

## Технология потоковой обработки данных ДЗЗ высокого разрешения

В. В. Еремеев<sup>1</sup>, И. И. Зинина<sup>2</sup>, А. Е. Кузнецов<sup>1</sup>, Г. Н. Мятов<sup>2</sup>,  
В. И. Пошехонов<sup>1</sup>, А. В. Филатов<sup>2</sup>, А. А. Юдаков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Рязанский государственный радиотехнический университет им. В. Ф. Уткина  
Рязань, 390005, Россия  
E-mail: foton@rsreu.ru*

<sup>2</sup> *Ракетно-космический центр «Прогресс», Самара, 443009, Россия*

Рассматривается технология автоматической обработки данных от спутников серии «Ресурс-П», «Ресурс-ПМ» и «Аист-2Т», обеспечивающая получение выходных информационных продуктов с высокими измерительными свойствами. Один из ключевых элементов этой технологии заключается в мониторинге работы измерительных систем спутника и своевременном проведении геометрических и радиометрических калибровок целевой аппаратуры. Показано, что принятие решения о необходимости уточнения конструктивных углов камеры осуществляется на основе рассогласования угловых координат спутника, измеряемых астродатчиками. Приводится пример, подтверждающий работоспособность предложенного подхода. Рассматриваются два алгоритма проведения относительной радиометрической калибровки камеры, основанные на съёмке однородных по яркости участков земной поверхности. Отмечается, что затраты на проведение калибровки будут сокращены, если съёмку опорных участков выполнять в режиме «скольжения». Рассматривается схема взаимодействия комплексов обработки, калибровки и планирования съёмки, обеспечивающая своевременное проведение калибровочных мероприятий и использование результатов при формировании выходных информационных продуктов. Для исключения зависимости от зарубежных картографических сервисов в случае нештатной работы измерительных систем спутника технология потоковой обработки предусматривает формирование опорной информации, представляемой в виде базы данных абрисов. Рассматриваются особенности технологии автоматической обработки данных от спутника «Ресурс-П» № 1, измерительная информация от которого характеризуется низкой точностью. Технология предполагает уточнение грубых ошибок геопривязки снимков, достигающих 10 км, по снимкам от КА Landsat-8, а затем высокоточное геокодирование изображений с СКО 10 м по абрисам.

**Ключевые слова:** автоматическая обработка, геометрическая и радиометрическая калибровки, астродатчики, геопривязка, спутник «Ресурс-П» № 1

Одобрена к печати: 09.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-11-18

### Введение

Современные системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) высокого пространственного разрешения предназначены для получения измерительной информации двух типов: радиометрической (данных об энергетических характеристиках объектов наблюдения, в частности подстилающей поверхности) и координатной. Поэтому в технических заданиях на разработку космических систем ДЗЗ предъявляются высокие требования как к геометрическому, так и радиометрическому качеству снятых изображений. Например, требование к точности определения по снимкам координат объектов без использования опорных данных составляет порядка 5–6 м, что позволяет успешно картографировать малодоступные территории в масштабе 1:25 000 и крупнее. При этом радиометрическое качество материалов съёмки должно быть таким, чтобы визуально на снимках не были заметны структурные искажения, обусловленные работой фоточувствительных элементов камеры.

Достижение высоких измерительных свойств видеоданных, особенно в условиях потоковой обработки материалов съёмки, требует принятия целого комплекса специальных мер, связанных с мониторингом работы навигационных систем спутника и камеры, оперативным

проведением калибровочных работ. Кроме того, важная роль отводится проектированию такой технологии потоковой обработки, которая позволила бы получать качественную выходную продукцию даже в условиях нештатной работы космического аппарата (КА).

В ряде работ, например (Алексанин и др., 2019), рассматриваются упрощённые подходы к обработке данных от многоматричного сканера «Геотон» спутника «Ресурс-П». В частности, предлагается совмещать изображения от отдельных ПЗС-матриц (прибор с зарядовой связью, *англ.* CCD — Charge-Coupled Device) и оптико-электронных преобразователей на основе идентифицированных координат одноимённых точек. Поскольку при этом не учитываются искажающие факторы, возникающие при съёмке, то получаемые изображения нельзя отнести к высокоточной картографической продукции, получаемой в режиме массовой потоковой обработки.

