные принципы построения концепции, которая может быть основой перспективной Программы создания системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки.*

***Ключевые слова:** геофизические параметры, Солнце, солнечный ветер, магнитосфера, ионосфера, верхняя атмосфера, мониторинг, группировки космических аппаратов, погода.*

Введение

Энергетика и масштабы природных процессов, их взаимодействие определяют известные сложности в решении задач наблюдения и разработки моделей для построения прогнозных оценок изменчивости природной среды. Геофизические и гидрометеорологические процессы выделяются на этом фоне динамичностью, активностью и чувствительностью к внешним воздействиям. Геофизические среды являются транзитерами солнечно-земных взаимодействий, оказывающих прямое воздействие на энергетический баланс планеты.

Для решения задач прогнозирования состояния геофизических сред необходимо располагать измерительными инструментами для определения количественных данных о параметрах геофизических явлений и процессов, которые могут быть получены путем регулярных наблюдений с привлечением космических средств [1 – 2].

Поскольку степень достоверности прогнозных оценок изменчивости природной среды зависит от количества измеряемых параметров и времени наблюдения определяющих процессов, возникает необходимость в создании космической системы (КС) мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки (ГМГФО).

Космическая система мониторинга должна обладать системной полнотой, включающей: достаточное количество КА, их баллистическое построение, комплекс целевой аппаратуры для измерения определяющих параметров геофизических процессов и средства передачи данных в центр обработки. В настоящее время в рамках ФКП создается система мониторинга геофизической обстановки (ОКР «Ионозонд-2025»), задачи которой ограничены в основном наблюдением ионосферы. Она не обеспечит получение количественных данных по всему спектру параметров геофизических

процессов: на Солнце, в солнечном ветре, ударной волне, вне и внутри магнитосферы, в атмосфере Земли. Создаваемая система не будет полномасштабной, с точки зрения получения необходимых данных для достоверного определения трендов изменчивости геофизических процессов и прогнозирования развития гидрометеорологической и геофизической обстановки.

Таким образом, практические потребности изучения изменчивости окружающей среды диктуют необходимость создания полномасштабного космического инструмента для получения регулярных и согласованных измерений параметров природных процессов.

Целью работы является разработка концепции полномасштабной КС мониторинга ГМГФО, представляющей собой единый измерительный инструмент получения определяющих данных, необходимых для разработки долгосрочных и краткосрочных прогнозов погоды, включая «космическую».

Назначение КС мониторинга ГМГФО

КС предназначена обеспечить получение согласованной и регулярной измерительной информации о различных параметрах гидрометеорологических и геофизических процессов в атмосфере, ионосфере, ОКП; идентификацию источников естественных и антропогенных воздействий, их селекцию и анализ гидрометеорологических и геофизических процессов для построения надежного прогноза последствий выявленных воздействий.

КС мониторинга ГМГФО создается как инструмент обеспечения достоверной информацией структуры государственных и региональных органов власти, различных учреждений и организаций о состоянии окружающей среды, возникновении признаков кризисных явлений и катастрофических событий для:

- разработки программ и планов обеспечения безопасности населения РФ на основе прогнозирования наступления катастрофических событий, их последствий и масштабов;
- обоснования принимаемых решений;
- создания предпосылок и условий промышленного, научно-технического, интеллектуального и экономического развития России.

Целью создания КС мониторинга ГМГФО является формирование информационного пространства о состоянии и изменении окружающей природной среды и антропогенной обстановки, эффективного обнаружения различных воздействий, оценки степени опасности и предупреждения.

Функциональное назначение космической системы – измерение параметров гидрометеорологических и геофизических процессов и явлений в атмосфере, ионосфере, ОКП, передача информации на приемные пункты, трансляция ее в центр обработки и распространения.

Характеристика структуры концепции

Конфигурация КС мониторинга ГМГФО будет представлять собой глобальную распределенную систему КА, измерения которой должны охватывать определяющие процессы и явления, формирующие геофизическую обстановку в целом. Таким образом, КС мониторинга ГМГФО будет обеспечивать регулярность, согласованность и оперативность измерений с их передачей в режиме, близком к реальному времени.

Структура концепции должна включать:

- цели, задачи и функционально-организационную структуру космической информационно-системы, отвечающей требованиям национальной безопасности, обороны, экономики, науки, развития ракетно-космической техники и технологий РФ;
- состав наблюдаемых геофизических сред, явлений процессов;
- структуру измеряемых параметров, количественную характеристику диапазонов измерений;
- состав целевой аппаратуры космических аппаратов, требования к размещению приборов;
- состав и структуру баллистического построения космической системы;
- систему связи и передачи информации;
- обоснование основных технологий создания КС мониторинга ГМГФО.

Состав и распределение параметров геофизических процессов в ОКП

Концепция КС мониторинга (как и любой КС) ГМГФО разрабатывается исходя из ее назначения – регулярного определения гидрометеорологических характеристик и параметров околоземной космической среды, Солнца и солнечной активности. На рис. 1 представлен состав параметров геофизических объектов и процессов, количественные характеристики которых позволяют получить необходимую информацию о текущем состоянии геофизической обстановки [3 – 4]. Анализ рис. 1 показывает, что состав геофизических объектов и процессов, параметры которых измеряются КС мониторинга ГМГФО, является достаточно полным для формирования достоверных прогнозов погоды, в том числе «космической». Количественные характеристики геофизических процессов в ОКП, в солнечном ветре и на Солнце дают исчерпывающую информацию о погоде, ее текущем состоянии в конкретный момент, позволяют разработать прогнозные оценки развития геоэффективных событий и определить тренды изменчивости параметров геофизических сред, и в этом смысле, они являются определяющими. Таким образом, представленный на рис. 1 состав объектов и процессов является исходной информацией для разработки концепции перспективной КС мониторинга ГМГФО.

Задачи КС мониторинга ГМГФО

Мониторинг состояния ионосферы:

- оперативный глобальный и непрерывный мониторинг пространственно-временной структуры и параметров ионосферы методом радиозондирования с борта КА для получения фонового состояния ионосферной плазмы;
- контроль пространственного распределения электронной концентрации ионосферы, недоступной для зондирования с поверхности Земли;
- регистрацию неоднородностей в ионосфере и магнитосфере и ионосферно-магнитных возмущений;
- оперативное определение условий распространения радиоволн в околоземном космическом пространстве и прогнозирование дальнейшего протекания этих процессов;
- регистрация и контроль физических явлений и изменений параметров ионосферы;

Наблюдение и контроль Солнца и солнечной активности:

- картирование активных областей солнечного диска;
- регистрация корональных явлений;
- измерение потоков солнечных космических лучей, магнитосферных и ионосферных возмущений;
- регистрация солнечного рентгеновского, УФ- и гамма-излучений;

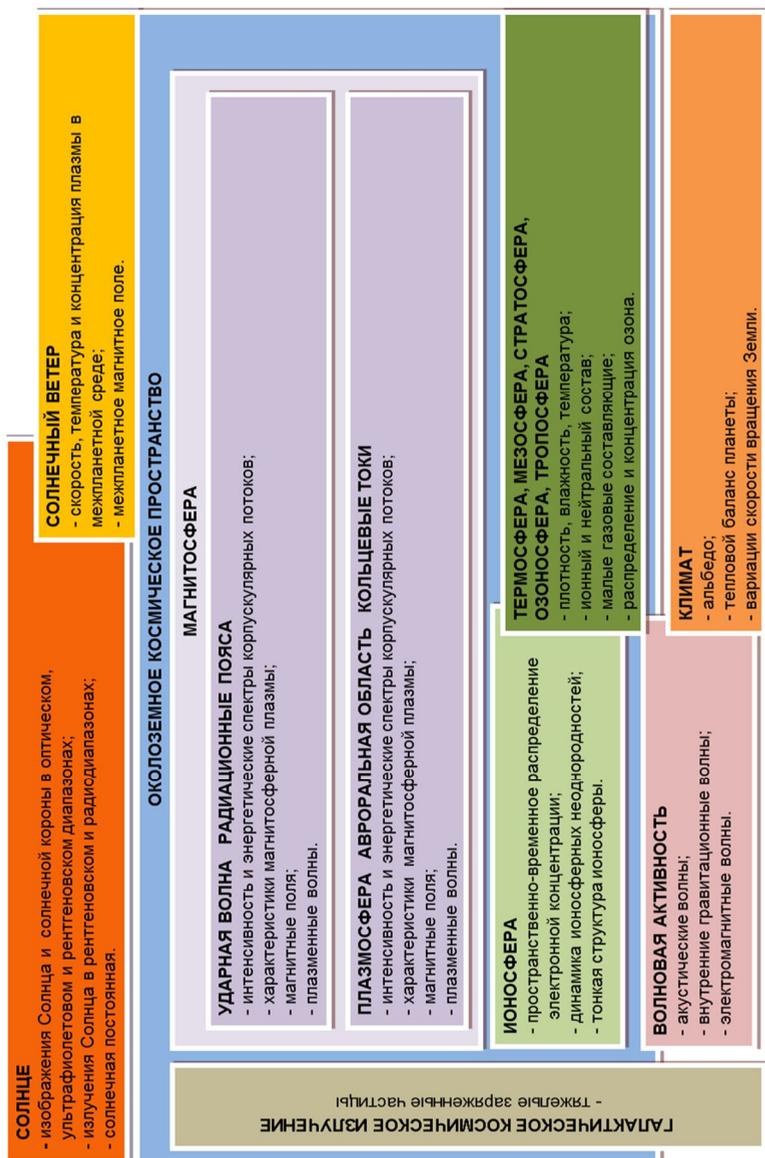


Рис. 1. Состав и структура параметров геофизических процессов в околоземной среде – мониторинг пространственного и временного распределения электромагнитных полей в околоземном космическом пространстве в плазменном диапазоне частот

- регистрация вспышечной активности и геоэффективных процессов на поверхности Солнца и в межпланетной среде;
- измерение параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля.

Диагностика состояния озона:

- полное содержание озона;
- распределение концентрации по высоте.

Наблюдение и контроль верхней атмосферы:

- контроль свечения верхней атмосферы (оптические характеристики);
- регистрация волновой активности верхней атмосферы;
- контроль динамики границ авроральной области выпадения энергичных частиц;
- контроль состава нейтральной составляющей верхней атмосферы;
- определение физического состава и измерение плотности верхней атмосферы;
- свечение верхней атмосферы.

Мониторинг термосферы и мезосферы:

- газовый состав и его параметры;
- аэрозоли и малые газовые составляющие;
- серебристые облака;
- процессы ионизации и рекомбинации;
- определение температуры;
- процессы переноса в средах.

Мониторинг нижней атмосферы:

- профиль температуры;
- профиль влажности;
- распределение облачности;
- верхняя граница облачности;
- состав и концентрация аэрозолей;
- температура подстилающей поверхности;
- атмосферное давление;
- профиль ветра.

Мониторинг океана:

- цветность среды;
- температура поверхности;
- соленость;
- состояние поверхности океана и приповерхностного слоя;
- волнение поверхности;
- приводный ветер;
- ледовая обстановка.

Контроль состояния магнитосферы:

- состояние радиационной обстановки в спокойных и возмущенных условиях;
- магнитное поле;
- электрическое поле и токи в магнитосфере.

Контроль волновой активности (электромагнитные, акустические волны):

- регистрация электромагнитных полей в ОКП, ионосфере и верхней атмосфере;
- контроль развития ансамбля внутренних гравитационных волн;
- регистрация акустической волновой активности.

Диагностика корпускулярных ионизирующих излучений:

- регистрация спектров и потоков протонов и электронов;
- регистрация потоков галактического космического излучения.

Баллистическое построение и целевая аппаратура КС мониторинга ГМГФО

Состав гидрометеорологических и геофизических объектов, явлений, процессов и задачи мониторинга позволяют сформировать баллистическую структуру единой КС мониторинга ГМГФО и определить требуемую целевую аппаратуру для специализированных наблюдательных платформ, осуществляющих патруль в разных зонах ОКП. КС мониторинга ГМГФО включает шесть группировок КА.

Внемагнитосферная группировка состоит из 2 КА, расположенных на орбитах в окрестностях точек либрации L1 и L5 системы «Солнце – Земля (рис. 2). КА в точке L1 должен оснащаться аппаратурой для контроля Солнца и солнечной активности и комплексом климатологических приборов для мониторинга альbedo Бонда и теплового баланса Земли. КА в точке L5 должен оснащаться аппаратурой для прогноза геоэффективных процессов на невидимой с Земли части поверхности Солнца и солнечной активности.

Приборный состав КА внемагнитосферной группировки:

- блок солнечных телескопов и спектральных приборов:
 - многоканальный солнечный телескоп;
 - сверхчувствительный рентгеновский спектрофотометр;
 - коронограф белого света с полем зрения 1 – 5 радиусов Солнца;
- детектор солнечных радиовсплесков;
- блок регистрации параметров солнечного ветра и межпланетного магнитного поля:
 - быстрый векторный магнитометр;
 - быстрый монитор частиц;
 - блок регистрации энергичных частиц и потоков жесткого излучения;
 - спектрометр электронов, протонов и ионов;
 - поток и спектр жесткого рентгеновского излучения;
 - поток и спектр гамма-излучения;
 - блок климатических приборов (только на КА в точке L1):
 - измеритель солнечной постоянной;
 - измеритель альbedo Бонда и радиометр.

