

ИНФОРМАЦИОННО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПОДДЕРЖКА ПОСЛЕСТАРТОВОЙ КАЛИБРОВКИ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ СЕНСОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ КОСМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ «СИЧ»

Я. И. Зельк

Доктор технических наук,
старший научный сотрудник
Институт космических исследований
Национальная академия наук Украины и
Государственного космического
агентства Украины
пр. Академика Глушкова, 40, корпус 4/1,
г. Киев, ГСП, Украина, 03680
E-mail: adapt09@gmail.com

Сформульовано та розв'язано на першому етапі задачі післястартового калібрування оптико-електронних засобів космічного моніторингу з використанням вперше створеного в Україні контрольно-калібрувального полігону (ККП). Створено презентаційний каталог тестових об'єктів, геоінформаційну базу даних об'єктів ККП, цифрову модель місцевості ККП. Визначено інфраструктуру ККП та проаналізовано прилади, якими повинні бути обладнані тестові ділянки полігону

Ключові слова: контрольно-калібрувальний полігон, післястартове калібрування, космічна система «Січ», космічний моніторинг

Сформулированы и решены на первом этапе задачи послестартовой калибровки оптико-электронных средств космического мониторинга с использованием впервые создаваемого в Украине контрольно-калибровочного полигона (ККП). Созданы презентационный каталог тестовых объектов, геоинформационная база данных объектов ККП, цифровая модель местности ККП. Определена инфраструктура ККП и проанализированы приборы, которыми должны быть оборудованы тестовые участки полигона

Ключевые слова: контрольно-калибровочный полигон, послестартовая калибровка, космическая система «Сич», космический мониторинг

1. Введение

В настоящее время в мире на современный рынок продукции космического наблюдения компаниями и операторами предоставляются не просто высококачественные космические снимки, а созданные калиброванные конечные информационные продукты (КИП) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), базирующиеся на данных высших уровней обработки по сравнению с сырыми данными космических снимков. КИП являются наборами данных, выраженными в абсолютных физических единицах, точно привязанные во времени и пространстве к наблюдаемым объектам, полученные с помощью калиброванных время от времени в полете средств космического наблюдения по данным космической съемки и синхронных с ней наземных измерений. Именно наличие такого рода калиброванных конечных информационных продуктов обеспечивает достоверную тематическую интерпретацию и сопоставимость данных, поступающих от разнородных источников: как от различных космических систем, так и от различных наземных систем дистанционного наблюдения. До настоящего времени в Украине послестартовая калибровка оптических средств космического наблюдения с использованием контрольно-калибровочных полигонов не осуществлялась. Поэтому Украина до сих пор не выходила на международный

рынок услуг дистанционного зондирования. Рассматриваемые в настоящей статье результаты направлены на решение в Украине проблемы послестартовой метрологической поддержки оптических средств космического наблюдения и реализацию их в последующих миссиях украинских космических систем.

2. Состояние проблемы послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения и предоставление базовых информационных продуктов космического мониторинга

Калибровка (в частности, радиометрическая, связанная переводом градаций яркости на выходе оптического сенсора в абсолютные физические единицы) оптических средств многоспектральной системы космического наблюдения в полете заключается в построении в каждом i -ом спектральном канале градуировочной зависимости между «сырыми значениями» выходной величины бортового оптического сенсора в цифровых отсчетах DN_i ($[0, 255]$ для космической системы (КС) «Сич») и значениями его входной величины L_i (на апертуре сенсора) - спектральной плотности энергетической яркости в физических единицах $[вт/м^2 \text{ ср мкм}]$ (ср – стерадиан – единица измерения телесного угла) с учетом коэффициента прозрачности

атмосферы [1 – 13]. Такая градуировочная характеристика между выходной DN_i и входной величинами L_i сенсора восстанавливается преимущественно по данным космических снимков и синхронных с ними наземных измерений в виде линейной зависимости с оцениваемыми калибровочными коэффициентами – усилением G_i и смещением B_i :

$$L_i = G_i DN_i + B_i .$$

Конечная цель калибровки заключается в приведении значений цифровых отсчетов DN_i в указанные абсолютные физические единицы спектральной плотности энергетической яркости L_i .