В публикациях других авторов (Ромашкин и др., 2019; Федоткин, Тохиян, 2018) излагаются очевидные решения по организации наземной обработки с использованием возможностей современной вычислительной техники. Собственно вопросы обеспечения высоких измерительных свойств информации предлагается решать за счёт использования опорных данных, получаемых от зарубежного сервиса GoogleMaps.

Понятно, что предлагаемые подходы не соответствуют концепции создания высокоточных систем ДЗЗ и могут привести к ошибочным управленческим решениям при проектировании наземных средств потоковой обработки спутниковой информации. Поэтому цель настоящей статьи — ознакомление читателей с технологией наземной обработки информации от существующих и перспективных КА типа «Ресурс-П», «Ресурс-ПМ», «Аист-2Т» и др., позволяющей в автоматическом режиме получать высококачественные выходные продукты в течение всего срока функционирования спутника.

### Общая технологическая схема обработки данных ДЗЗ

Одна из особенностей всех систем ДЗЗ заключается в том, что после выведения спутника на орбиту данные предполётной геометрической и радиометрической калибровки измерительной и целевой аппаратуры изменяются. Кроме того, в ходе штатной эксплуатации также изменяются чувствительность ПЗС-элементов сканера и конструктивные углы астродатчиков, что приводит к «полосатости» снимков и снижению точности геопривязки материалов съёмки. Всё это требует своевременного проведения геометрической и радиометрической калибровки целевой аппаратуры и учёта получаемых данных при формировании выходных информационно-продуктов стандартных уровней обработки. Функциональная схема выполнения основных технологических операций при потоковой обработке данных ДЗЗ в условиях штатной работы измерительных систем спутника представлена на *рис. 1* (см. с. 13).

На схеме показаны:

- Комплекс приёма и восстановления информации, поступающей по радиоканалу. Результатом его работы является декодированная видео- (ВИ) и измерительная (ИИ) информация. В составе ИИ содержатся координаты пространственного положения центра масс КА, кватернионы ориентации от каждого астродатчика и угловые скорости. Кроме того, в состав ИИ могут входить координаты звёзд, используемые при калибровке элементов внутреннего ориентирования астродатчиков.
- Блок обработки ИИ, обеспечивающий решение следующих задач:
  - фильтрация и хранение измерительной информации по каждому витку полёта КА;
  - уточнение элементов внутреннего ориентирования астродатчиков;
  - формирование исходных данных для геопривязки (ИДГП);
  - синтез высокоточных линейных элементов внешнего ориентирования на основе послесезансных радионавигационных измерений.
- Комплекс полётной геометрической и радиометрической калибровки, предназначенный:
  - для уточнения элементов внутреннего ориентирования и конструктивных углов камеры на основе материалов съёмки опорных полигонов (процедура геометрической

- калибровки на этапе лётных испытаний и штатной эксплуатации КА рассмотрена в работе (Ахметов и др., 2017));
- определения поправочных коэффициентов яркостной коррекции для каждого фоточувствительного элемента камеры, оцениваемых по результатам съёмки однородных по яркости сюжетов земной поверхности. Яркостные искажения, проявляющиеся в виде вертикальной «полосатости» снимка, устраняются с использованием данных относительной радиометрической калибровки (ДРК). Пример исходного и скорректированного изображения представлен на *рис. 2*.