Геостационарная группировка состоит из 3 КА на геостационарной орбите. КА предназначены для получения изображений низкого разрешения облачности, снежного покрова суши, ледового покрова поверхности морей и океанов, контроля солнечной активности и альbedo Земли в интересах определения глобальных трендов изменений климата, потоков заряженных и нейтральных частиц. Приборный состав КА геостационарной группировки:

- многозональное сканирующее устройство для одновременной съемки в 20-ти каналах;
- гиперспектральный ИК-зондировщик;
- детектор молний с регистрацией явлений в реальном масштабе времени;

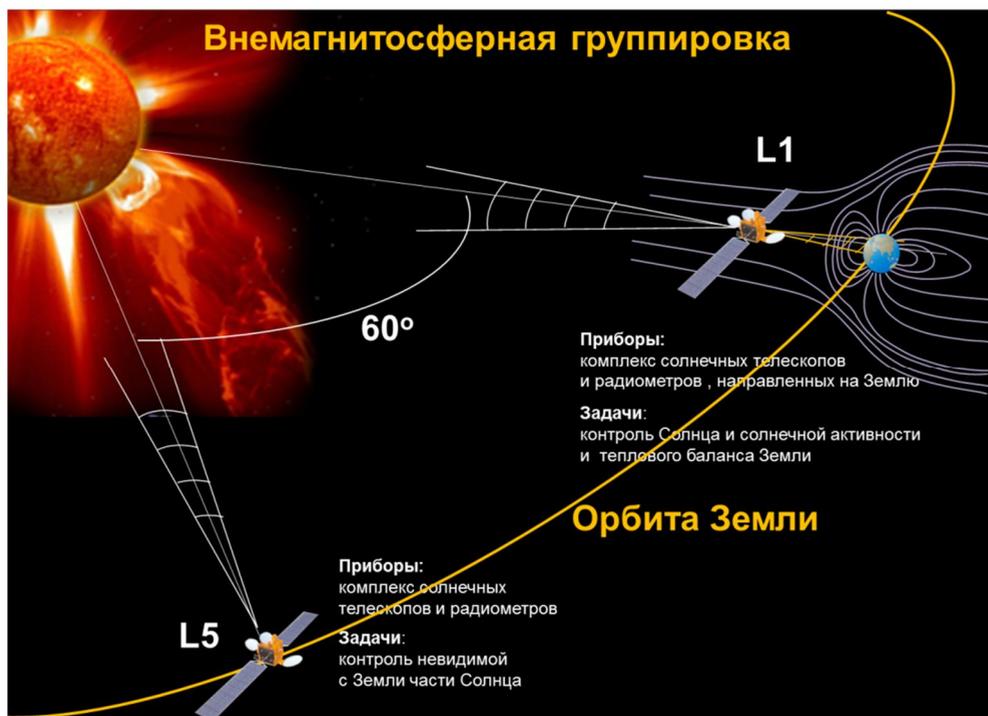


Рис. 2. Построение внемагнитосферной группировки

– гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов и протонов; спектрометр галактических космических лучей; измеритель потока рентгеновского излучения Солнца; измеритель УФ-излучения Солнца; векторный магнитометр).

Магнитосферная группировка состоит из 3 КА на ВЭО: 2 КА – на орбите типа «Молния» и 1 КА – на орбите типа «Тундра». КА на орбите типа «Молния» предназначены для получения картографических изображений облачности и подстилающей поверхности Арктики в различных диапазонах спектра и контроля основных параметров полярной ионосферы, верхней атмосферы, магнитосферы, электромагнитных излучений природного и антропогенного характера, а также обзора авроральной области в УФ-, видимом и ИК-диапазонах. КА на орбите типа «Тундра» предназначен для контроля основных параметров магнитосферы, включая магнитопаузу, полярной ионосферы, электромагнитных излучений природного и антропогенного характера.

Приборный состав КА магнитосферной группировки:

- адаптивный ионозонд;
- многозональное сканирующее устройство гидрометеорологического назначения;
- гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов и протонов; спектрометр галактических космических лучей; векторный магнитометр);
- авровизор;

- измеритель коротковолновой солнечной радиации;
- аппаратура радиотехнического контроля электромагнитных излучений (широкополосный анализатор в диапазоне частот от 0,8 Гц до 200 МГц; ВЧ-приемник-анализатор – 0,1– 48 МГц; радиоспектрометр УКВ-излучений – 41 – 53 МГц и 75 – 92 МГц; низкочастотный волновой комплекс – 1 Гц – 20 кГц);

Ионосферная группировка состоит из 8 КА на орбитах высотой 600 – 800 км в восьми околополярных орбитальных плоскостях, равномерно разнесенных относительно направления на Солнце. КА предназначены для контроля параметров ионосферы с помощью радиолокатора. Приборный состав КА ионосферной группировки:

- ионозонд;
- зонд Ленгмюра;
- ГЛОНАСС/GPS измеритель полного электронного содержания;
- трехчастотный передатчик когерентных сигналов;
- гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов и протонов; спектрометр галактических космических лучей; векторный магнитометр).

Гидрометеорологическая группировка состоит из 8 КА на ССО высотой 650–900 км. Первые 4 КА предназначены для получения многозональных изображений, включая радиолокационные, в целях мониторинга и прогноза гидрометеорологической обстановки. Другие 4 КА предназначены для анализа и прогноза состояния акватории морей и океанов. Все КА группировки оснащаются аппаратурой контроля параметров верхней и средней атмосферы, волновой активности, электромагнитных полей, потоков ионизирующей радиации, потоков заряженных и нейтральных частиц.

Приборный состав КА гидрометеорологической группировки:

- блок гидрометеорологических приборов:
- многозональное сканирующее устройство малого разрешения;
- инфракрасный Фурье-спектрометр;
- модуль температурно-влажностного зондирования атмосферы;
- спектрометр для определения газового состава атмосферы;
- скаттерометр Ку-диапазона с режимом вблизи надирного зондирования;
- блок океанографических приборов:
- сканер цветности океана;
- сканер береговой зоны;
- многозональное сканирующее устройство в ближнем ИК диапазоне;
- скаттерометр (приводный ветер);
- бортовой радиолокационный комплекс;
- блок геофизических приборов:
- гелиогеофизический аппаратный комплекс (спектрометр низкоэнергичных электронов и протонов; спектрометр галактических космических; векторный магнитометр);
- радиочастотный масс-спектрометр;
- озонметр;
- спектрозональная система;
- аппаратура радиотехнического контроля электромагнитных излучений (аналогичная аппаратуре на КА магнитосферной группировки).

Радиозатменная группировка состоит из 16÷24 малых КА на околополярных орбитах высотой 600 – 1000 км. КА предназначены для мониторинга ионосферы и атмосферы методом радиозатменного зондирования. Приборный состав КА радиозатменной группировки:

– аппарататура радиозатменного мониторинга атмосферы и ионосферы.

Технологические предпосылки создания КС мониторинга ГМГФО

КС должна создаваться на базе заделов отечественных космических технологий: ионосферные КА на основе разработок АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в рамках ОКР «Ионозонд-2025», гидрометеорологические КА – на основе КА типа «Метеор» АО «Корпорация «ВНИИЭМ», радиозатменные КА на основе заделов в рамках ОКР «Метеор-МП» и ОКР «Ионозонд-2025», магнитосферные КА – на основе разработок ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина» КА «Арктика-М», геостационарные КА – на основе КА типа «Электрон» ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина», внемагнитосферные КА – на технологической базе КА типа «Спектр» и «Интергелиозонд» ФГУП «НПО им. С.А. Лавочкина».

Наземный комплекс приема, обработки и распространения информации является территориально распределенным.

Технология создания комплекса целевой геофизической аппаратуры объединяет технологические возможности ряда предприятий: ИКИ РАН, ФИАН им. П. Н. Лебедева, ОАО «НПК «СПП», АО «РКС», НИИЯФ МГУ, АО «Корпорация «ВНИИЭМ», ФИРЭ РАН, ИЗМИРАН и др.

Заключение

Разработана структура геофизических сред и параметров ГМГФО, которая является основой для построения концепции системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки. Концепция включает состав задач, решаемых КС мониторинга ГМГФО, баллистическое построение космических средств, которые включены в шесть группировок КА: внемагнитосферная, геостационарная, магнитосферная, гидрометеорологическая, ионосферная, радиозатменная. Разработан состав целевой аппаратуры для каждой группировки КА. Показаны технологические предпосылки реализации концепции. Предложенная концепция может служить основой для разработки Программы создания перспективной космической системы мониторинга гидрометеорологической и геофизической обстановки.

Литература

1. Авдюшин С. И., Габбасов М. З., Головкин А. В., Журавлев С. В., Селин В. А., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Космический сегмент системы мониторинга геофизической обстановки // Космонавтика и ракетостроение. – 2010. – № 2. – С. 64 – 69.
2. Габбасов М. З., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Состав и характеристика целевой аппаратуры космического сегмента системы мониторинга геофизической обстановки // Космонавтика и ракетостроение. – 2013. – № 4 (73). – С. 139 – 147.
3. Асташкин А. А., Буров В. А., Журавлев С. В., Карелин А. В., Лапшин В. Б., Твердохлебова Е. М., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Структура параметров геофизических процессов в околоземной среде. Основные принципы концепции перспективной космической системы мониторинга геофизической обстановки // Гелиогеофизические исследования. – 2015. – Вып. 13. – С. 10 – 28. – ISSN 2304-7380.

4. Карелин А. В., Твердохлебова Е. М., Шувалов В. А., Яковлев А. А. Концепция построения космической системы мониторинга геофизической обстановки // *Космонавтика и ракетостроение*. – 2018. – № 1 (100). – С. 1932.
5. Твердохлебова Е. М., Хартов В. В., Сморшко И. А., Исков Д. А., Акимова А. А. Оптимизация баллистического построения орбитальной группировки КА ДЗЗ для максимально полного удовлетворения требований потребителей // *Тезисы докладов XXII Международной научной конференции «Системный анализ, управление и навигация» / Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)*. – 2017. – С. 83 – 84.

МОНИТОРИНГ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ТРАНЗИЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ ЗЕМЛИ В ПРОЕКТЕ МГУ «УНИВЕРСАТ-СОКРАТ»

**М. И. Панасюк, В. В. Богомолов, Г. К. Гарипов,
П. А. Климов, В. Л. Петров, С. И. Свертилов**
(Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова»,
Научно-исследовательский институт ядерной физики
им. Д. В. Скобельцына,
г. Москва)

Аннотация. Результаты экспериментов на спутнике «Ломоносов» и других спутниках МГУ по исследованию экстремальных явлений в атмосфере Земли и космическом пространстве послужили основой для формирования программы нового проекта Московского университета «Универсат-СОКРАТ», посвященного созданию группировки спутников для мониторинга в режиме, близком к реальному времени, в околоземном космическом пространстве потенциально опасных угроз, в том числе: радиационной обстановки, опасных объектов естественного (астероиды, метеоры) и техногенного происхождения (космический мусор), а также электромагнитных транзиентов – космических и атмосферных гамма-всплесков, вспышек оптического и ультрафиолетового излучения из атмосферы Земли.

Ключевые слова: спутник, космический эксперимент, мониторинг, экстремальные явления, атмосфера Земли, космическое пространство, транзиенты, радиация, астероиды, метеоры, космический мусор.

Введение

Результаты экспериментов на спутнике «Ломоносов» и других спутниках МГУ [1 – 3] по исследованию экстремальных явлений в атмосфере Земли и космическом пространстве послужили основой для формирования программы нового проекта Московского университета «Универсат-СОКРАТ» в котором предполагается создание группировки спутников для мониторинга потенциально-опасных угроз природного и техногенного характера в режиме, близком к реальному времени. В околоземном пространстве к потенциальным угрозам следует отнести космическую радиацию; опасные объектов естественного (астероиды, метеоры) и техногенного происхождения (космический мусор), а также электромагнитные транзиенты – космические и атмосферные гамма-всплески, вспышки оптического и ультрафиолетового излучения из атмосферы Земли (см. рис. 1).



Рис. 1. Основные цели космического проекта «Универсат-СОКРАТ»

Успешная реализация проекта позволит впервые в мире создать прообраз космической системы мониторинга и предотвращения космических угроз как для осуществляемых, так и для планируемых космических миссий, включая высотные атмосферные летательные аппараты.

В настоящей работе более подробно рассматриваются задачи проекта «Универсат-СОКРАТ» по наблюдению экстремальных явлений в атмосфере Земли, обусловленных высотными электромагнитными разрядами – вспышек оптического, ультрафиолетового, рентгеновского и гамма-излучения.