Необходимость осуществления в полете указанной калибровки, в частности радиометрической, состоит в приведении результатов съемки определенного тестового участка различными оптическими сенсорами различных космических систем (или одним и тем же сенсором в разные моменты времени) к единой шкале измерений в абсолютных физических единицах объективной физической величины – спектральной плотности энергетической яркости. Помимо основной функции бортовых оптических сенсоров – предоставления изображений в различных спектральных каналах, именно физическая величина – спектральная плотность энергетической яркости измеряется бортовыми оптическими сенсорами космических систем, а также наземными оптическими сенсорами. Именно в шкале спектральной плотности энергетической яркости можно сопоставлять и сравнивать результаты космической съемки различными оптическими сенсорами различных космических систем и наземных спектрометрических измерений.

Калибровка (в частности, радиометрическая) оптических сенсоров космических систем в полете проводится в мировой практике регулярно с определенной периодичностью применительно к многоспектральным и гиперспектральным сенсорам ALI, IKONOS, ASTER, TM, ETM+, HRVIR, Nuregon и др. [5 – 13]. Потребителям данных этих сенсоров представляются вместе со снимками в соответствующих спектральных диапазонах актуальные значения калибровочных коэффициентов в аннотационных файлах (файлах метаданных), а в научных статьях и на web-сайтах широко обсуждаются вопросы научно-методического обеспечения контрольно-калибровочных работ [5 – 13].

Вопрос получения вместе со снимками высококачественных калиброванных информационных продуктов на основе актуальных результатов калибровки в полете бортовых оптических сенсоров является одним из основополагающих при решении задач тематической интерпретации данных космических систем наблюдения в различных предметных областях. Так, при тематической интерпретации широко используются разнообразные вегетационные индексы, в которых фигурируют яркости отраженного от исследуемого материала света в разных спектральных диапазонах, например, в нормализованном относительном индексе растительности NDVI - в красном и инфракрасном диапазонах. Если в этих разных спектральных диапазонах данные не будут приведены к одной и той же шкале, в частности, к спектральной плотности энергетической яркости в абсолютных физических единицах,

то результаты оценки такого индекса будут содержать значительные погрешности - вплоть до неадекватности реальному содержанию биомассы и т.п.

В настоящее время в мире создаются базовые калиброванные конечные информационные продукты (КИП) ДЗЗ, каждый из которых должен содержать информацию: 1) либо о геофизических и биофизических характеристиках, сопоставимую с результатами наземных бесконтактных и контактных измерений; 2) либо об интегральных характеристиках – индексах (например, упомянутый нормализованный относительный индекс растительности NDVI), полученных на основе результатов дистанционных измерений в различных спектральных каналах [14]. Такого рода характеристики, на которых базируются КИП, называются обобщенными физическими характеристиками и могут быть эффективно использованы для описания состояния дистанционно наблюдаемых объектов. Современные КИП должны обладать такими свойствами: 1) базироваться на обобщенных физических характеристиках наблюдаемого объекта, выраженных в абсолютных физических единицах; 2) эффективно представлять некоторый выделенный класс сходных по своему целевому назначению БП ДЗЗ; 3) каждый из указанных классов БП ДЗЗ должен быть представлен на однородных пространственно-временных сетках соответствующими рядами отсчетов [14].

КИП космического мониторинга должны создаваться на основе существующих в мировой практике систем классификации данных ДЗЗ, называемых иначе уровнями обработки данных ДЗЗ, предложенных NASA при создании системы Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS), и расширенных и обоснованных в каталоге рабочей группы по информационным системам и сервисам (Working Group on Information Systems and Services (WIGIS)) [15] комитета по спутниковым наблюдениям Земли (Committee on Earth Observation Satellites (CEOS)).

Из анализа классификации данных ДЗЗ по уровням обработки, в частности, комитета CEOS [14, 15], вытекает, что для достоверной тематической интерпретации данных ДЗЗ ключевое значение имеет подготовка откалиброванных информационных продуктов уровней 1А и 1В-D, которые получаются из сырых необработанных данных научных приборов уровня 0. 1А - восстановленные необработанные данные научных приборов, аннотированные вспомогательной информацией для радиометрической и геометрической калибровок, и для географической привязки. 1В-D – преобразованные в абсолютные физические единицы измеряемых величин данные уровня 1А, в которых реализована коррекция на основе проведенных калибровок и геопривязка с трансформацией изображения в необходимую географическую проекцию. В свою очередь, на откалиброванных информационных продуктах уровня 1 базируются данные уровней 2 и 3 и соответствующие им КИП, которые представляют собой восстановленные обобщенные физические характеристики в том же месте и с тем же разрешением, что и исходные данные уровня 1, и реорганизованные к равномерной пространственно-временной шкале соответственно. И наконец, созданные информационные продукты уровня 4 представляют собой простран-

ственно-временные обобщения результатов моделирования и анализа на основе данных нижних уровней представления.