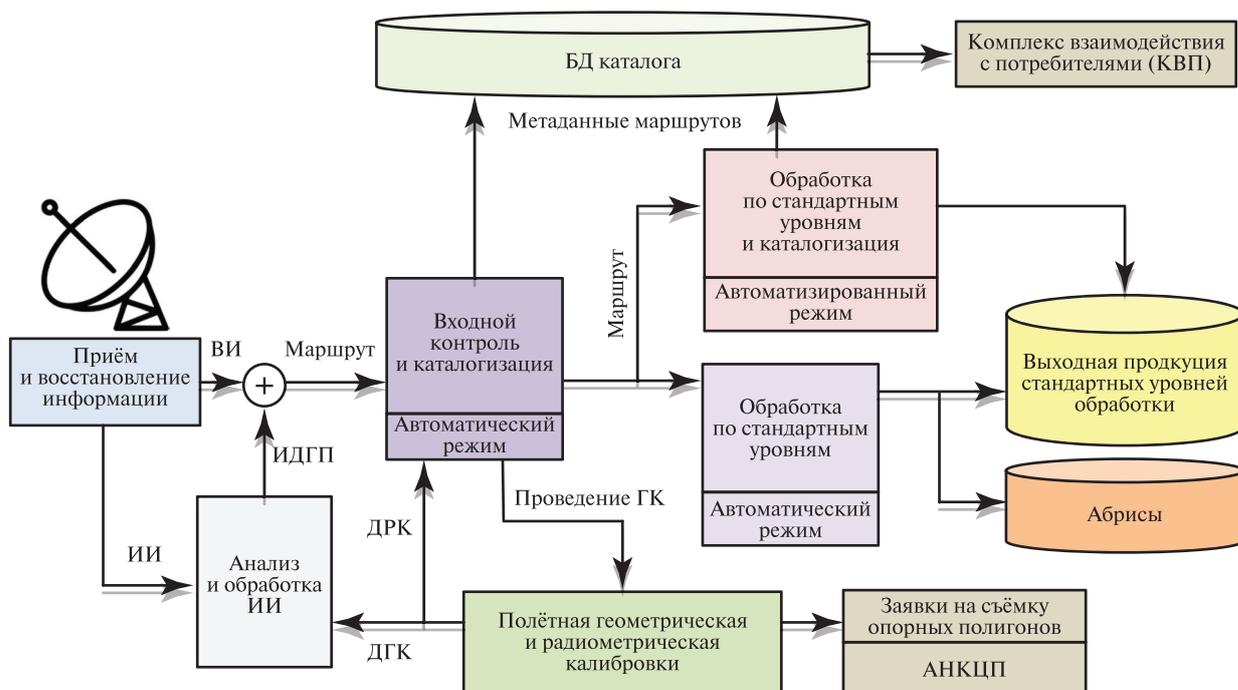


Рис. 1. Функциональная схема выполнения основных технологических операций при обработке данных ДЗЗ