Потенциально опасные факторы в околоземном космическом пространстве

Ионизирующая радиация

Ионизирующая радиация в околоземном пространстве – это, главным образом, потоки энергичных электронов и протонов радиационных поясов Земли, а также энергичных частиц галактических и солнечных космических лучей. Даже в геомагнитно спокойных условиях потоки таких частиц испытывают очень значительные средне- и долгосрочные вариации, которые не могут быть описаны существующими квазистатическими моделями радиационных поясов Земли. С другой стороны, существующие спутниковые измерения проводятся только для ограниченного числа орбит и диапазона питч-углов (угол между вектором скорости частицы и магнитной силовой линией) и не могут дать глобальную картину

пространственно-временных вариаций радиации в околоземном космическом пространстве.

Поскольку космическая радиация представляет опасность для бортовых систем спутников и экипажей пилотируемых кораблей, одна из основных задач создаваемой спутниковой системы – оперативный (близкий к «реальному времени») мониторинг околоземной радиации. В рамках проекта «Универсат-СОКРАТ» несколько малых космических аппаратов (КА), оснащенных несколькими разнонаправленными спектрометрами энергичных протонов и электронов, должны быть выведены на специально подобранные орбиты и осуществлять измерения, которые позволят рассчитывать текущее распределение потоков частиц в большом объеме радиационных поясов – до геостационарной орбиты, и, как следствие, текущие уровни радиационных нагрузок для большого диапазона эксплуатируемых орбит КА.

Важным дополнением к системе космического мониторинга станет разработанная в МГУ полностью автоматизированная наземная система оперативного анализа спутниковых данных, предназначенная для оценки и прогнозирования радиационных условий в околоземном космическом пространстве (ОКП) в режиме реального времени.

Таким образом, основными целями радиационного мониторинга и оперативного прогноза радиационного окружения Земли являются:

- оперативная оценка радиационных условий в ОКП для оценки радиационных рисков выполнения космических миссий и выработки алертных сигналов для принятия решений по управлению ими;
- верификация современных расчетных моделей полей радиации околоземного космического пространства.

Космический мусор, астероиды и крупные метеориты

К существенным факторам риска космических полетов следует отнести космический мусор, а также крупные тела естественного происхождения – астероиды и крупные метеориты. По состоянию на 31 августа 2015 года общее количество находящихся в космическом пространстве и каталогизированных в базах данных «Систем предупреждения об опасных ситуациях в околоземном космическом пространстве» космических объектов техногенного происхождения составило 17 250 космических объектов. Из них 1 362 космических объекта – это действующие космические аппараты, а остальные 15 888 космических объектов – космический мусор [4].

При экстраполяции существующих темпов засорения низких околоземных орбит (НОО), даже с учетом различных мероприятий по его уменьшению, в среднесрочной перспективе может возникнуть «каскадный эффект» взаимного столкновения объектов и частиц космического мусора, который может в долгосрочной перспективе привести к катастрофическому росту количества объектов космического мусора на НОО и, как следствие, к практической невозможности дальнейшего освоения космоса.

Также актуальна проблема астероидной опасности. Небесное тело считается потенциально опасным, если оно пересекает орбиту Земли на расстоянии $<0,05$ а. е. (примерно 19,5 расстояний от Земли до Луны), и его диаметр превышает 100 – 150 м. Объекты таких размеров достаточно крупные, чтобы вызвать беспрецедентные разрушения на суше, либо огромное цунами в случае падения в океан. События таких масштабов происходят примерно раз в 10 000 лет. На основе информации,

полученной с космического телескопа WISE, специалисты оценивают наличие 4700 ± 1500 потенциально опасных объектов с диаметром более 100 метров [5].

Электромагнитные транзиенты

Еще одной задачей проекта будет мониторинг и изучение электромагнитных транзиентных явлений в верхней атмосфере, которые наблюдаются в разных диапазонах длин волн – от радиодиапазона до гамма-. Эти явления связаны с электрическими разрядами, происходящими на высотах в десятки км в верхней атмосфере, и имеют глобальный характер. Выделяемая в них энергия достаточно велика, чтобы оказать существенное воздействие на радиокommunikации, модифицировать физические параметры мезосферы, а также оказать непосредственное влияние на бортовые системы стратосферных суборбитальных летательных аппаратов.

В качестве потенциально опасного явления следует также отметить космические гамма-всплески астрофизического происхождения. Несмотря на большую удаленность источников, будучи связаны с самыми мощными явлениями во Вселенной типа взрыва гиперновой, слияния нейтронных звезд, коллапса магнитного поля магнетара, эти всплески могут представлять потенциальную опасность.

Эффект воздействия достаточно редких, но очень интенсивных космических гамма-всплесков на атмосферу Земли еще не вполне изучен, но в плане ионосферных возмущений, он может быть сопоставим со вспышками на Солнце.

Концепция использования группировки малых спутников для мониторинга космических угроз

В минимальном варианте предполагается использовать группировку из трех космических аппаратов: КА № 1 размещается на низкой солнечно-синхронной орбите высотой 500 – 650 км и наклоном 97 – 98°, КА № 2 запускается на солнечно-синхронную орбиту высотой 1 500 км, а КА № 3 – на эллиптическую орбиту с апогеем 8000 км, перигеем 600 – 700 км и наклоном 63,4°. Взаимное расположение орбит представлено на рис. 2.

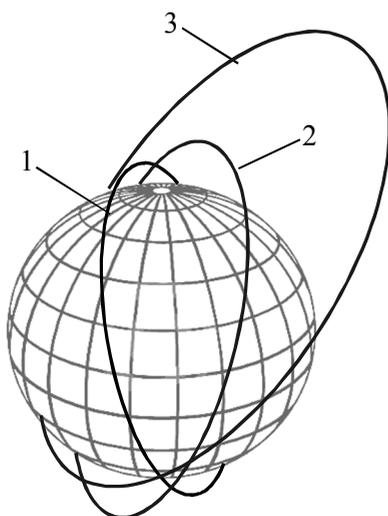


Рис. 2. Взаимное расположение орбит группировки малых КА

Возможен альтернативный вариант конфигурации орбит, когда оба КА № 2 и № 3 запускаются на эллиптические орбиты с апогеем 8000 км, перигеем 600 – 700 км и наклоном 63,4°. При этом аппараты должны быть максимально разнесены в пространстве, т. е., если один КА находится вблизи апоцентра, то другой должен быть вблизи перигея.

На КА № 1 должны быть установлены следующие приборы: аппаратура для мониторинга космической радиации, комплекс приборов для оптического мониторинга опасных объектов, комплекс научной аппаратуры для изучения транзиентных атмосферных явлений (ТАЯ) в оптическом диапазоне, комплекс научной аппаратуры для мониторинга в гамма-диапазоне. В составе аппаратуры на КА №1 также должен быть предусмотрен блок сбора информации БСИ, осуществляющий сбор научной и телеметрической информации с отдельных приборов и передачу ее в бортовое запоминающее устройство (ЗУ), подачу на приборы питания и команд, поступающих от бортовых систем спутника.

На каждом из КА № 2 и № 3 устанавливается аппаратура для мониторинга космической радиации, а также компактный гамма-спектрометр, оптическая камера широкого поля зрения, детектор УФ-излучения (ДУФ) и блок электроники, осуществляющий связь с бортовыми системами спутника.

Поскольку группировка КА «Универсат-СОКРАТ» должна осуществлять мониторинг в режиме, близком к реальному времени, предполагается задействовать другие КА (например, КА системы «Globalstar» или «Гонец», или телекоммуникационные спутники на геостационарной орбите). Также предполагается осуществление совместного мониторинга потенциально опасных объектов в космосе – космическим сегментом «Универсат-СОКРАТ» и наземной сетью роботов-телескопов «МАСТЕР», развернутой в настоящее время в разных странах [6].

В ходе осуществления космического эксперимента предполагается создание наземного комплекса, предназначенного для решения задач управления КА, а также приема и обработки целевой научной информации. Он будет создан на базе наземного научного комплекса (ННК) КА «Ломоносов», который предназначен для планирования целевого применения комплекса научной аппаратуры: приема, обработки, архивации и распространения информации с КА. Созданный ННК представляет собой задел, который будет использован при реализации нового проекта МГУ «Универсат-СОКРАТ», что существенно уменьшит расходы на реализацию проекта. Это позволит избежать затрат, связанных с разработкой основных видов обеспечения полета КА: командно-программного, информационно-телеметрического и навигационно-баллистического обеспечения.

Наряду с системой приема и обработки космической научной телеметрии в МГУ создана система оперативного анализа и прогнозирования радиационных условий в ОКП, основанная на автоматизированном анализе данных космического мониторинга с использованием операционных моделей внешних воздействующих факторов космической среды [7]. Их использование позволит повысить эффективность создаваемой космической системы «Универсат-СОКРАТ».

Аппаратура для мониторинга электромагнитных транзиентов в оптическом и ультрафиолетовом диапазонах

Комплекс научной аппаратуры для изучения ТАЯ в УФ- и оптическом диапазонах должен включать пространственно-чувствительный спектрометр – малый линзовый телескоп (МЛТ) с высоким временным разрешением для измерения спектра

оптического излучения ТАЯ и молний и детекторы УФ- и ИК-излучения ДУФИК – аналог детекторов на спутниках «Татьяна-2» и «Вернов» (для сравнения данных нового КЭ с данными предыдущих), дополненный каналами измерений в дальнем УФ-диапазоне. Измерение спектра необходимо для определения типа и высоты генерации ТАЯ, а также выделения молниевых разрядов по характерной линии 777 нм и по отсутствию сигнала в области линии поглощения кислорода – 762 нм). Оси приборов МЛТ и ДУФИК должны быть ориентированы в надир с углами незатенения 90° вдоль осей детекторов.

Прибор МЛТ должен состоять из линзового широкопольного объектива диаметром 5 см и позиционно-чувствительного детектора в виде мультианодного ФЭУ, а также набора фотоумножителей для измерения длинных временных рядов сигнала ТАЯ с высокой чувствительностью и высоким временным разрешением. Фотоприемники должны располагаться в фокальной плоскости линзы, при этом полное количество пикселей на фокальной поверхности – 256, они составляют матрицу 16×16 (см. рис. 3, слева).

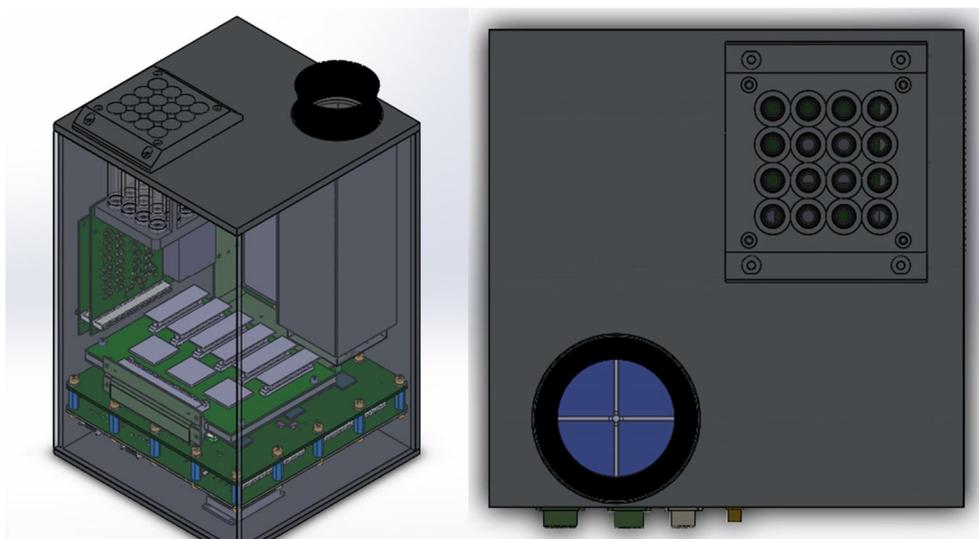


Рис. 3. Общий вид приборов МЛТ (слева) и ДУФИК (справа)

Каждый пиксель мультианодного ФЭУ имеет размер ~3 мм, фокусное расстояние оптической системы 15 см. Угловое разрешение для такой конфигурации телескопа 1,2°, что обеспечивает пространственное разрешение на поверхности Земли ~10 км при высоте орбиты спутника 500 км, при этом площадь обзора атмосферы составляет 25 600 км². Мультианодные ФЭУ функционируют в однофотозлектронном режиме, что обеспечивает высокую чувствительность детектора. Этот режим реализован с помощью специализированной интегральной микросхемы типа SPACIROC-3 (Spatial Photomultiplier Array Counting and Integrating Read Out Chip), которая была разработана для эксперимента JEM-EUSO [8]. Эта микросхема осуществляет счет фотонов за временные интервалы длительностью 1 или 2,5 мкс, что соответствует временному разрешению детектора.

В конструкции прибора также предусмотрено до 16 спектральных каналов на основе одноанодных ФЭУ типа Hamamatsu R1463. Эти ФЭУ образуют матрицу 4×4, в

которой входное окно каждого ФЭУ закрыто отдельным фильтром. Таким образом, каждый ФЭУ регистрирует излучение в пределах всего поля зрения прибора, но в специально выделенном спектральном диапазоне длин волн. Параметры всех спектральных диапазонов длин волн приведены в табл. 1.

