

## Метод ведения дистанционного зондирования с отбраковкой данных на борту космического средства

А.Н. Григорьев

*Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского  
Санкт-Петербург, 197082, Россия  
E-mail: Grig-AN@ya.ru*

В статье рассматриваются результаты исследования возможностей отбраковки данных космической съемки непосредственно на борту космического аппарата. Предметом исследования является регистрация и бортовая обработка многоспектральных данных о поле облачности. Цель работы состоит в повышении эффективности системы дистанционного зондирования за счет рационального использования ее ресурсов. Автором разработана новая концептуальная модель бортового оптико-электронного специального комплекса с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности. Бортовой комплекс также обеспечивает получение целевых данных с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением. Блок регистрации данных о поле облачности позволяет получать пространственно согласованные спектральные данные за счет применения спектроделителя на основе дихроичных зеркал. Блок обработки представлен схематично и реализует вычисление бортовой оценки облачности над заданным объектом. Приведено краткое описание состава обработки спектральных данных о поле облачности. Автором предложен метод ведения дистанционного зондирования Земли с этапом бортовой отбраковки целевых данных по показателю покрытия объекта облачностью. Особенность метода состоит в выполнении дополнительных действий по определению параметров обработки данных о поле облачности при планировании съемки. Метод позволяет выполнять съемку большего числа объектов и передавать более качественные данные на наземные приемные станции сети дистанционного зондирования.

**Ключевые слова:** бортовой специальный комплекс, спектральный канал, блоки регистрации и обработки, дихроичное зеркало, пространственное согласование

### Введение

Многие задачи по обработке и анализу пространственных данных решаются с применением геоинформационных технологий, позволяющих посредством построения моделей окружающего мира с высокой эффективностью решать научные, производственные и специальные задачи. Основным элементом геоинформационных систем являются банки пространственных данных, традиционное содержание которых – топографические и тематические карты интересующей местности. В силу того, что картографический фонд на территорию Российской Федерации является устаревшим, создание таких банков является проблемным вопросом. Частичное решение может быть достигнуто за счет использования результатов космической деятельности путем создания на основе снимков, зарегистрированных на борту орбитального средства, актуальных слоев данных требуемого пространственного разрешения.

Отдельные задачи в отраслях кадастра, землеустройства, экологического контроля и мониторинга результатов хозяйственной деятельности связаны с изучением элементов техногенного и природно-техногенного ландшафтов, имеющих относительно небольшие пространственные размеры по сравнению с полосой захвата современных бортовых специальных комплексов (БСК) космического базирования. При этом часто требуется регистрация данных с высоким пространственным разрешением. Примером такого БСК является аппаратура на борту современного отечественного космического аппарата дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) «Ресурс-П». Указанный КА позволяет реализовывать различные

режимы съемки, в том числе объективный режим с сокращенной протяженностью маршрута, соответствующей размеру объекта при конкретных условиях съемки.

Производительность космических систем ДЗЗ с оптико-электронными БСК существенно ограничивается нестационарной оптической помехой – облачностью. Для подавления этого фактора при текущем планировании ДЗЗ используются прогнозы метеоситуации в заданных районах съемки, основанные на оперативных данных всемирной метеорологической сети и данных от метеоспутников. Оправдываемость таких прогнозов составляет порядка 80%. Это позволяет судить о том, что около 20% общего потока данных с борта КА ДЗЗ не будет соответствовать требованиям по решению поставленных практических задач. Если рассмотреть случай ведения объектовой съемки и передачи данных на сеть наземного комплекса приема, обработки и распределения информации (НКПОР), например, сеть Росгидромета с основными пунктами приема в Москве, Новосибирске и Хабаровске, то можно следующим образом оценить объем непригодных данных. Продолжительность сеанса связи с КА ДЗЗ на типовой солнечно-синхронной орбите с высотой 500 км на широтах пунктов приема Росгидромета составляет порядка 500 с. При этом условный маршрут объектовой съемки принимается по протяженности равным полосе захвата БСК. В случае применения КА типа «Ресурс-П» маршрут составит  $38 \times 38$  км, а объем регистрируемых данных без учета перекрытия отдельных линеек ПЗС –  $38000 \times 38000$  элементов. При разрядности квантования 12 бит, стандартной бортовой компрессии и помехоустойчивом кодировании объем данных условного маршрута составит около 6,35 Гбит. Современные БСК КА ДЗЗ оборудуются бортовой памятью объемом до единиц Тбит. Бортовое запоминающее устройство в 1 Тбит способно хранить данные более 150 условных кадров объектовой съемки, которые при нахождении КА в зоне радиовидимости пунктов приема НКПОР передаются по высокоскоростной радиолинии. За один сеанс по радиолинии с пропускной способностью 150 Мбит/с можно передать около 11 условных кадров объектовой съемки, а при трех станциях приема – 33 снимка, из которых, согласно оправдываемости метеопрогноза, примерно 7 снимков будут непригодны для использования из-за покрытия объекта облачностью. При существующей технологии приема и обработки данных ДЗЗ отбраковка таких снимков будет выполнена в наземном комплексе НКПОР при их первичной обработке, и ресурс системы, затраченный на передачу таких данных, будет безвозвратно утерян. Таким образом, отбраковка неудовлетворяющих по содержанию данных объектовой съемки на начальных этапах технологии ДЗЗ, например, при бортовой обработке, является актуальной и важной задачей, решение которой обеспечит рациональное использование ресурсов системы.