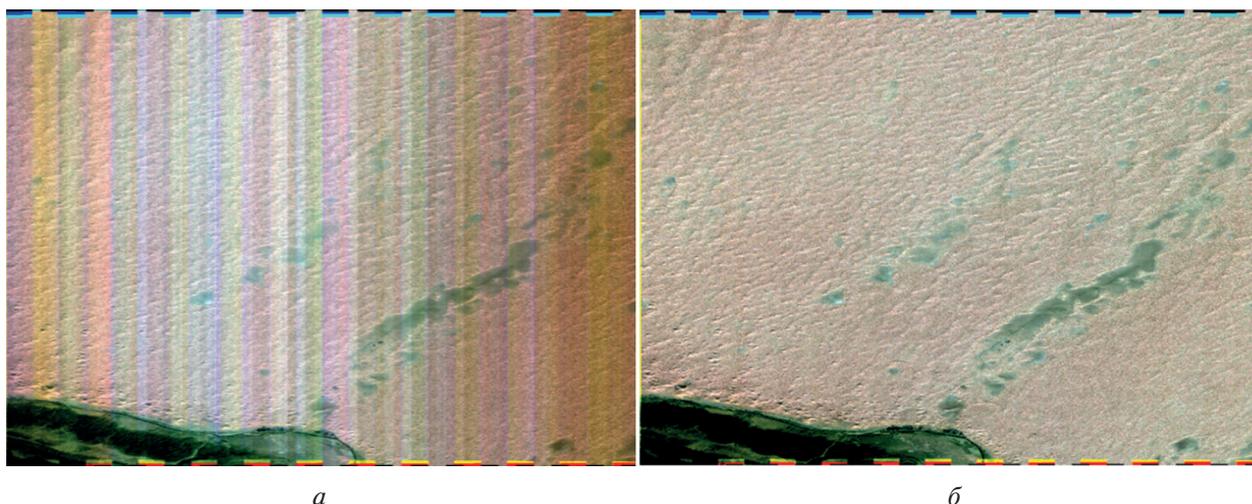
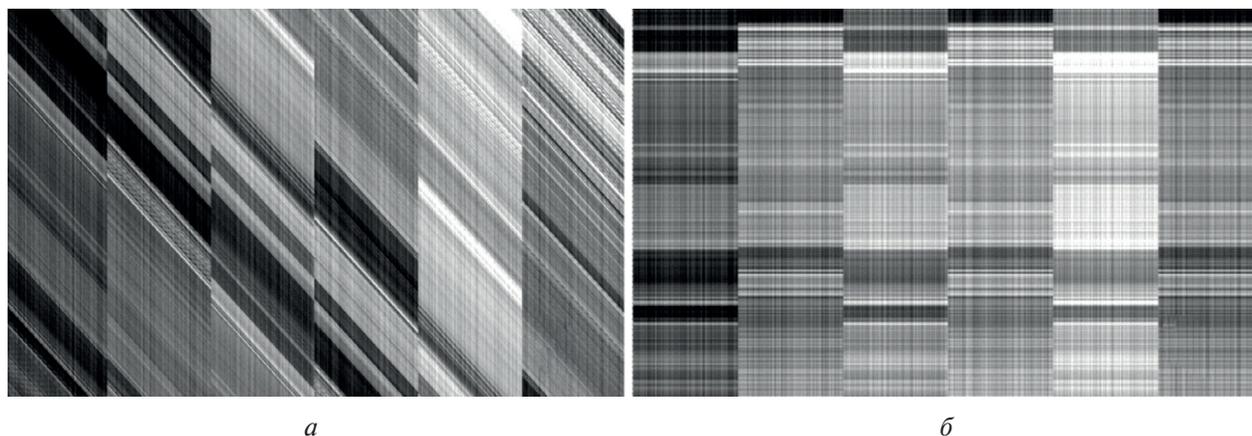


Рис. 2. Исходное изображение (а) и радиометрически откорректированное (б)

Для проведения калибровочных мероприятий формируются заявки на съёмку опорных полигонов, которые транслируются в автоматизированный наземный комплекс целевого планирования (АНКЦП). В настоящее время хорошо отработана схема относительной радио-

метрической калибровки по однородным сюжетам, снятым с различными коэффициентами усиления (числом строк накопления заряда). Для сокращения временных затрат на проведение калибровочных мероприятий разработчиками КА и специалистами по созданию средств наземной обработки информации отработывается алгоритм получения калибровочных поправок по материалам съёмки, снятым в режиме «скольжения», т. е. при развороте КА вдоль направления полёта. Пример такого изображения, полученного аппаратурой «Геотон», представлен на *рис. 3*.



*Рис. 3.* Однородное изображение, полученное в режиме «скольжения» (*а*), и оно же после преобразования для последующей оценки коэффициентов коррекции (*б*)

В соответствии с подходом, изложенным в работе (Кузнецов, 2016), блоки входного контроля и каталогизации, обработки по стандартным уровням в автоматическом режиме реализуют поточную технологию каталогизации и формирования выходной продукции. Первым шагом этого технологического процесса является входной контроль измерительной информации в части полноты, достаточности и точности измерения угловой ориентации спутника. Эта операция выполняется путём оценки взаимных рассогласований углов ориентации, выдаваемых астродатчиками и хранящихся в базе данных (БД) комплекса обработки ИИ. В случае допустимого превышения взаимных рассогласований принимается решение на проведение геометрической калибровки. Сказанное поясняет *рис. 4* (см. с. 15), на котором представлен график взаимных рассогласований четырёх астродатчиков по двум высокоточным осям до проведения калибровки (см. *рис. 4а*) и после неё (см. *рис. 4б*). Из графиков следует, что после проведения калибровки среднее квадратическое отклонение (СКО) определения углового положения камеры уменьшилось в два раза.