Таблица 1

Спектральные диапазоны прибора МЛТ

№	Диапазоны длин волн в каналах (нм)	Примечания
1.	240 – 400	UFS1, UFS2, KS11 фильтры для сравнения с экспериментами МГУ («Университетский – Татьяна», «Татьяна – 2», «Вернов»)
2.	270 – 380	
3.	> 600	
4.	762,7	Маркер TLE – линия поглощения атомарного кислорода
5.	777,4	Маркер молнии – наиболее яркая линия в спектре, используемая для регистрации молний в экспериментах LIS [9] и «Конвергенция» [10]
6.	500.1	Маркер молнии – яркая линия в спектре молнии и отсутствие линии в спектре спрайта [11]
7.	337	Линия 2PN – низкоширотный маркер, должна отсутствовать в спектре молнии согласно данным ISUAL
8.	391.4	1N+ – линия ионизованного атомарного азота
9.	427,8	N2+ присутствует в авроральном свечении, является маркером источников ионизации (потоков энергичных заряженных частиц)
10.	470.9	
11.	690	Диапазон Мейнела – высокоширотный маркер, признак наличия электронов высоких энергий
12.	388,3	Линия цианида (CN), спектральный признак вспышки молнии с продолжающимся током (используется для мониторинга молний, которые могут вызвать лесные пожары, [12])
13.	294	Признак события на очень большой высоте в (линии системы N2(VK));
14.	313	
15.	399,8	Линия 2PN2(1,4), анализировавшаяся [13] в сравнении с линиями 427,8 нм и 470,9 нм);
16.	Без фильтра	Интегральное по спектру излучение молний или TLE

Прибор ДУФИК должен состоять из трех фотоумножителей, входные окна которых закрыты светофильтрами, обеспечивающими работу в разных спектральных диапазонах – инфракрасном (600 – 800 нм), ближнем УФ (240 – 400 нм), солнечно-слепом (100 – 300 нм). Кроме того, в его состав должен входить оптический детектор на основе микроканальной пластины (МКП), обеспечивающий регистрацию излучения в диапазоне от дальнего УФ- до мягкого рентгеновского. Общий вид прибора со стороны входных окон изображен на рис. 5, справа.

Приборы для регистрации вспышек гамма-излучения из атмосферы Земли

Комплекс научной аппаратуры для мониторинга электромагнитных транзиентов в гамма-диапазоне должен включать три широконаправленных сцинтилляционных детектора гамма-излучения типа БДРГ [14] для контроля верхней атмосферы и обзора неба в диапазоне 10 – 3000 кэВ и трековый гамма-спектрометр высокого разрешения и чувствительности.

Детекторный узел каждого блока выполнен в виде сборки тонкого (0,3 см) сцинтиллятора NaI(Tl) и сцинтиллятора CsI(Tl) большей толщины (1,7 см) цилиндрической формы. Оба сцинтилляционных кристалла имеют одинаковый диаметр 13 см и просматриваются одним фотоумножителем Hamamatsu R877 – так называемый «фосвич» (см. рис. 4, правая панель). Толщина слоя NaI(Tl) оптимизирована для детектирования «мягких» гамма-квантов в диапазоне энергий 0,01 – 0,5 МэВ, в то время как толщина CsI(Tl) – для диапазона 0,05 – 3,0 МэВ. В такой конфигурации слой NaI(Tl) в основном обеспечивает временные измерения потоков жесткого рентгеновского излучения, а кристалл CsI(Tl) используется как активная защита от фонового гамма излучения, а также служит для расширения энергетического диапазона регистрируемых гамма-квантов – вплоть до 3 МэВ.

Параметры детекторных блоков типа БДРГ приведены в табл. 2.

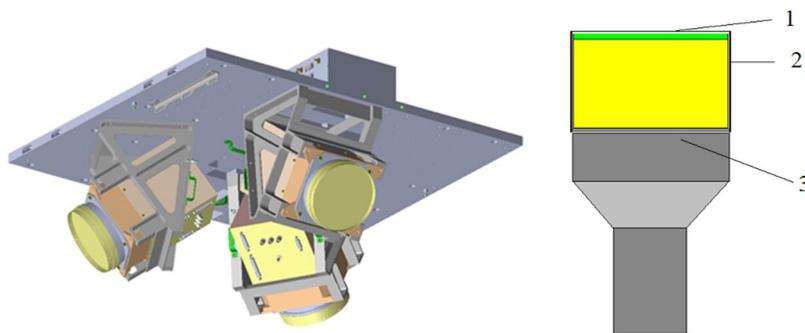


Рис. 4. Левая панель – общий вид расположения блоков детектирования БДРГ, правая панель – структура детекторного узла блока: 1 – кристалл NaI(Tl); 2 – кристалл CsI(Tl), 3 – ФЭУ

Таблица 2

Параметры детекторных блоков БДРГ

Параметр, ед. измерения	значения
Энергетический диапазон, МэВ	0,01 – 3,0
Эффективная площадь (для трех детекторов), см ²	~360
Временное разрешение, мкс	1
Поле зрения, ср	2
Чувствительность для всплеска длительностью 1 мс, фот/см ²	~3×10 ⁻²
Точность локализации источника всплеска	~10° (для наиболее ярких событий)
Масса (лоя одного детекторного модуля), кг	5,5
Информативность, Мбайт/день	~500
Потребляемая мощность, Вт	22,5

Оси трех гамма-детекторов типа БДРГ должны быть перпендикулярны друг другу и направлены вдоль взаимно перпендикулярных ребер куба, как бы образуя Декартову систему координат (см. рис. 4, левая панель). При этом главная диагональ куба должна быть ориентирована в надир.

Трековый гамма-спектрометр высокого разрешения и чувствительности представляет собой комбинацию калориметра на основе позиционно-чувствительного

детектора (ПЧД) и кодирующей маски. В состав прибора также входит годоскопический узел на основе сцинтилляционных волокон. Структурная схема прибора представлена на рис. 5. Кодирующая маска с узором в виде случайно расположенных отверстий должна находиться над ПЧД на расстоянии не менее 50 см. Ось прибора должна быть ориентирована вдоль оси «надир – зенит», при этом со стороны кодирующей маски прибор должен быть ориентирован в зенит, а со стороны годоскопического узла – в надир. В случае регистрации ТГФ такая ориентация позволит оценить углы прихода регистрируемых квантов, исходя из параметров рассеяния гамма-квантов, которые выделили часть энергии в калориметрическом и годоскопическом узлах. Совместный анализ энерговыделений в калориметрическом и годоскопическом узлах также позволит эффективно разделять гамма-кванты, нейтроны и заряженные частицы. В случае полного поглощения в калориметре может быть определена исходная энергия регистрируемых кванты или частицы.

Эффективная площадь гамма-спектрометра $\sim 250 \text{ см}^2$, диапазон энергий 50 – 5000 кэВ (в режиме кодирования 50 – 1000 кэВ), угловое разрешение $\sim 2^\circ$, поле зрения полного кодирования $\pm 25^\circ$. Гамма-телескоп дает возможность проводить проверку появления точечного источника и, таким образом, отделять гамма-всплески различной природы от высыпаний частиц. Аппаратура также включает блок анализа данных, содержащий узлы цифровой электроники, позволяющие вести запись показаний с высоким временным разрешением (до 10 мкс), проводить оперативный анализ изображений с телескопа с кодирующей маской, а также вырабатывать триггер гамма-всплеска.

Калориметрический и годоскопический узлы должны состоять из набора идентичных модулей, что обеспечивает возможность увеличения регистрирующей площади и толщины поглощающего слоя в зависимости от массогабаритных ресурсов космического аппарата. Ниже будут рассмотрены характеристики калориметрического и годоскопического узлов в минимальном варианте.

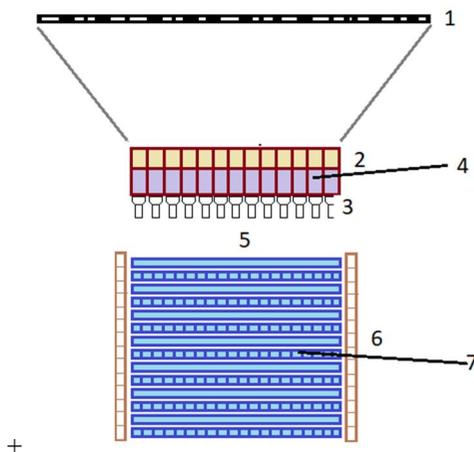


Рис. 5. Структурная схема трекового-гамма спектрометра: 1 – кодирующая маска; 2 – пиксели из сцинтиллятора Ce:GAGG; 3 – фотоумножители; 4 – позиционно-чувствительный калориметр; 5 – сцинтилляционные волокна; 6 – матрицы кремниевых фотоумножителей (SiPM); 7 – «пространственно-чувствительный» годоскоп

Калориметрический узел представляет собой матрицу из минимум 16×16 сцинтилляционных кристаллов Ce:GAGG размером $1,0 \times 1,0 \times 3,0$ см³ каждый. Кристаллы Ce:GAGG характеризуются достаточно большим световыходом ($\sim 57\,000$ фот/МэВ) и плотностью ($\sim 6,7$ г/см³) при довольно малом времени высвечивания ~ 80 нс [15]. Это позволит реализовать высокую точность временных измерений, большую эффективность регистрации гамма-квантов в широком энергетическом диапазоне и приемлемое энергетическое разрешение. К примеру, для кристаллов Ce:GAGG толщиной 3,0 см энергетическое разрешение при энергии 1 МэВ составило ~ 4 %. Для просмотра пикселей в калориметрическом узле в качестве фотоприемников предполагается использовать матрицы кремниевых фотоумножителей (Si-PM) или вакуумные ФЭУ малого размера типа Hamamatsu R1463 с входным окном $\varnothing 13$ мм. Диапазон чувствительности фотокатода таких ФЭУ 300 – 650 нм, при максимуме около 420 нм соответствует эмиссионному спектру Ce:GAGG .

Годоскопический узел трекового гамма-спектрометра должен состоять из набора светопроводящих сцинтилляционных волокон малой толщины (0,15 см или меньше). Волокна должны образовывать слои таким образом, чтобы в прилегающих слоях волокна были ориентированы перпендикулярно друг другу. Такая конфигурация позволит разделять события, связанные с регистрацией гамма-квантов и нейтронов. Принцип детектирования гамма-квантов основан на их Комптоновском рассеянии в волокнах, а регистрация быстрых нейтронов осуществляется в режиме их упругого рассеяния на ядрах водорода в сцинтилляционном волокне [16, Июдин]. Малая толщина волокна обеспечивает высокое пространственное разрешение при регистрации гамма-квантов и нейтронов, а также низкий порог регистрации гамма-кванта при условии, что значимая энергия должна выделиться в актах взаимодействия, по крайней мере, в двух соседних слоях. Для регистрации световых вспышек в сцинтилляционных волокнах должна использоваться многопиксельная матрица кремниевых ФЭУ Si-PMs. При этом поверхность матрицы фотоприемников должна располагаться напротив торцов волокон таким образом, чтобы каждое волокно просматривалось соответствующей ячейкой (пикселем) обоих фотоприемников Si-PMs, расположенных с противоположных торцов.

Важным преимуществом прибора является возможность использования различных триггеров. С помощью одного из них должна осуществляться идентификация событий, связанных с упругим рассеянием быстрых нейтронов с энергиями от 5 до 100 МэВ. Выработка соответствующего триггера основана на анализе кинематики отдельного события при условии, что в объеме годоскопа имеются две или более точек взаимодействия нейтрона. Другой триггер должен использоваться при увеличении фона заряженных частиц. При его выработке предполагается, что проникающие заряженные частицы взаимодействуют в основном во внешних слоях годоскопа и, таким образом, внутренние слои должны быть защищены от проникновения таких частиц. Таким образом реализуется активная защита.

Условия выработки триггеров могут быть проверены в цифровых блоках прибора в соответствии с заданными алгоритмами. Должна быть предусмотрена возможность коррекции алгоритмов в зависимости от специфических фоновых условий и выбора наиболее приоритетных задач.

Трековый гамма-спектрометр должен также содержать собственный узел аналоговой и цифровой электроники, обеспечивающей считывание сигналов с детекторных модулей и их цифровую обработку. Параметры прибора приведены в табл. 3.