Идея управления работой оптико-электронного БСК с бортовым оцениванием облачности над заданным районом съемки не является новой. Существует метод, использующий для анализа облачности данные от дополнительного направленного вперед по трассе БСК. При этом на подлете к заданному району съемки с помощью дополнительного БСК регистрируются данные об облачности, и вычисляется оценка наличия облачности над районом. Согласно полученной оценке и установленному критерию

выполняется управление работой основного БСК: регистрировать или не регистрировать данные о заданном районе. Таким образом достигаются эффекты экономии бортовых ресурсов, в том числе памяти, и сокращения доли передаваемых непригодных данных. При этом неизбежным является усложнение целевой аппаратуры за счет внедрения дополнительного БСК, возрастание требований к производительности бортовой ЭВМ для обеспечения своевременности получения оценки облачности и выдачи команды на основной БСК, усложнение применения КА ДЗЗ в связи с необходимостью согласования работы двух БСК в нестационарных условиях. Кроме того, рассмотренный метод целесообразно использовать при ведении площадной съемки, так как он позволяет получить первое приближение оценки поля облачности над заданным районом. Реальная облачность может располагаться в диапазоне высот от сотен метров до десятка километров и иметь многоярусную структуру, что при перспективной съемке впередсмотрящим БСК приводит к некоторому смещению изображения облачности относительно изображения подстилающей поверхности. Величина такого смещения при объектовой съемке может быть сопоставима с размерами исследуемого объекта, и оценка облачности над объектом будет неадекватной.

В исследовании предлагается модифицированный метод ведения ДЗЗ с бортовым оцениванием поля облачности над наблюдаемой территорией, реализация которого основывается на представленной описательной модели оптико-электронного БСК с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности. Основной особенностью нового БСК является возможность регистрации данных о фактической облачности, существующей во время и в условиях объектовой съемки. Разработка модели нового БСК и метода ведения ДЗЗ основана на результатах анализа особенностей конструкций целевой аппаратуры современных и перспективных космических средств ДЗЗ, а также на знаниях о содержании цикла обработки зарегистрированных данных.