В случае отсутствия сбоев и необходимости геометрической перекалибровки по маршруту рассчитываются метаданные и вивилуки, помещаемые в БД каталога. Информация каталога используется комплексом взаимодействия с потребителями (КВП) и комплексом планирования съёмки. Этот же маршрут подвергается дальнейшей автоматической обработке для получения выходного продукта с гарантированной точностью «сшивки», геопривязки и радиометрического качества. По таким маршрутам формируются массивы абрисов (фрагментов изображений с известными геодезическими координатами), которые используются для уточнения геопривязки изображений в случае недостаточной точности измерительной информации. Использование абрисов позволяет организовать получение высокоточной выходной продукции при нештатной работе КА и исключить зависимость от зарубежного сервиса GoogleMaps.

Маршруты, по каким-либо причинам не прошедшие входной контроль, передаются для автоматизированной обработки, предназначенной для выяснения и устранения причин возникновения нештатных ситуаций.

Для обеспечения радиометрического качества изображений используются две схемы.

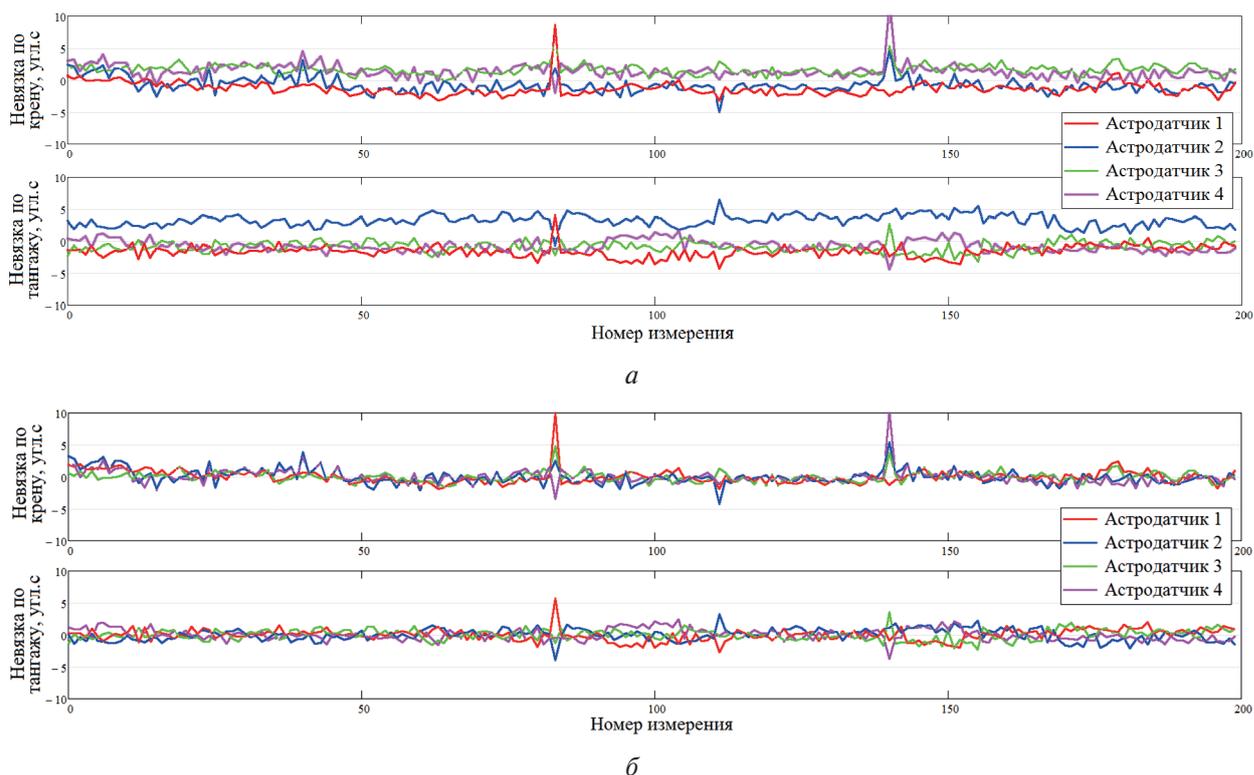


Рис. 4. График взаимных рассогласований осей астродатчиков по углам тангажа и крена до проведения калибровки (а) и после неё (б). До коррекции СКО невязок по высокоточным осям составили 1,686" и 2,097", после коррекции — 1,067" и 0,891"