Параметры трекового гамма-спектрометра

Параметр, ед. изм.s	Значение
Энергетический диапазон регистрируемых гамма-квантов, МэВ	
все типы взаимодействий в ПЧД	0,02 – 10,0
режим кодированной апертуры	0,02 – 1,0
режим двойного комптоновского рассеяния	0,5 – 10,0
Эффективная площадь, см ² (все типы взаимодействий)	~250
Угловое разрешение	
режим кодированной апертуры	~2°
режим двойного комптоновского рассеяния (при 1 МэВ)	10 – 15°
Временное разрешение, нс	5
Энергетическое разрешение (при 1 МэВ)	5 %
Чувствительность при времени экспозиции 1 мс, см ⁻²	~3×10 ⁻²
Энергетический диапазон для нейтронов, МэВ	3 – 100
Эффективная площадь для нейтронов, см ² (при 40 МэВ)	13
Mass, kg	40
Information capacity, MByte/day	~500
Power consumption, W	60

Основной режим работы аппаратуры – дежурный, когда все приборы включены. Переключение приборов между режимами работы осуществляется по командам с Земли или внутренним циклограммам БСИ. Для оптимизации управления энергопотреблением аппаратуры должен быть предусмотрен формат информационного обмена между БСИ и служебной платформой, включающий информирование об изменении параметров работы системы энергоснабжения (СЭС) КА и переключение научной аппаратуры в последовательные режимы энергосбережения (изменения режимов работы приборов или их частичного отключения).

Заключение и выводы

В ходе реализации проекта должны быть решены следующие задачи:

- оперативная (в реальном времени) оценка радиационных условий в околоземном космическом пространстве для оценки радиационных рисков выполнения космических миссий и выработки алертных сигналов для принятия решений по их управлению;
- верификация современных расчетных моделей полей радиации околоземного космического пространства;
- оперативный контроль потенциально – опасных объектов естественного и техногенного происхождения в околоземном пространстве;
- контроль электромагнитных транзиентов в верхней атмосфере Земли и космическом пространстве (гамма-всплески, солнечные вспышки).

Успешная реализация проекта позволит:

- впервые в мире создать прообраз космической системы мониторинга и предотвращения космических угроз как для осуществляемых, так и планируемых космических миссий, включая высотные атмосферные летательные аппараты;

- создать новые инновационные технологии в области приборостроения и методы решения информационных задач в реальном масштабе времени;
- разработать новые образовательные стандарты и методы подготовки специалистов в новой сфере прикладных космических исследований.

Благодарности

Статья подготовлена при финансовой поддержке Минобрнауки России по результатам исследований в рамках федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы» (уникальный идентификатор №RFMEFI60717X0175).

Литература

1. Садовничий В. А., Амелюшкин А. М., Ангелопулос В. и др. Космические эксперименты на борту спутника МГУ «Ломоносов» // Космические исследования. – 2013. – Т. 51. – № 6. – С. 470 – 477 (Cosmic Research, pp. 427 – 433).
2. Панасюк М. И., Свертилов С. И., Богомолов В. В. и др. Эксперимент на спутнике «Вернов»: транзитные энергичные процессы в атмосфере и магнитосфере Земли. Ч. I. Описание эксперимента. Космические исследования. – 2016. – Т. 54. – № 4. – С. 277 – 285 (Cosmic Research, pp. 261–269); Ч. II. Первые результаты. Космические исследования. – 2016. – Т. 54. – № 5. – С. 369 – 376 (Cosmic Research, pp. 343 – 350).
3. Садовничий В. А., Панасюк М. И., Яшин И. В. и др. Исследование космической среды на микроспутниках «Университетский – Татьяна» и «Университетский – Татьяна-2» // Астрономический вестник. – 2011. – Т. 45. – № 1. – С. 5 – 31.
4. Harris A. The population of near-Earth asteroids, Icarus. – 2015. – V. 257 – P. 302 – 312.
5. Mainzer A., Bauer J., Grav T., Masiero J. The population of tiny near-Earth objects observed by NEOWISE. The Astrophysical Journal. – 2014. – V. – 784. – №. 2. – P. 110.
6. Lipunov V., Kornilov V., Gorbovkoy E., et al. Master Robotic Net. Advances in Astronomy, 2010, article id. 349171.
7. Калегаев В. В., Бобровников С. Ю., Кузнецов Н. В., Мягкова И. Н., Шугай Ю. С. Центр оперативного космического мониторинга НИИЯФ МГУ. Практические аспекты гелиофизики // Материалы специальной секции «Практические аспекты науки космической погоды» 11-й ежегодной конференции «Физика плазмы в солнечной системе» 17 февраля 2016 г. / ИКИ РАН. – 2016. – С. 146 – 159.
8. Blin-Bondil, S., Barrillon, P., Dagoret-Campagne, S., Dulucq, F., de La Taille, C. Miyamoto, H., Moretto, C., Rabanal, J., Thienpont, D., and Tongbong, J. Proc. of TIPP 2014, 2014. PoS(TIPP2014)172.
9. Orville R. E. and R. W. Henderson, 1984: Absolute Spectral Irradiance Measurements of Lightning from 375 to 880 nm // J. Atmos. Sci., 41, 3180 – 3187, [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1984\)](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1984)).
10. Sharkov E. A., Kuzmin A. V., et al. Space Experiment «Convergence»: Scientific Objectives, On-Board Equipment, Methods of Reverse Problems, Izv., Atm. and Oceanic Physics. – 2018. – V. 54. – № 9.
11. Milikh G. M, Papadopoulos K. and Valdivia J.A. Spectrum of Red Sprites. (1998) // J. Atm. Terr. Phys., 69. – P. 907 – 915.

12. Christian, H. J., Frost R. L., Gillaspy P. H., Goodman S. J., Vaughan O. H., Brook M. B. Vonnegut, and R. E. Orville, 1983: Observations of Optical Lightning Emissions from above Thunderstorms Using U-2 Aircraft. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 64, 120 – 123, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1983\)](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1983)).
13. Armstrong R. A., Suszcynsky D. M., Lyons W. A., Nelson T. E., Multi-color photometric measurements of ionization and energies in sprites // *Geophysical Research Letters*, vol. 27, no. 5, pp 653 – 656, March 1, 2000.
14. Svertilov S. I., Panasyuk M. I., Bogomolov V. V., et. al. Wide-field gamma-spectrometer BDRG: GRB monitor on-board the Lomonosov mission // *Space Science Reviews*. – 2018. – 214(1):8.
15. Iwanowska J., Swiderski L., Szczesniak T, et al. Performance of cerium-doped $Gd_3Al_2Ga_3O_{12}(GAGG:Ce)$ scintillator in gamma-ray spectrometry // *Nucl. Instrum. Meth. A*. – 2013. – V. 712. – P. 34 – 40.

ПУТИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ИСПЫТАНИЯ РЕЛЕ НА ЦЕНТРИФУГЕ

Ю. Н. Черкасов,
(АО «Корпорация ВНИИЭМ»,
г. Москва)

Аннотация. Штатная технология испытания реле на центрифуге имеет недостатки. Выявлены пути совершенствования испытания реле на центрифуге. Описаны новые научно-технические разработки испытания реле на центрифуге, имеющие научную новизну. На основе этих усовершенствований разработана и реализована новая, более эффективная, технология испытания реле на центрифуге. Внедрение этой технологии дало новые технические результаты и ежегодный экономический эффект.

Ключевые слова: реле, испытание, технология, центрифуга, способ испытания, способ измерения параметров, эффективность технологии.

Испытание реле на центрифуге является наиболее трудозатратным и в то же время наиболее динамичным испытанием [1]:

- по техническим условиям (ТУ) на испытание каждого реле отводится только три минуты;
- каждое реле необходимо испытать в трёх взаимно перпендикулярных положениях;
- в каждом положении реле необходимо измерить 4 параметра у каждого реле;
- всего необходимо испытать 10 реле;
- нужно 16 раз спуститься в яму центрифуги;
- нужно 20 раз открутить и 20 раз закрутить фиксаторы поворотной плиты;
- выполнить 15 балансировок плеч центрифуги;
- выполнить 5 установок реле на центрифугу;
- число коммутаций измерительных цепей с помощью штырей – 40.

Центрифуга представляет собой [2] два плеча через 180°, вращающихся вокруг вертикальной оси и размещенных для безопасности в металлическом цилиндре диаметром ~4 м и высотой ~1,7 м. Для испытания реле закрепляют в специальном приспособлении, которое устанавливают на поворотную плиту, смонтированную на конце одного из плеч. На конце противоположного плеча крепят грузы переменной массы для балансировки плеч центрифуги. Организационно центрифуга размещена в двух комнатах. В одной комнате, назовем ее комната центрифуги, находится собственно центрифуга, в другой, назовем ее комната управления, находится пульт управления центрифугой, клеммная плата и испытательное оборудование для реле.

При штатной технологии испытания реле на центрифуге одновременно можно испытать только два реле [3]. Поэтому была разработана схема (рис. 1) испытаний на центрифуге 2-х реле [4]. При измерении параметров по этой схеме оба источника подключались, с помощью штырей, сначала к одному реле (на рис. 1 сплошные линии), затем к другому (штриховые линии). Из-за этих коммутаций на измерение 4-х параметров у каждого реле оставалось мало времени, еле успевали измерить каждый параметр по одному разу. Поэтому ни о какой точности оценки параметров речь и не вели. За оценку параметра брали одно единственное измерение, полученное наспех, что противоречит всем правилам математической статистики. Кроме этого, при кон-

трое состояния контактов реле (замкнуто-разомкнуто) при действии на реле линейного ускорения имели место ошибки первого и второго рода, на подтверждение или отклонение которых не хватало времени, поскольку на испытание по ТУ давалось только три минуты.

По ТУ испытать на центрифуге нужно 10 реле, а конструктивно испытать одновременно можно только два реле, поэтому за всё время испытаний приходится выполнять большое число монтажных работ и много коммутаций проводов. В работе [5] дан полный перечень монтажных работ и коммутаций измерительных проводов. Там же [5] показано, что штатная технология испытания реле на центрифуге имеет ряд недостатков, среди которых наиболее значимыми являются:

- малое число одновременно испытываемых реле;
- большие ресурс-, энерго- и трудозатраты;
- большое число монтажных работ и коммутаций измерительных проводов;
- примитивная измерительная схема;
- низкая точность оценки параметров.

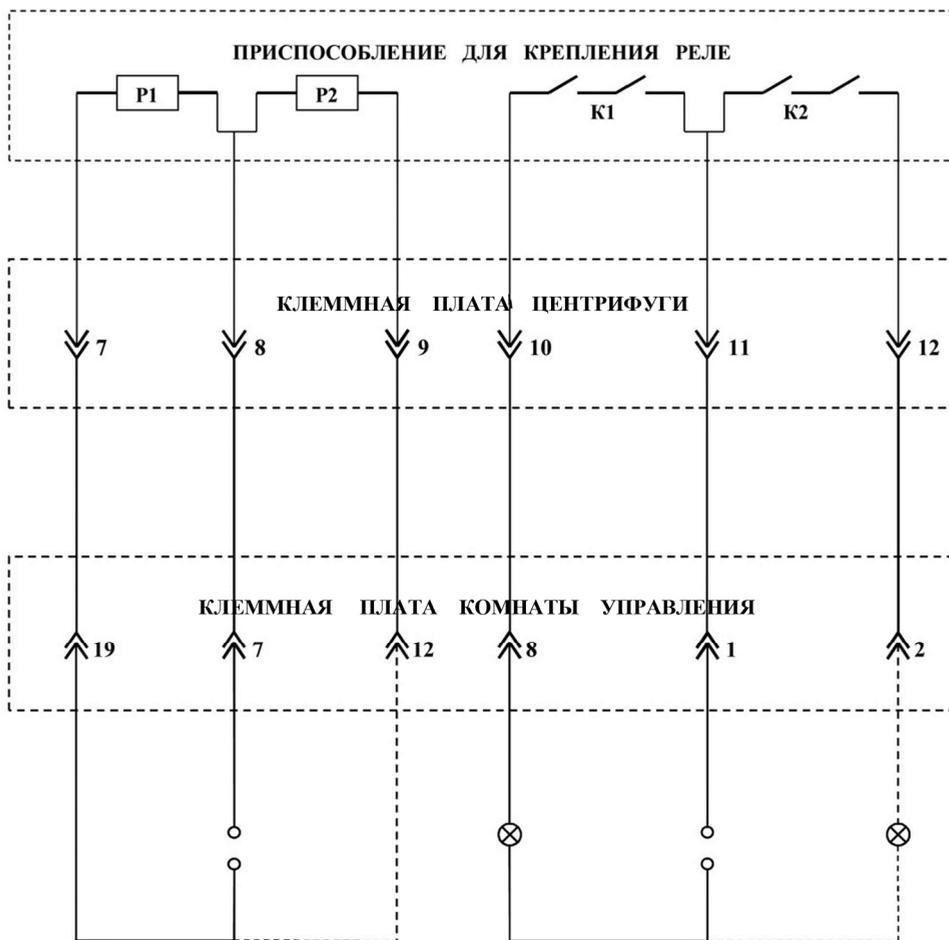


Рис. 1. Штатная схема испытаний реле на центрифуге

Поэтому совершенствование испытаний реле на центрифуге является востребованным и актуальным.

На основании выше проведённого краткого анализа испытаний реле на центрифуге и пользуясь результатами работы [5], можно назвать следующие пути совершенствования испытаний реле на центрифуге:

1. Увеличение числа одновременно испытываемых реле.
2. Уменьшение ресурсо-, энергозатрат и трудоёмкости испытаний.
3. Повышение точности оценки параметров реле.
4. Разработка более совершенной технологии испытаний реле на центрифуге.