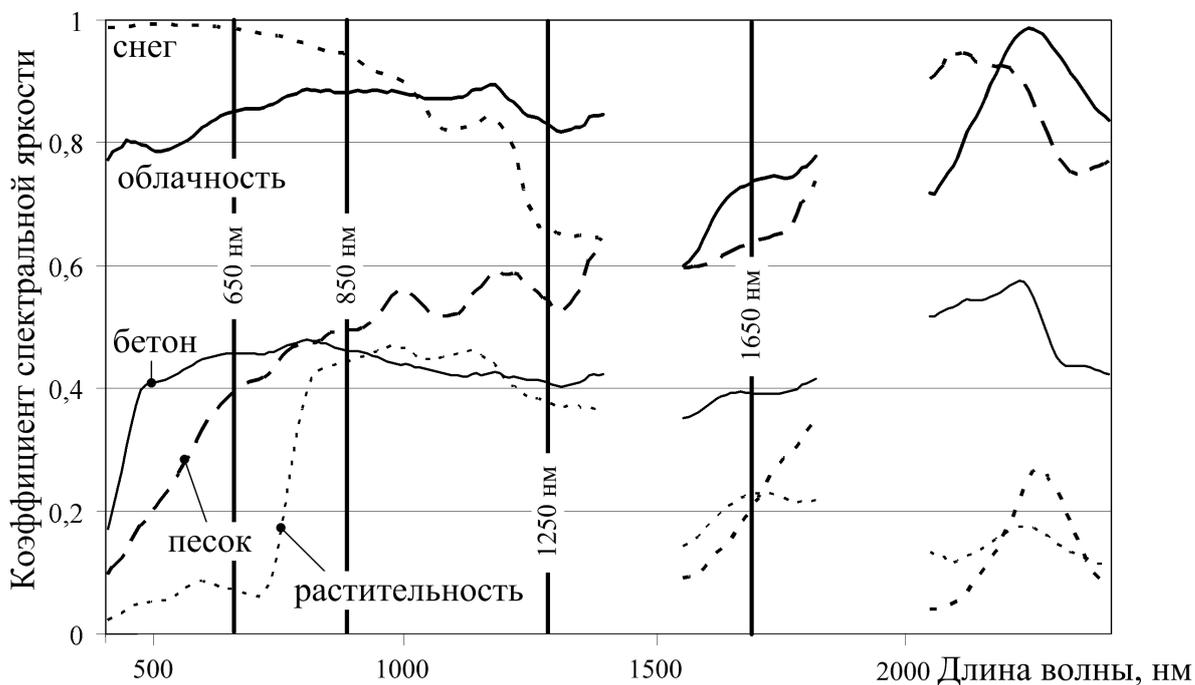
### **Модель оптико-электронного БСК с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности**

Среди целевой аппаратуры современных и перспективных КА ДЗЗ, обеспечивающих съемку с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением, отсутствуют БСК, на основе которых можно непосредственно решить задачу бортового оценивания фактической облачности при объектовой съемке. Это объясняется рядом факторов:

- состав спектральных каналов не позволяет регистрировать необходимый набор данных для отделения изображений облачности от изображений разнообразной подстилающей поверхности;

- данные от разных спектральных каналов в сканирующих системах с размещенными в фокальной плоскости линейными приемниками являются пространственно несогласованными, что затрудняет бортовую обработку регистрируемых данных.

Влияние указанных факторов компенсируется в предлагаемом БСК с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности. Основной особенностью является совмещение аппаратуры регистрации целевых данных высокого разрешения и регистрации данных о поле облачности в одном устройстве. Достаточный набор спектральных данных для определения наличия облачности в элементе разрешения облачности можно получить регистрацией изображений в диапазоне от 0,4 до 2,5 мкм (Griffin et al., 2005). Известно, что наиболее сложным фоном для определения облачности в отдельных спектральных поддиапазонах является ряд объектов с высокой отражательной способностью: снеговой покров, обнажения некоторых песчаных грунтов. Примеры зависимостей коэффициентов спектральной яркости от длины волны для облачности и ряда объектов приведены на *рис. 1*. Выделение информативных признаков для надежного разделения облачности и подстилающей поверхности возможно на основе четырех спектральных каналов с центрами 0,65; 0,85; 1,25 и 1,65 мкм. При этом предполагается, что спектральное разрешение не должно превышать типовых для многоспектральной съемки значений в 40–50 нм, а пространственное разрешение должно обеспечивать обнаружение облачности, что достижимо при средних значениях параметра 30–100 м. Предлагаемая принципиальная схема БСК с новым блоком регистрации данных об облачности представлена на *рис. 2*. Оптическая подсистема основана на часто используемом для современных космических объективов трехзеркальном анастигмате, выполненном по схеме Корша (Lampton, Sholl, 2009).



*Рис. 1.* Спектральные характеристики облачности и объектов подстилающей поверхности

Общий объектив содержит три асферических зеркала РМ, SM, ТМ (*рис. 2*), формирующих резкое изображение подстилающей поверхности в фокальной плоскости FP 0. При этом в плоскости FP 0 размещены линейные приемники для регистрации целевых данных в спектральных каналах, требуемых для решения практических задач.