Первая схема предполагает регулярное проведение калибровочных мероприятий и используется в настоящее время в эксплуатирующей организации. Вторая схема основана на регулярном мониторинге радиометрического качества видеоданных и инициировании процесса перекалибровки при превышении остаточных искажений допусковой величины. В соответствии с этой схемой планируется, например, еженедельная съёмка контрольных участков, их обработка по имеющимся коэффициентам коррекции и оценка остаточных искажений.

Таким образом, главными условиями обеспечения высоких точностных характеристик выходных информационных продуктов, формируемых в автоматическом режиме, становятся:

- постоянный контроль качества измерительной информации и видеоданных маршрутов съёмки;
- оперативное взаимодействие комплексов обработки, калибровки и планирования съёмки.

### Практическая реализация технологии потоковой обработки в условиях нештатной работы измерительных систем КА

Рассмотрим далее особенности организации потоковой обработки данных от спутника «Ресурс-П» № 1, измерительная информация от которого не позволяет с высокой точностью определять его угловое положение. В результате этого ошибки геопривязки могут достигать нескольких километров. По этой причине не обеспечивается субпиксельная «сшивка» и совмещение спектрозональных изображений в автоматическом режиме по строгой модели съёмки. Для учёта этой особенности приняты следующие меры.

Во-первых, на этапе входного контроля анализируется не измерительная информация, а точность геопривязки обзорного изображения на основе специального созданного на

территорию Евразии опорного покрытия по снимкам КА Landsat-8. По результатам выполнения этого этапа автоматически корректируются параметры углового и пространственного положения спутника на момент съёмки маршрута, которые сохраняются в объединённом файле-паспорте маршрута съёмки (ОФПМ). Использование обзорного изображения маршрута съёмки позволяет достичь высокого быстродействия при идентификации опорных точек в условиях значительных координатных рассогласований. Применение созданного собственного опорного покрытия позволяет исключить зависимость от зарубежного сервиса и выполнить требование эксплуатирующей организации по безопасности данных.

Во-вторых, после выполнения входного контроля обеспечивается точность геопривязки с СКО порядка 20–30 м, что оказывается недостаточным для изображений высокого разрешения от аппаратуры «Геотон». Поэтому на этапе обработки информации по стандартным уровням выполняется уточнение геопривязки детального изображения по абрисам.

В-третьих, при низкоточной измерительной информации уточнение конструктивных углов камеры не имеет смысла. Поэтому решение о перекалибровке элементов её внутреннего ориентирования принимается в случае нарушения точности «сшивки» и совмещения спектрональных каналов (цветосинтеза).

Схема выполнения технологических операций, выполняемых с учётом принятых мер, показана на рис. 5.