Одновременное удовлетворение этих противоречивых требований, на первый взгляд, невозможно, поскольку реле – серийная продукция и, следовательно, при испытаниях должны быть строго выполнены все требования нормативно-технической документации (НТД), в том числе и ТУ. А в ТУ указано, что испытание каждого реле необходимо провести в трёх взаимно перпендикулярных положениях, в каждом положении по три минуты, при этом нужно успеть измерить у каждого реле 4 параметра.

Многолетние теоретические и экспериментальные изыскания [5] позволили положительно решить эту, казалось, неразрешимую, на первый взгляд, задачу. Было разработано новое приспособление для крепления одновременно 10 реле (рис. 2).

Это приспособление позволяет испытывать одновременно всю выборку – 10 реле.

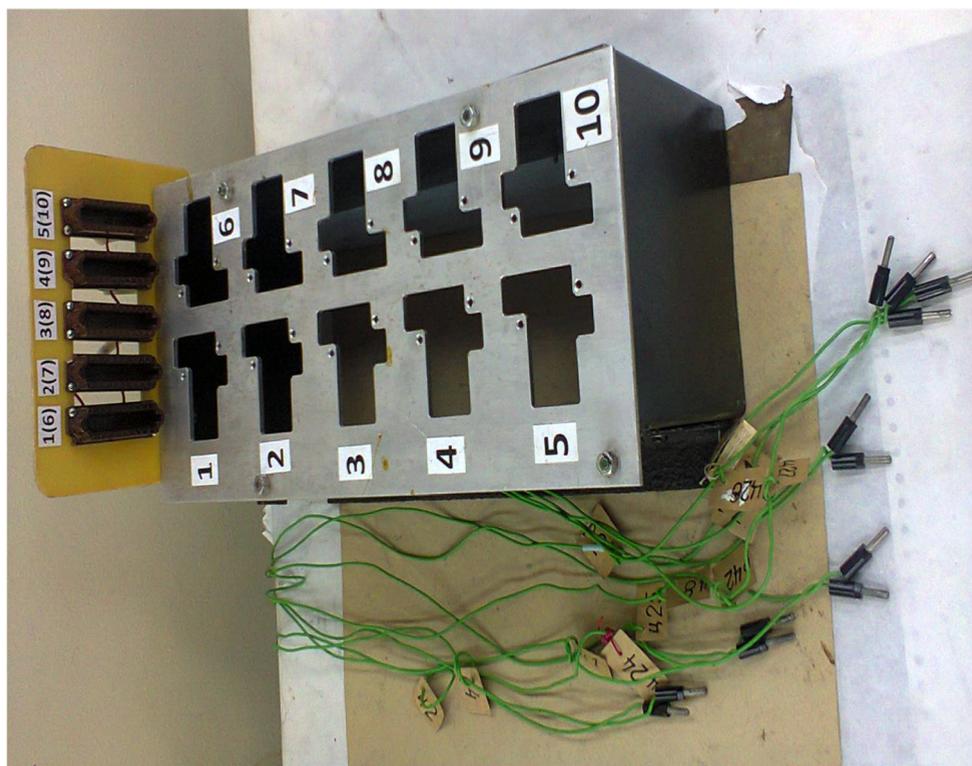


Рис. 2. Приспособление для крепления 10 реле в сборе

Но у центрифуги недостаточно клемм для испытания 10 реле. Поэтому выборку разделили пополам по 5 реле. Но оказалось, что и для 5 реле у центрифуги недостаточно клемм. Казалось, что задачу – испытывать одновременно пять реле при недостатке клемм на центрифуге, решить невозможно.

Однако удалось разработать новый принцип построения измерительной схемы – принцип пространственно-разнесенных электрических перемычек и тумблеров, основу которого составило так называемое сигнально-коммутационное устройство Черкасова (СКУЧ). Внешний вид СКУЧ показан на рис. 3, а схема испытаний на основе СКУЧ на рис. 4.

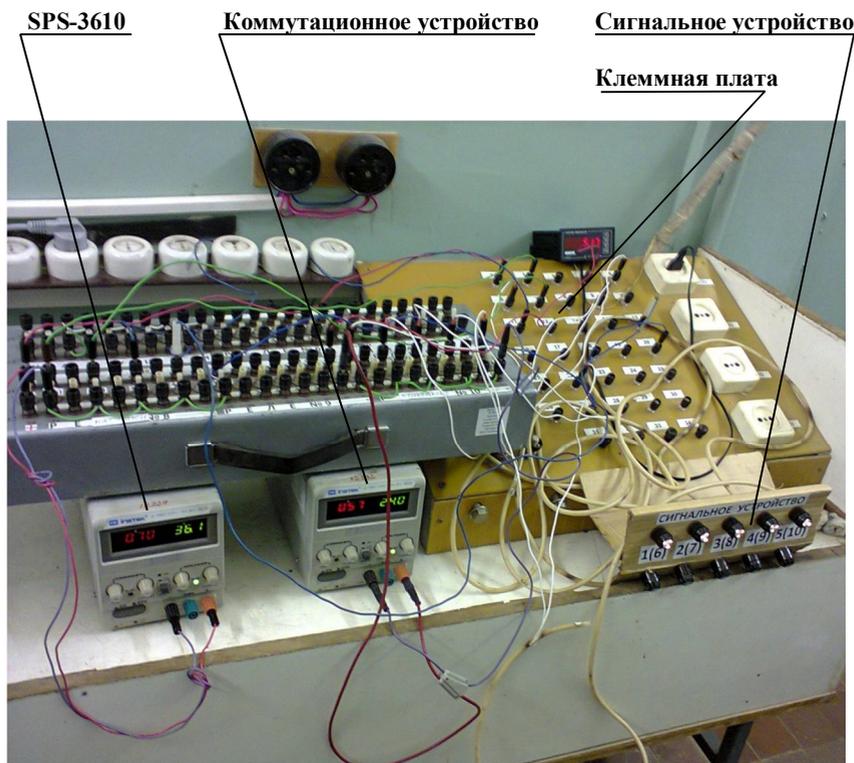


Рис. 3. Внешний вид СКУЧ (схема испытаний собрана)

На рис. 4 введены следующие обозначения: Р – катушка реле; К – контакты реле; Ш – штепсельный разъем; цифра – номера клемм; Л – сигнальные лампочки в СКУЧ; Т – тумблеры в СКУЧ; SPS-3610 – источники постоянного тока.

Эта схема позволяет испытывать одновременно пять реле при недостатке клемм центрифуги за счет пространственно разнесенных электрических перемычек и тумблеров в СКУЧ.

Схема испытаний состоит из:

- СКУЧ, включающего коммутационное устройство, сигнальное устройство и электрические перемычки;
- клеммных плат комнаты управления и центрифуги;
- приспособления для крепления реле, включающего испытываемые реле, блок из пяти штепсельных разъемов и электрические перемычки.

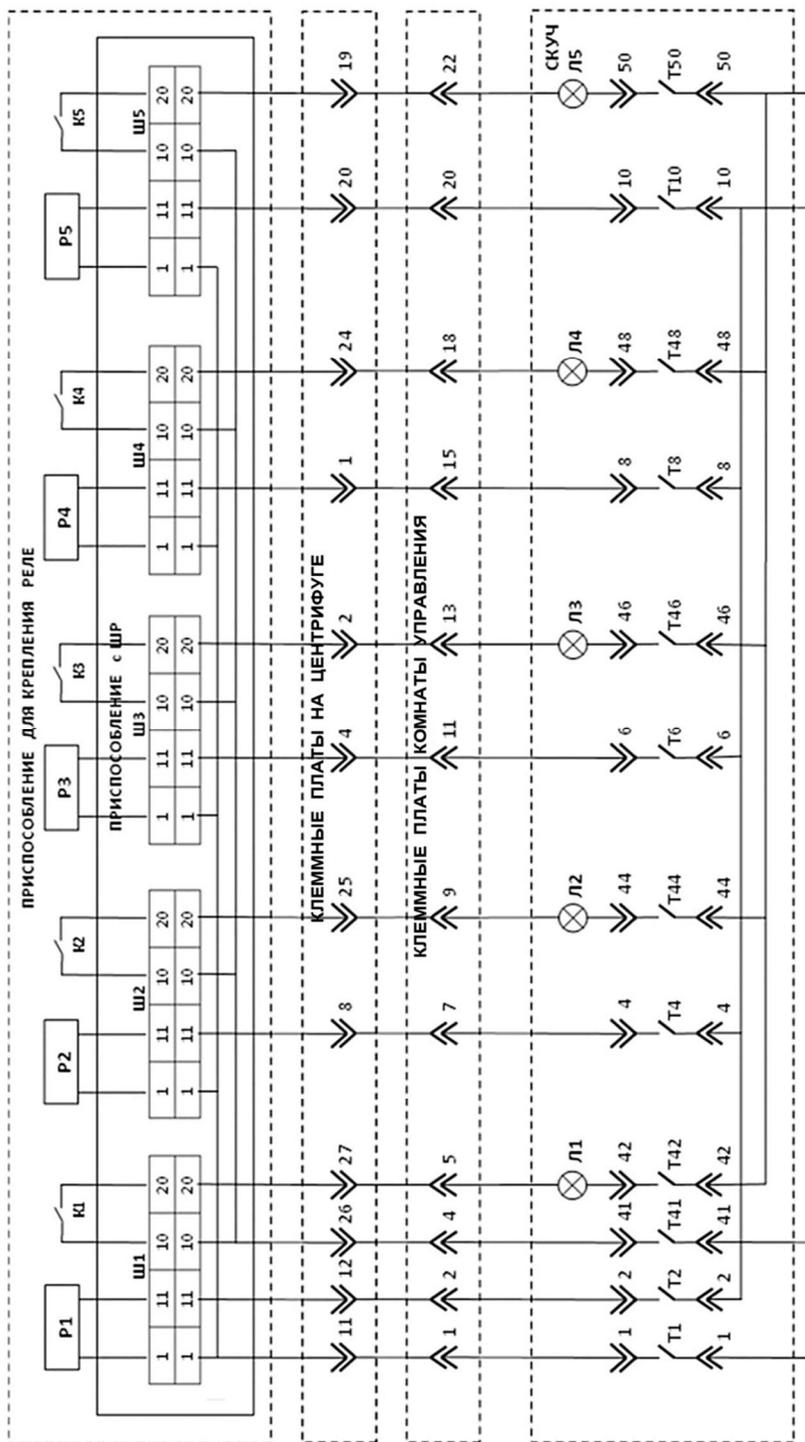


Рис. 4. Реальная схема испытания на центрифуге одновременно пяти реле

Подробно работа схемы описана в работе [5]. Здесь отметим только, что с помощью тумблеров в СКУЧ можно выбрать измерение одновременно всех параметров одновременно у всех реле или на выбор любой их совокупности, или у отдельного реле. С помощью тумблера Т1 практически мгновенно можно перейти от измерения одних параметров одновременно у всех реле к измерению других параметров одновременно у всех реле.

Приведенная схема позволила реализовать новый способ измерения параметров реле, так называемый способ Черкасова, суть которого заключается в одновременном измерении всех параметров одновременно у всех реле за один цикл изменения (увеличения и уменьшения) напряжения только одного источника тока SPS-3610 № 1. В основу способа Черкасова положено естественное состояние катушки реле при наличии напряжения на ней или при его отсутствии. При подаче напряжения на катушку она становится электромагнитом и притягивает якорь, который замыкает контакты реле. Чем больше напряжение на катушке, тем больше притягивающая якорь сила. Следовательно, если контакты замкнуты при некотором напряжении на катушке (напряжение срабатывания), то тем более они будут замкнуты при большем напряжении на катушке. И наоборот, если контакты разомкнутся при некотором (небольшом) напряжении на катушке (напряжение возврата), то тем более они должны быть разомкнуты при меньшем напряжении. Это позволяет совместить измерение напряжения срабатывания и возврата с контролем состояния контактов (замкнуто-разомкнуто). На этом свойстве катушки и основан способ Черкасова – способ одновременного измерения и контроля параметров реле при действии на них линейного ускорения.

Кроме этого, по способу Черкасова предложено использовать переменную скорость изменения напряжения на катушках реле, а именно на интервалах вероятного срабатывания и отпускания реле (оно известно из ТУ и определено опытным путем) изменять напряжение на катушках плавно и медленно, а вне этих интервалов – быстро. Это позволяет «экономить» время и перераспределить это «экономленное» время в пользу времени измерения параметров и тем самым повысить точность оценки параметров. Напомним, что испытание на центрифуге очень динамичное (отведено по ТУ всего три минуты), и поэтому любая «экономия» времени ведет к увеличению числа измерений и тем самым к увеличению точности оценки параметра, что является самым главным при любых измерениях.