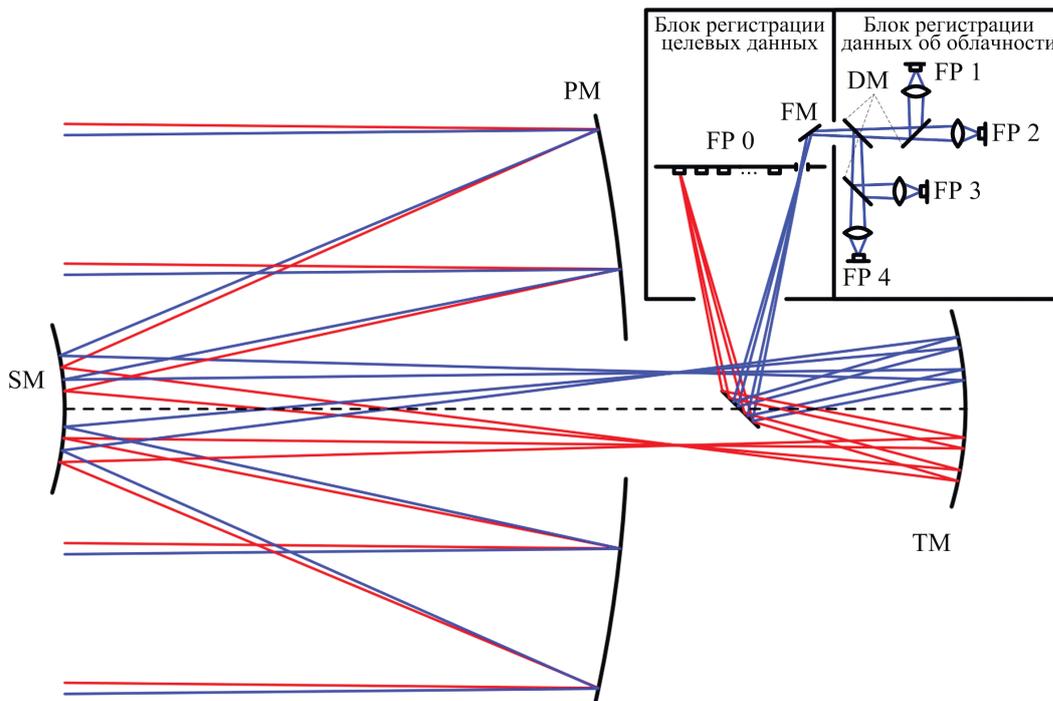


Рис. 2. Принципиальная схема подсистемы регистрации целевых данных и данных об облачности в составе модифицированного БСК

Кроме того, в фокальной плоскости расположена щель, аналогичная по ориентации и длине приемникам целевых данных и позволяющая пространственно выделить из общего потока узкий участок. Указанная щель является входом блока регистрации данных об облачности и отчасти обеспечивает согласованность полос захвата при регистрации данных в разных блоках.

Для улучшения компактности схемы используется плоское зеркало FM, направляющее поток излучения в спектроделительную систему (рис. 2). Так как число спектральных каналов невелико, то использование сложной спектроделительной системы на основе призмы или дифракционной решетки представляется нецелесообразным. В исследовании предлагается спектральное и пространственное разделение потока, применяемое ранее в спектральной аппаратуре HRVIR КА «Spot», МСУ-Э КА «Ресурс-О» и «Метеор-3М» и основанное на использовании оптических элементов – дихроичных зеркал DM (Тарасов, Якушенков, 2007). Такие зеркала представляют собой прозрачные плоскопараллельные пластины с многослойными интерферирующими покрытиями, состав которых определяет спектральные диапазоны отраженного и пропущенного излучения. Дихроичные зеркала обладают малым поглощением и хорошими спектральными характеристиками, что определяет возможность изготовления относительно легких, компактных и стабильных блоков регистрации пространственно согласованных данных требуемого спектрального состава. Один из вариантов построения блока регистрации данных о поле облачности в четырех спектральных каналах с использованием дихроичных зеркал приведен на рис. 2. Таким образом обеспечивается пространственная согласованность регистрируемых спектральных данных в условиях орбитального полета за счет применения схемы про-

странственного и спектрального разделения единого потока излучения. При этом приемники излучения в требуемых спектральных каналах блока регистрации данных об облачности для спектральных диапазонов 0,4–1,1 и 1–2,5 мкм могут быть изготовлены соответственно на основе хорошо отработанных материалов Si, Ge или с применением относительно новых соединений GaAs, GaP, GaSb, AlAs (Тришенков, 1992).