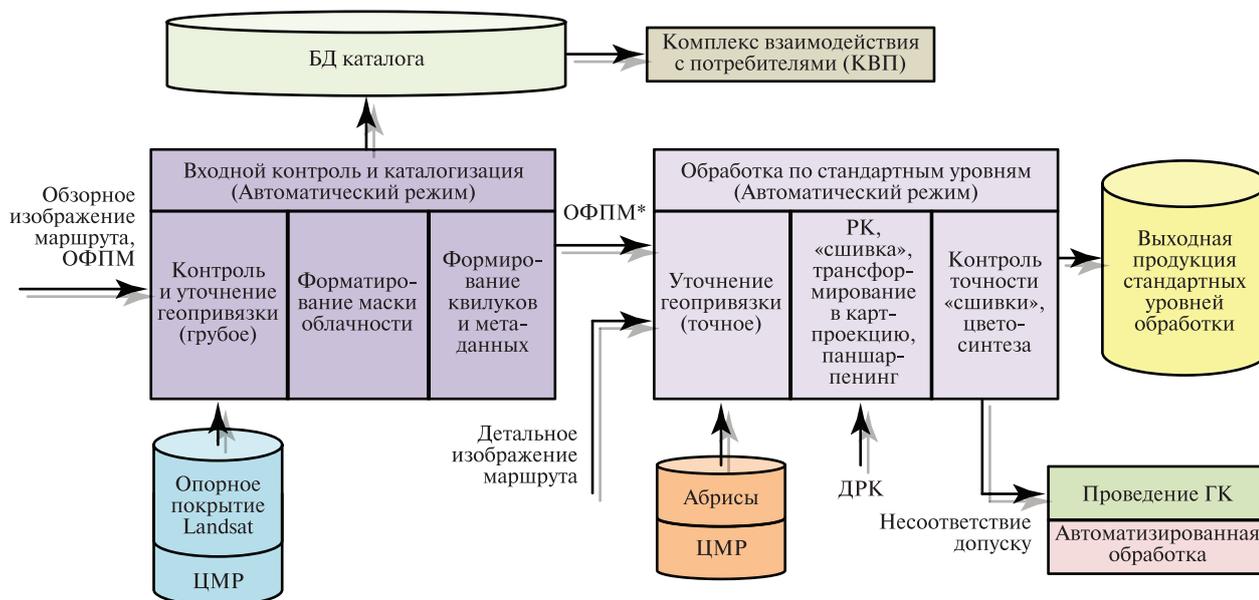


Рис. 5. Схема технологических операций при обработке данных от КА «Ресурс-П» № 1

Использование разработанной технологии позволяет в автоматическом режиме получать выходные продукты от КА «Ресурс-П» № 1 с точностью «сшивки» и совмещения не более 0,5 пикселя и геокодированные с точностью абрисов, т. е. с СКО 10 м и лучше.

## Заключение

Как следует из материалов статьи, обеспечение высоких измерительных свойств спутниковых изображений земной поверхности в ходе их автоматической потоковой обработки достигается целым комплексом мер, связанных с тесным взаимодействием всех компонентов наземного комплекса приёма, обработки и распространения информации. Важный элемент рассмотренной технологии заключается в том, что она позволяет формировать опорные данные, с помощью которых в случае нештатной работы измерительных систем спутника можно

получать выходные информационные продукты с высокими измерительными свойствами. Предложенные в статье новые технические решения, связанные с процессами калибровки, апробированы и предполагаются к внедрению при вводе в эксплуатацию КА типа «Ресурс-П» № 4, 5, «Ресурс-ПМ» и «Аист-2Т».

Аналогичные подходы по обеспечению качества информации используются и в зарубежных системах ДЗЗ типа Pleiades. Поэтому рассмотренная в статье технология может быть взята за основу при разработке высокопроизводительных систем потоковой обработки информации с использованием мощных серверных ресурсов.

## Литература

1. *Алексанин А. И., Морозов М. А., Фомин Е. В.* Проблемы совмещения изображений с пиксельной точностью // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 1. С. 9–16.
2. *Ахметов Р. Н., Еремеев В. В., Кузнецов А. Е., Мятлов Г. Н., Пошехонов В. И., Стратилатов Н. Р.* Высокоточная геодезическая привязка изображений земной поверхности от КА «Ресурс-П» // Исслед. Земли из космоса. 2017. № 1. С. 44–53.
3. *Кузнецов А. Е.* Конвейерные технологии потоковой обработки данных от высоко детальных систем ДЗЗ // 4-я Международная научно-техн. конф. «Актуальные проблемы создания космических систем дистанционного зондирования Земли»: сб. тез. М., 2016. С. 148–150.
4. *Ромашкин В. В., Лошкарев П. А., Федоткин Д. И., Тохиян О. О., Арефьева Т. А., Мусиенко В. А.* ЕТРИС ДЗЗ — современные решения в развитии отечественной наземной космической инфраструктуры дистанционного зондирования Земли из космоса // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 220–227.
5. *Федоткин Д. И., Тохиян О. О.* Перспективные подходы к построению комплексов обработки данных ДЗЗ // ДЗЗ в России. 2018. № 1. С. 34–43.