На основе этих усовершенствований разработана и внедрена новая технология испытания реле на центрифуге, суть которой состоит в одновременном испытании 5 реле при применении совмещенного способа Черкасова измерения и контроля одновременно всех параметров одновременно у всех реле за один цикл изменения (увеличения и уменьшения) напряжения одновременно на всех катушках реле. Это позволяет за время испытаний (три минуты) измерить все параметры у всех реле несколько раз, а в качестве оценки параметров взять среднее арифметическое значение, которое, конечно же, точнее одного единственного измерения, полученного наспех. А также исключить ошибки первого и второго рода.

Кроме этого, по способу Черкасова предложено изменить последовательность изменения положения приспособления с реле на поворотной плите центрифуги, в сравнении со штатной последовательностью, для первой и второй групп реле. Первую группу реле испытывают в последовательности В → Б → А, а вторую – в последовательности А → Б → В (таблица). Применение такой последовательности испытаний привело к значительному уменьшению числа поворотов поворотной плиты и поворотов приспособления с реле на поворотной плите – самых трудоемких операций.

Последовательность установки приспособления на поворотную плиту

1-я группа – реле 1, 2, 3, 4, 5					2-я группа – реле 6, 7, 8, 9, 10				
В 50 g 3 мин	Поворот приспособления	Б 50 g 3 мин	Поворот плиты	А 25 g 3 мин	А 25 g 3 мин	Поворот плиты	Б 50 g 3 мин	Поворот приспособления	В 50 g 3 мин

При штатной технологии последовательность испытаний во всех пяти установках оставалась одной и той же А → Б → В, что существенно увеличивало число обоих поворотов, а значит трудоёмкость испытаний.

Отметим также, что испытание одновременно пяти реле привело к значительному уменьшению ресурсо-, энерго-, трудозатрат, общего числа операций и общего времени испытаний.

Внедрение новой технологии испытаний реле на центрифуге дало новые технические результаты:

- моторресурса центрифуги тратится в 2,8 раза меньше;
- электроэнергии тратится в 2,5 раза меньше;
- трудозатраты в 2,52 раза меньше;
- общее время испытаний сократилось с 2-х рабочих дней до половины дня;
- повышена точность оценок и достоверность контроля параметров реле, исключены ошибки первого и второго рода;
- существенно уменьшена общая трудоёмкость испытаний.

Заключение

В результате многолетних научно-технических изысканий найдены и реализованы пути существенного совершенствования испытаний реле на центрифуге. В результате этих изысканий разработаны и внедрены:

1. Новое приспособление для крепления реле.
2. Новая схема испытания реле и измерения параметров, построенная на основе сигнально-коммутационного устройства Черкасова.
3. Способ Черкасова – способ одновременного измерения и контроля одновременно всех параметров одновременно у всех реле за один цикл изменения напряжения только одного источника тока.
4. Новая, более эффективная, технология испытания реле на центрифуге.

Эти новые научные и технические результаты дали и дают АО «Корпорация «ВНИИЭМ» ежегодный экономический эффект, повышают качество выпускаемых реле и, тем самым, повышают научно-технический авторитет корпорации, что исключительно важно в условиях рыночной экономики и все ужесточающейся конкуренции фирм.

Литература

1. Технические условия ТУ 16-647.037-86. Реле электромагнитное ЕЖИА 647115.001ТУ.
2. Установка для испытания на воздействие линейных ускорений Ц-50/150. Техническое описание и инструкция по эксплуатации АБ.45.460.00.000. ТО.
3. Черкасов Ю. Н. Периодические испытания реле: Учебное пособие. Издание первое. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009.
4. Черкасов Ю. Н. Совершенствование системы испытаний. Книга 1. Периодические испытания реле / Под ред. П. В. Мальшева. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2010.
5. Черкасов Ю. Н. Совершенствование системы испытаний. Книга 2. Совершенствование испытаний реле на центрифуге / Под ред. А. Л. Меньшенина. – М. : ОАО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2012.
6. Черкасов Ю. Н. Совершенствование системы испытаний. Книга 4. Антология совершенствования испытания реле / Под ред. А. П. Сарычева. – М. : ЛЕНАНД (URSS), 2017.

РАЗРАБОТКА СОВМЕЩЕННОГО СПОСОБА ИСПЫТАНИЯ РЕЛЕ НА ВИБРОСТЕНДЕ

Ю. Н. Черкасов,
(АО «Корпорация ВНИИЭМ»,
г. Москва)

***Аннотация.** Штатная технология испытания реле на вибростенде имеет недостатки. Разработаны новый совмещенный по вибропрочности и виброустойчивости способ испытания реле на вибростенде и новый способ измерения параметров, так называемый способ Черкасова. На основе этих способов разработана и реализована новая, более эффективная, технология испытания реле на вибростенде. Внедрение этой технологии дало новые технические результаты и ежегодный экономический эффект.*

***Ключевые слова:** реле, испытание, технология, вибростенд, способ испытания, способ измерения параметров, эффективность технологии.*

На вибростенде проводят два испытания реле – на вибропрочность и виброустойчивость. По техническим условиям (ТУ) эти испытания считаются независимыми, самостоятельными испытаниями [1]. Поэтому и штатная технология этих испытаний была раздельная – было разработано две независимые технологии [2]. И проводили эти испытания раздельно, поочередно – сначала на вибропрочность, затем на виброустойчивость, причем при каждом испытании параметры тоже измеряли поочередно, сначала напряжение срабатывания и возврата, а потом состояние контактов.

Но оба эти испытания имели одинаковые элементы – одно и то же приспособление для крепления реле на вибростенде – куб, один и тот же пульт для измерения параметров, один и тот же способ измерения параметров и т. д. Разными были только условия испытания. Поэтому обе штатные технологии испытания имели одни и те же недостатки:

1. Малое число одновременно испытываемых реле – только три.
2. Большие ресурсо-, энерго- и трудозатраты.
3. Большое число монтажных работ, поэтому большая трудоемкость испытаний.
4. Низкая точность оценок параметров реле, поскольку испытание на виброустойчивость очень динамичное, на него отводится только три минуты, а надо успеть измерить четыре параметра и поэтому успевали измерить только один раз, а за оценку параметра принимали одно единственное измерение, полученное наспех. Из-за этого имели место ошибки определения состояния контактов (замкнуто-разомкнуто).
5. Для определения как замкнутого, так и разомкнутого состояния контактов реле использовались одни и те же сигнальные лампочки на пульте, что всегда вызывало затруднение при определении состояния контактов реле – замкнуто или разомкнуто.
6. Питание сигнальных лампочек пульта осуществлялось от сети ~220 В, что требует определенных мер безопасности.

Для проведения испытания реле по ТУ (штатная технология) использовались устройство для крепления реле на вибростенде – куб на четыре реле и пульт для измерения параметров, но только на три реле. Поэтому штатная технология испытания реле на вибростенде была для трех реле [3] и приведена в таблицах 1 и 2. Технология была следующей: сначала испытывали на вибропрочность, затем на виброустойчивость, в куб устанавливали по три реле и каждую установку реле испытывали в трех

взаимно перпендикулярных положениях, именуемых А, Б, В. Для проведения этих испытаний приходится делать 23 поворота куба на столе вибростенда, т. е. штатная технология очень трудозатратная.

Таблица 1

Штатная технология испытания реле на вибропрочность

ИСПЫТАНИЕ НА ВИБРОПРОЧНОСТЬ																				
Установка в куб новых реле	1 ^я установка 3 реле				Установка в куб новых реле	2 ^я установка 3 реле				Установка в куб новых реле	3 ^я установка 3 реле				Установка в куб новых реле	4 ^я установка 1 реле				
	Положение куба					Положение куба					Положение куба					Положение куба				
	А	Поворот куба	Б	Поворот куба		В	Поворот куба	А	Поворот куба		Б	Поворот куба	В	Поворот куба		А	Поворот куба	Б	Поворот куба	В

Таблица 2

Штатная технология испытания реле на виброустойчивость

ИСПЫТАНИЕ НА ВИБРОУСТОЙЧИВОСТЬ																					
Поворот куба	Установка в куб новых реле	1 ^я установка 3 реле				Установка в куб новых реле	2 ^я установка 3 реле				Установка в куб новых реле	3 ^я установка 3 реле				Установка в куб новых реле	4 ^я установка 1 реле				
		Положение куба					Положение куба					Положение куба					Положение куба				
		А	Поворот куба	Б	Поворот куба		В	Поворот куба	А	Поворот куба		Б	Поворот куба	В	Поворот куба		А	Поворот куба	Б	Поворот куба	В

Был разработан новый способ испытания реле на вибростенде – совмещенный по вибропрочности и виброустойчивости.

Способ заключается в том, что испытывают одновременно все 10 реле, при этом после испытания на вибропрочность в положении А перестраивают аппаратуру управления вибростендом и в этом же положении А испытывают реле на виброустойчивость. Затем куб поворачивают в положение Б, но испытывают реле сначала

на виброустойчивость, а после перестройки аппаратуры управления испытывают реле на вибропрочность. Затем куб поворачивают в положение В, но испытывают реле сначала на вибропрочность, а после перестройки аппаратуры управления испытывают реле на виброустойчивость. Следовательно, получилось совмещение испытаний на вибропрочность и виброустойчивость при одном положении куба и за два поворота куба удастся провести оба испытания всех реле, т. е. всего $3 \times 2 = 6$ испытаний и только два поворота куба.

Следует отметить, что перестройка аппаратуры управления вибростендом – сравнительно простая, нетрудоемкая и быстрая по времени операция – нужно на компьютере только задать новые уставки испытания, что во много раз менее трудоемко и во много раз быстрее, чем изменить положение куба на испытательном столе вибростенда.

Для реализации совмещенного способа испытания реле на вибростенде были разработаны, изготовлены и внедрены (аттестованы) новый куб на 10 реле (рис. 1), новый пульт тоже на 10 реле (рис. 2) и 10 новых кабелей. Для сравнения на этих же рисунках показаны штатные (старые) куб и пульт на 4 реле после первой его доработки в 2008 г.

Новый куб (рис. 1, слева) принципиально отличается от штатного тем, что в нем может крепиться 10 реле. В центре куба находится сплошная толстостенная перегородка, в которой сделаны специальные выемки (посадочные места) по периметру перегородки для крепления 10 реле. Старый куб (рис. 1, справа) пустотелый, гораздо меньшего размера, в нем может крепиться только четыре реле, а посадочные места «балконного» типа. У нового куба стенки толще, чем у старого.

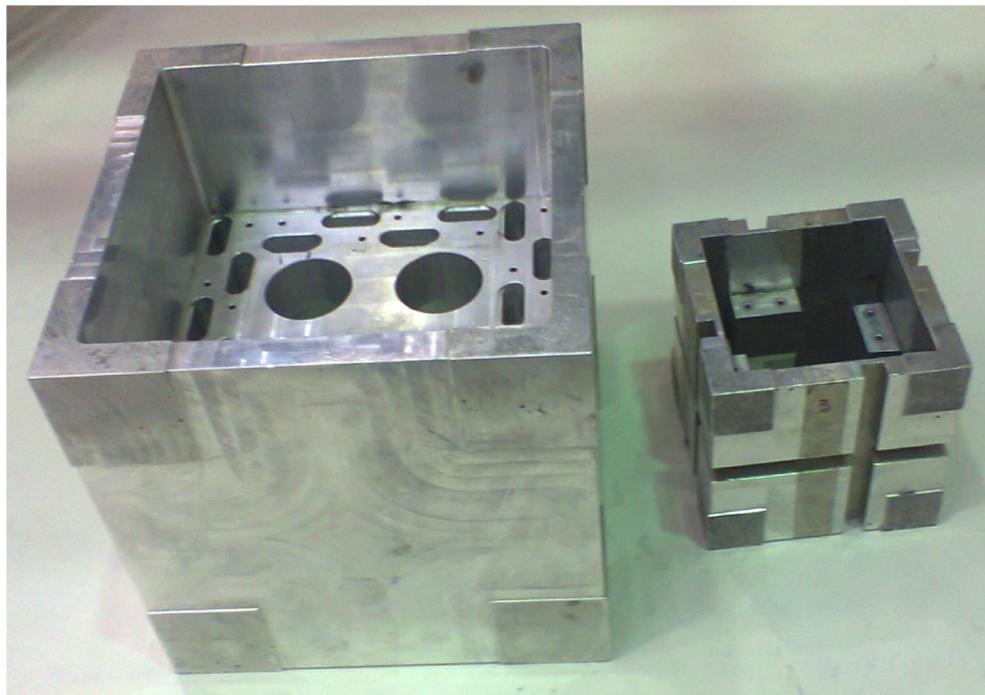


Рис. 1. Куб (слева – новый, справа – старый) для испытания реле вибрацией и ударами