Целью бортовой обработки массива данных об облачности является получение общей оценки покрытия облачностью объекта съемки  $ECA_{no}$ , где  $no$  – индекс снимаемого объекта. Для определения оценки  $ECA_{no}$  требуется массив бинарных значений  $DCA_{IK,no}$ , содержащий оценки наличия облачности в каждом элементе разрешения. Число элементов в массиве равно  $IK$ . Элементы со значениями “1” соответствуют участкам, покрытым облачностью, а элементы со значениями “0” – участкам, свободным от облачности. Тогда для оценивания показателя  $ECA_{no}$  можно использовать отношение суммы всех элементов массива  $\sum dca_{ik,no}$  к общему числу элементов массива  $IK$ . Разработка модели оценки облачности над объектом космической съемки является отдельной задачей и в данном исследовании рассматривается в первом приближении. Вариант обобщенной схемы блока обработки данных об облачности в составе БСК представлен на рис. 3.

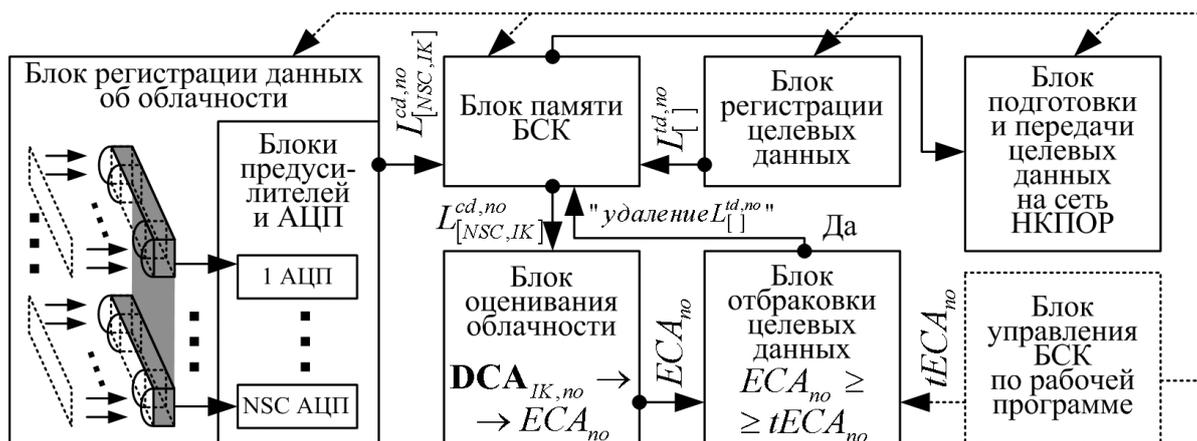


Рис. 3. Вариант бортовой обработки данных об облачности при съемке объекта

Исходные параметры для регистрации данных об облачности, обработки спектральных данных и обобщенных оценок в ходе отдельного сеанса съемки каждого объекта задаются согласно заложенной на период съемки рабочей программе (РП) блоком управления БСК, также отвечающим за регистрацию целевых данных и синхронизацию работы отдельных блоков бортовой обработки. В результате включения блока регистрации данных об облачности над объектом  $no$  формируется массив квантованных значений спектральной яркости  $L_{[NSC,IK]}^{cd,no} = \|L_{nsk,ik}^{cd,no}\|_{NSC,IK}$ ,  $nsk = 1(1)NSC, ik = 1(1)IK$ , где  $NSC$  – число спектральных каналов,  $IK$  – число оцифрованных значений яркости  $L_{nsk,ik}^{cd,no}$  в каждом спектральном канале, определяемое длительностью включения, числом элементов в строке приемника и строчной частотой считывания. Полученный массив  $L_{[NSC,IK]}^{cd,no}$  подвергается

обработке с заданными для района объекта  $no$  параметрами оценивания облачности для получения общего массива бинарных значений  $ДСА_{IK,no}$ , используемого для вычисления бортовой оценки покрытия облачностью объекта съемки  $ECA_{no}$ . Эта оценка используется для отбраковки данных целевой съемки  $L_{[ ]}^{td,no}$  объекта  $no$  по установленному критерию отбраковки и показателю  $tECA_{no}$ . При выполнении критерия отбраковки  $ECA_{no} \geq tECA_{no}$  формируется команда на удаление соответствующего массива  $L_{[ ]}^{td,no}$  в блоке памяти БСК. При невыполнении критерия манипуляции с данными не производятся. Таким образом, на концептуальном уровне представлен облик аппаратуры, обеспечивающей объективную космическую съемку с возможностями оценивания фактического покрытия объекта облачностью и отбраковки непригодных целевых данных.