## Stream processing technology of high-resolution remote sensing data

V. V. Eremeev<sup>1</sup>, I. I. Zinina<sup>2</sup>, A. E. Kuznetsov<sup>1</sup>, G. N. Myatov<sup>2</sup>,  
V. I. Poshekhonov<sup>1</sup>, A. V. Filatov<sup>2</sup>, A. A. Yudakov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Ryazan State Radio Engineering University named after V. F. Utkin  
Ryazan 390005, Russia  
E-mail: foton@rsreu.ru*

<sup>2</sup> *Space Rocket Centre “Progress”, Samara 443009, Russia*

The technology of automatic processing of data from the Resurs-P, Resurs-PM and Aist-2T satellite series providing output information products with high measuring properties is considered. One of the key elements of this technology is monitoring the satellite's measuring systems and timely geometric and radiometric calibrations of the equipment. Decision on the need to adjust the camera mount angles is based on the mutual discrepancies of the star trackers measurements. An example is given that confirms the efficiency of the proposed approach. Two algorithms for the relative radiometric calibration of the camera are considered, based on image acquisition of the earth's surface areas that are uniform in brightness. It is noted that the cost of calibration is reduced if the image acquisition is carried out in the side-slit mode. The scheme of interaction of the processing, calibration and acquisition planning software is considered, which ensures timely calibration and the use of its results in the formation of output information products. To avoid dependence on foreign cartographic services, in case of abnormal operation of the satellite's measuring systems, the stream processing technology provides for the formation of a reference points database. The features of the automatic technology of processing of information from the Resurs-P No. 1 satellite, the measuring information of which is characterized by low accuracy, are considered. The technology involves correction of gross geolocation errors up

to 10 km using images from the Landsat-8 satellite, followed by high-precision image georeferencing with 10 m RMSE using reference points database.

**Keywords:** automatic processing, geometric and radiometric calibrations, star trackers, georeferencing, Resurs-P No. 1 satellite

Accepted: 09.11.2020

DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-1-11-18

## References

1. Aleksanin A. I., Morozov M. A., Fomin E. V., Problemy sovmeshcheniya izobrazhenii s piksel'noi tochnost'yu (The problems of image superimposition with one-pixel accuracy), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 1, pp. 9–16.
2. Akhmetov R. N., Eremeev V. V., Kuznetsov A. E., Myatov G. N., Poshekhonov V. I., Stratilatov N. R., Vysokotochnaya geodezicheskaya privyazka izobrazhenii zemnoi poverkhnosti ot KA "Resurs-P" (Organization of high-precision geolocation of Earth surface images from the spacecraft "Resurs-P"), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2017, No. 1, pp. 44–53.
3. Kuznetsov A. E., Konveernye tekhnologii potokovoi obrabotki dannykh ot vysoko detal'nykh sistem DZZ (Pipeline technologies for streaming data processing from high resolution remote sensing systems), *4-ya Mezhdunarodnaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya "Aktual'nye problemy sozdaniya kosmicheskikh sistem distantsionnogo zondirovaniya Zemli"* (4<sup>th</sup> Intern. Scientific and Technical Conf. "Actual problems of creating space systems for Earth remote sensing"), Book of abstr., Moscow, 2016, pp. 148–150.
4. Romashkin V. V., Loshkarev P. A., Fedotkin D. I., Tokhiyan O. O., Aref'eva T. A., Musienko V. A., ETRIS DZZ — sovremennye resheniya v razvitii otechestvennoi nazemnoi kosmicheskoi infrastruktury distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa (UGDIS ERS — modern solution in the development of domestic terrestrial space infrastructure of Earth remote sensing from space), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 220–227.
5. Fedotkin D. I., Tokhiyan O. O., Perspektivnye podkhody k postroeniyu kompleksov obrabotki dannykh DZZ (Promising approaches to building remote sensing data processing complexes), *DZZ v Rossii*, 2018, No. 1, pp. 34–43.