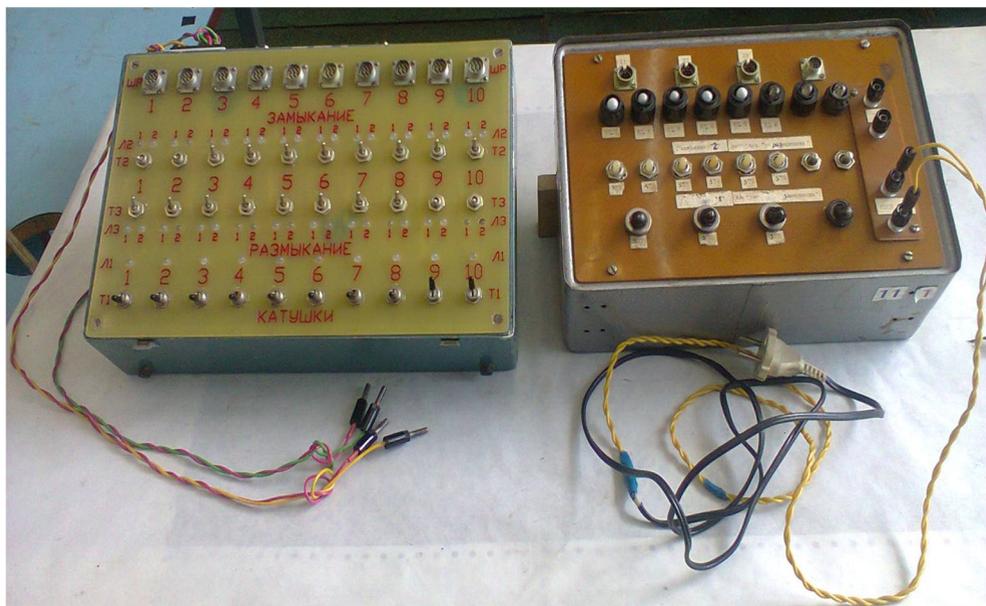


Рис. 2. Пульты (слева – новый, справа – старый) для испытания реле вибрацией и ударами

Новый пульт (рис. 2, слева) тоже принципиально отличается от старого (рис. 2, справа). Он предназначен для измерения параметров 10 реле, старый (доработанный в 2008 г.) – только 4 реле. У нового пульта имеются отдельные сигнальные лампочки для контроля подачи напряжения на катушки реле и отдельные лампочки для контроля как замкнутого, так и разомкнутого состояния контактов реле. У старого пульта одни лампочки для контроля и замкнутого и разомкнутого состояния контактов, а для контроля подачи напряжения на катушки лампочек вообще нет. Кроме этого, у старого пульта питание сигнальных лампочек осуществляется от сети ~ 220 В, у нового – от источника постоянного тока SPS-3610, что, конечно же, абсолютно безопасно.

Внешний вид вибростенда с установленным на нем новым кубом с реле и новой схемой испытания показан на рис. 3.

На основе новых куба и пульта на 10 реле, а также нового (совмещенного) способа испытания разработана и внедрена новая технология испытания реле на вибростенде (таблица 3), суть которой состоит в одновременном испытании 10 реле при применении совмещенного способа испытания в сочетании с так называемым способом Черкасова измерения параметров.

Суть способа Черкасова состоит в одновременном измерении и контроле одновременно всех параметров одновременно у всех реле за один цикл изменения (увеличения и уменьшения) напряжения только одного источника тока одновременно на всех катушках реле.

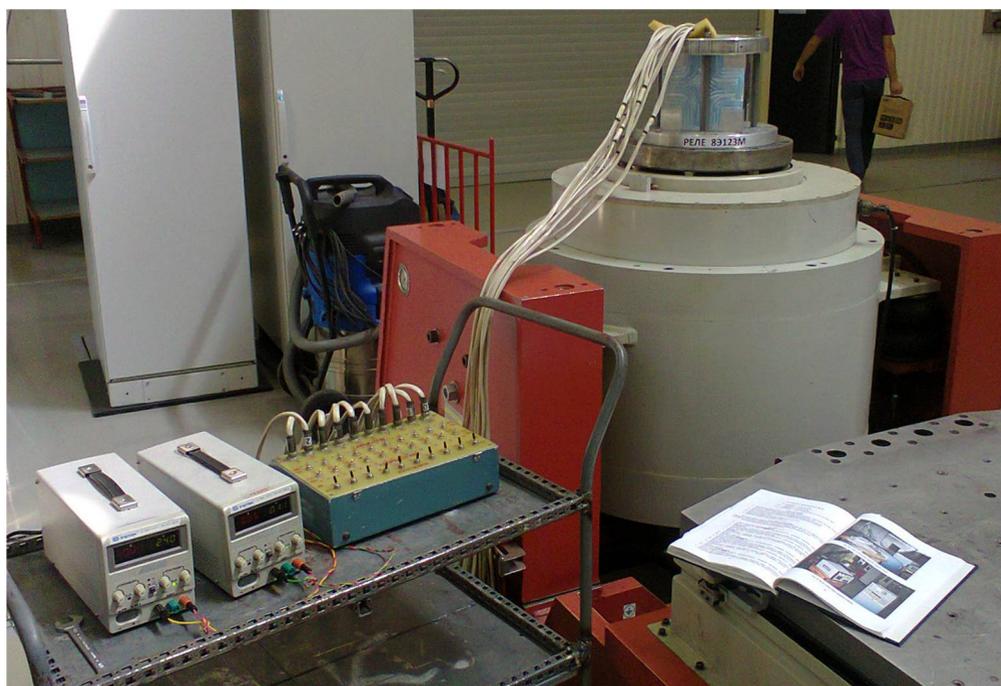


Рис. 3. Внешний вид вибростенда и схемы испытаний в положении А реле

Таблица 3

Новая (совмещенная) технология испытания реле на вибростенде

А			Б			В		
Вибропрочность	ИЗМЕРЕНИЕ Усраб. Увозвр.	Виброустойчивость	Виброустойчивость	Вибропрочность	ИЗМЕРЕНИЕ Усраб. Увозвр.	Вибропрочность	ИЗМЕРЕНИЕ Усраб. Увозвр.	Виброустойчивость
10 мин		3 мин	3 мин	10 мин		10 мин		3 мин
Реле выключены		Реле выключены включены несколько раз	Реле выключены включены несколько раз	Реле выключены		Реле выключены		Реле выключены включены несколько раз
		ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ	ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ			ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ		ИЗМЕРЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ПОВОРОТ КУБА			ПОВОРОТ КУБА			ПОВОРОТ КУБА		

Это позволяет за время испытаний (три минуты) измерить все параметры у всех реле несколько раз, а в качестве оценки параметров взять среднее арифметическое значение, которое, конечно же, точнее одного единственного измерения, полученного наспех. А также исключить ошибки первого и второго рода.

В основу способа Черкасова положено естественное состояние катушки реле при наличии напряжения на ней или при его отсутствии. При подаче напряжения на катушку она становится электромагнитом и притягивает якорь, который замыкает контакты реле. Чем больше напряжение на катушке, тем больше притягивающая якорь сила. Следовательно, если контакты замкнуты при некотором напряжении на катушке (напряжение срабатывания), то тем более они будут замкнуты при большем напряжении на катушке. И наоборот, если контакты разомкнутся при некотором (небольшом) напряжении на катушке (напряжение возврата), то тем более они должны быть разомкнуты при меньшем напряжении. Это позволяет совместить измерение напряжения срабатывания и возврата с контролем состояния контактов (замкнуто-разомкнуто). На этом свойстве катушки и основан способ Черкасова – способ одновременного измерения и контроля параметров реле при действии на них вибрации.

Кроме этого, по способу Черкасова предложено использовать переменную скорость изменения напряжения на катушках реле, а именно на интервалах вероятного срабатывания и отпускания реле (оно известно из ТУ и определено опытным путем) изменять напряжение на катушках плавно и медленно, а вне этих интервалов – быстро. Это позволяет «экономить» время и перераспределить это «сэкономленное» время в пользу времени измерения параметров и, тем самым, повысить точность оценки параметров. Напомним, что испытание на вибростенде очень динамичное (по ТУ отведено всего три минуты), и поэтому любая «экономия» времени ведет к увеличению числа измерений и, тем самым, к увеличению точности оценки параметра, что является самым главным при любых измерениях.

С целью сокращения времени измерения параметров реле измерение параметров выполняют два испытателя, при этом один испытатель изменяет напряжение на катушках реле и снимает показание вольтметра, а другой испытатель регистрирует это показание и следит за состоянием сигнальных лампочек.

С целью сокращения времени измерения параметров реле предложено источник питания катушек SPS-3610 № 1 не выключать, а только уменьшать у него напряжение до минимально необходимого.

С целью ускорения процесса получения оценки параметра предложено первоначально произвести два измерения, сравнить полученные результаты с требованиями ТУ и с результатами испытаний в предыдущие годы. Если полученные эти два результата измерения близки между собой, удовлетворяют требованиям ТУ и находятся в пределах статистического разброса результатов измерения в предыдущие годы, то процесс измерения заканчивают, а в качестве оценки берут среднее значение этих двух измерений. При ошибочности одного измерения производят дополнительные измерения до получения безошибочного результата, оценивают среднее значение двух измерений: одного ранее полученного и безошибочного дополнительного.

Специфика любых механических испытаний, в том числе и на вибростенде, в том, что повторить механические испытания нельзя, т. к. может произойти механическое разрушение реле. Поэтому и провести повторные измерения не представляется возможным. Именно поэтому нужно успеть получить столько результатов измерений, чтобы по выборке получить достоверную оценку параметров.

Способ Черкасова позволяет решить эту непростую задачу на ограниченном интервале испытаний (3 минуты).

Очередным этапом повышения точности оценки параметров может быть внедрение автоматического процесса испытания и, соответственно, измерения и оценки параметров с применением компьютера.

Оценим эффективность новой технологии испытания реле на вибростенде на основе совмещенного способа и способа Черкасова измерения параметров реле. Оценивать будем путем сравнения со штатной технологией с 3 реле. Новая технология – с 10 реле.

Для количественного сравнения выберем 3 характеристики: моторесурс вибростенда, энергопотребление и трудозатраты. Оценивать будем безразмерной величиной в размах.

Экономия моторесурса вибростенда составляет

$$\mathcal{E}_{\text{мт.вибр.}} = \frac{T_{\text{мр.3}}}{T_{\text{мр.10}}} = \frac{156 \text{ мин}}{39 \text{ мин}} = 4 \text{ раза.}$$

Экономия электроэнергии на основании мощности вибростенда [4] составляет

$$\mathcal{E}_{\text{мт.вибр.}} = \frac{P_{\text{эл.3}}}{P_{\text{эл.10}}} = \frac{103,98 \text{ кВт}}{25,99 \text{ кВт}} = 4 \text{ раза.}$$

Трудозатраты оценим по отношению суммарных работ при испытании по штатной технологии с 3 реле и по новой технологии с 10 реле

$$\mathcal{E}_{\text{тр.вибр.}} = \frac{\sum .3}{\sum .10} = \frac{87}{11} = 7,9 \text{ раза.}$$

Эта экономия дает косвенно ежегодный экономический эффект.

Учтем еще несколько качественных оценок эффективности новой технологии. Во-первых, при новой технологии реле в куб во время испытания вообще не устанавливают, поскольку их устанавливают в куб все сразу и до испытания. При штатной технологии эту операцию приходится выполнять 8 раз. А это очень трудоемкие операции. Во-вторых, при новой технологии куб на стенде поворачивают только 2 раза, а при штатной – 23 раза. Для поворота куба нужно снимать и надевать прижимную шайбу куба, а это тоже очень трудоемкие операции. В-третьих, и это главное, удалось повысить точность оценки параметров реле и исключить ошибки первого и второго рода. И наконец, при штатной технологии на испытание затрачивалось не менее одного рабочего дня, при новой технологии – ориентировочно 2 часа.

Заключение

В результате многолетних научно-технических изысканий разработаны и внедрены:

1. Новое приспособление для крепления 10 реле – куб и новый пульт для измерения параметров одновременно 10 реле.

2. Способ Черкасова – способ одновременного измерения и контроля одновременно всех параметров одновременно у всех реле за один цикл изменения напряжения только одного источника тока.

3. Новая, более эффективная, технология испытания реле на вибростенде.

Эти новые научные и технические результаты дали и дают АО «Корпорация «ВНИИЭМ» ежегодный экономический эффект, повышают качество выпускаемых реле и, тем самым, повышают научно-технический авторитет корпорации, что исключительно важно в условиях рыночной экономики и все ужесточающейся конкуренции фирм.

Литература

1. Технические условия ТУ 16-647.037-86. Реле электромагнитное ЕЖИА 647115.001ТУ.
2. Черкасов Ю. Н. Периодические испытания реле: Учебное пособие. Издание первое. – М. : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2009.
3. Пульт П-123-5. Техническое описание и инструкция по эксплуатации.
4. Стенд вибрационный электродинамический ВЭДС-1500 / Министерство приборостроения средств автоматизации и систем управления. – Союзточмашприбор, 1983.
5. Черкасов Ю. Н. Совершенствование системы испытаний. Книга 4. Антология совершенствования испытания реле / Под ред. А. П. Сарычева. – М. : ЛЕНАНД (URSS), 2017.

Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ.
ПРИЛОЖЕНИЕ ЗА 2018 ГОД

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

Материалы издаются в авторской редакции

Подписано в печать 01.10.2018.

Формат 70 ×100 1/16. Усл. печ. л. 14,46. Тираж 100 экз.

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

E-mail: 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», 2018