### Метод ведения ДЗЗ с бортовым оцениванием облачности

Новые знания и возможности, полученные при разработке и исследовании модели БСК с блоками регистрации и обработки данных об облачности, позволили разработать новый метод ведения ДЗЗ при объектовой съемке. Предлагается вариант решения задачи получения целевых данных с борта КА ДЗЗ требуемого качества. Рассматривается система ДЗЗ, работающая в режиме отложенной передачи зарегистрированных согласно РП целевых данных, что характерно для высокопроизводительных средств высокого и среднего пространственного разрешения. Получаемые системой ДЗЗ целевые данные должны содержать изображения объектов  $no, no = 1(1)NO$  с покрытием облачностью, не превышающим заданные величины  $tECA_{no}$ .

При текущем планировании съемки рассматривается расширенный перечень объектов, число которых  $NO$  в первом приближении на 20% больше, чем при стандартном планировании без средств бортовой отбраковки. Для каждого объекта  $no$  кроме стандартных условий съемки (углы разворота платформы, длительность включения, состав спектральных каналов, экспозиция) оцениваются новые параметры регистрации и обработки данных об облачности, показатель отбраковки  $tECA_{no}$ . В практике коммерческого ДЗЗ значение  $tECA_{no}$ , соответствующее качественным данным по показателю покрытия облачностью, задается в диапазоне 0,15–0,2. Кроме того, для согласованного использования блоков регистрации целевых данных и данных об облачности по прогнозируемым условиям наблюдения объектов  $no$  и характеристикам БСК оценивается задержка включения одного блока относительно другого. Стандартные и новые параметры съемки объектов на сутки в составе РП закладываются на борт КА ДЗЗ. Также для сети НКПОР разрабатывается и распространяется план передачи целевых данных на пункты приема.

Согласно РП для БСК в течение суток выполняется последовательная съемка объектов  $no$  с синхронным использованием блоков регистрации целевых данных  $L_{[ ]}^{td,no}$  и данных об облачности  $L_{[NSC,IK]}^{cd,no}$ . Полученные массивы данных сохраняются в блоке памяти БСК. Обработка массивов  $L_{[NSC,IK]}^{cd,no}$  в блоке оценивания наличия облачности в элементах разрешения

и вычисления общей оценки  $ECA_{no}$  выполняется согласно РП в промежутки времени, когда на борту КА имеются требуемые вычислительные и энергетические ресурсы. По мере завершения обработки отдельного массива  $L_{[NSC,IK]}^{cd,no}$  и получения оценки  $ECA_{no}$  этот массив удаляется из памяти БСК. В блоке отбраковки целевых данных оценка  $ECA_{no}$  сравнивается с показателем отбраковки  $tECA_{no}$  из РП и в случае его превышения генерируется команда на удаление массива целевых данных  $L_{[ ]}^{td,no}$  из блока памяти БСК.

Согласно РП с борта КА ДЗЗ выполняется передача на сеть НКПОР данных целевой съемки  $L_{[ ]}^{td,no}$ , которые прошли селекцию на основе отбраковки по показателю  $tECA_{no}$  и бортовое кодирование для сокращения информационной избыточности и повышения помехоустойчивости. За счет планирования съемки по расширенному перечню объектов *NO* ресурс передачи целевых данных с борта КА на пункт приема должен использоваться в полной мере. При этом соотношение долей качественных и некачественных данных объектовой съемки многократно увеличивается в пользу качественных данных. Если бы планирование было выполнено по номинальному числу объектов, как при стандартной съемке без бортовой отбраковки, то имел бы место отрицательный эффект недоиспользования имеющегося ресурса передачи данных на сеть НКПОР.

Однако при применении разработанного метода существует вероятность получения за период применения КА ДЗЗ такого числа массивов целевых данных  $L_{[ ]}^{td,no}$ , что передача их полностью в запланированные сеансы будет невозможной. В этом исключительном случае проблема может разрешаться за счет отсрочки передачи данных в последующие периоды применения, либо за счет организации дополнительных сеансов передачи на пункты НКПОР.

Таким образом, за счет использования разработанного метода ведения ДЗЗ с бортовым оцениванием облачности на ранних этапах обработки выполняется отбраковка целевых данных, характеризующихся низким качеством по оценке покрытия облачностью. Положительный практический эффект состоит в более рациональном использовании ресурсов системы ДЗЗ за счет увеличения доли пригодных для решения задач данных в общем потоке с борта КА.

## Заключение

Основными результатами выполненного исследования является описательная модель бортового оптико-электронного специального комплекса с блоками регистрации и обработки данных о поле облачности, на основе которой разработан новый метод ведения ДЗЗ с бортовым оцениванием облачности. Показано, что существующий научно-технический задел позволяет осуществить техническую реализацию предложенных решений. Применение разработанного метода позволит выполнять отбраковку непригодных для практического использования данных на борту носителя, повышая эффективность применения системы ДЗЗ.

## Литература

1. *Тарасов В.В., Якушенко Ю.Г. Двух- и многодиапазонные оптико-электронные системы с матричными приемниками излучения.* М.: Университетская книга; Логос, 2007. 192 с.
2. *Трищенко М.А. Фотоприемные устройства и ПЗС. Обнаружение слабых оптических сигналов.* М.: Радио и связь, 1992. 400 с.
3. *Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M. and Upham C.A. Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis // Lincoln laboratory journal.* 2005. Vol. 15. No. 2. P. 271–298.
4. *Lampton M., Sholl M. Comparison of On-Axis Three-Mirror-Anastigmat Telescopes.* Space Sciences Laboratory, University of California at Berkeley. 2009. 8 p.

## Method of remote sensing data rejection aboard a space vehicle

A.N. Grigoriev

*Military-Space Academy  
Saint-Petersburg, 197082, Russia  
E-mail: Grig-AN@ya.ru*

The article discusses the results of research of possibility of space imagery data rejection directly on board a spacecraft. The subject of research is registration and on-board processing of multispectral data on cloud field. The purpose of this paper is to improve the efficiency of remote sensing due to rational use of its resources. The author has developed a new conceptual model of onboard opto-electronic special complex with units of recording and processing of data on cloud field. The onboard complex also provides acquisition of target data with high and ultra high spatial resolution. The unit of cloud field data recording produces spatially coordinated spectral data through the use of beamsplitters based on dichroic mirrors. The processing unit is represented schematically and realizes onboard evaluation of cloudiness over a given area. The article gives a brief description of processing of spectral data on cloud field. The author proposes a method for conducting remote sensing with onboard data rejection stage based on the degree of cloud coverage of an object. The peculiarity of the method is the need for additional actions on determination of processing parameters of cloud field data at the stage of survey planning. The method ensures imaging of a larger number of objects and transmission of higher quality data to ground remote sensing data receiving stations.

**Keywords:** board special complex, spectral channel, detection and processing blocks, dichroic mirror, spatial matching

## References

1. *Tarasov V.V., Yakushenkov Yu.G. Dvukh- i mnogodiapazonnye optiko-elektronnye sistemy s matrichnymi priemnikami izlucheniya (Two- and multiband optical-electronic systems with matrix radiation detectors).* Moscow: Universitetskaya kniga; Logos, 2007, 192 p.
2. *Trishenkov M.A. Fotopriemnye ustroystva i PZS. Obnaruzhenie slabykh opticheskikh signalov (Photodetectors and CCD. Detection of weak optical signals),* Moscow: Radio i svyaz', 1992, 400 p.
3. *Griffin M.K., Hsu S.M., Burke H.K., Orloff S.M., Upham C.A., Examples of EO-1 Hyperion Data Analysis, Lincoln laboratory journal, 2005, Vol. 15, No. 2, pp. 271–298.*
4. *Lampton M., Sholl M. Comparison of On-Axis Three-Mirror-Anastigmat Telescopes,* Space Sciences Laboratory, University of California at Berkeley, 2009, 8 p.