Таким образом, базирующиеся на существующей классификации данных ДЗЗ создаваемые КИП космического наблюдения Земли представляют собой откалиброванные наборы данных, точно привязанные к наблюдаемым объектам, обеспечивающие достоверную тематическую интерпретацию и сопоставимость данных, поступающих из разнородных источников. БП ДЗЗ генерируются на основе исходной космической информации уровней 1A-D по классификации CEOS, которая должна, в частности, включать такие характеристики: 1) информацию в аннотационном файле (файле метаданных), необходимую и достаточную для выполнения радиометрической и геометрической калибровки оптических средств космического наблюдения; 2) откалиброванные показания научной аппаратуры в абсолютных физических единицах.

Системы космического наблюдения, для которых не реализованы комплексы построения вышеуказанных базовых информационных продуктов, не могут быть в настоящее время востребованы на рынке услуг дистанционного зондирования. Наличие, кроме высококачественных спутниковых снимков объектов и участков Земли, интересующих потребителей, еще и базовых информационных продуктов ДЗЗ, на основе результатов космического наблюдения, полученных с помощью откалиброванных оптических средств, позволит Украине выйти на международный рынок услуг дистанционного зондирования. Такие продукты дадут возможность создавать и внедрять различные информационные сервисы, обеспечивающие пользователей достоверной информацией об объектах и процессах космического мониторинга.

Таким образом, для адекватной однозначной тематической интерпретации данных космических наблюдений бортовые оптические средства должны регулярно калиброваться по бортовыми источниками калибровки или в результате, так называемой, викарной калибровки, которая осуществляется по результатам космической съемки и синхронных с ней наземных измерений характеристик тестовых участков и объектов на контрольно-калибровочных полигонах (ККП) [12, 13].

3. Актуальность разработки в Украине средств и методов метрологической поддержки в полете оптических средств космического наблюдения

До сегодняшнего дня в Украине калибровка оптических средств систем космического наблюдения Земли в полете с использованием контрольно-калибровочных полигонов не осуществлялась. Конструкторские решения КС «Сич-2» не предусматривали реализации в полете калибровки оптических средств систем космического наблюдения [16], а существующий аннотационный файл данных ДЗЗ (метаданных) КС «Сич-2» не содержал информации, касающейся выполнения контрольно-калибровочных работ. Для реализации последующих миссий КС «Сич» необходима корректировка аннотационного файла данных ДЗЗ путем включения дополнительной информации,

необходимой и достаточной для проведения послестартовой калибровки бортовых оптических средств и предоставления численных значений калибровочных коэффициентов (аналогично, как в миссиях КС Landsat, EO-1 и др. [5 – 13]) и разработка методик и создание средств для обеспечения калибровки.

Разработанной концепцией реализации государственной политики в сфере космической деятельности на период до 2032 г. предусмотрено создание наземной инфраструктуры для проведения метрологической аттестации средств ДЗЗ и валидации космических данных [17]. В рамках инфраструктуры в Украине должны быть созданы контрольно-калибровочные полигоны: в 2011-2017 гг. - для метрологической послестартовой поддержки бортовых оптических средств, в 2018-2022 гг. - радиолокационных средств космического наблюдения в КС, а в 2023-2032 гг. - система контрольно-калибровочных и тестовых полигонов ДЗЗ для обеспечения калибровки, верификации и валидации обработанных космических данных [18 – 20]. Кроме наземной инфраструктуры, должны быть созданы и другие составляющие контрольно-калибровочного обеспечения бортовых средств космического наблюдения: научно-методическое обеспечение контрольно-калибровочных работ; программное обеспечение, реализующее разработанные методики оценивания и калибровки; базы данных каталогов тестовых объектов полигонов и организации контрольно-калибровочных работ. В конечном итоге должна быть создана полноценная информационно-аналитическая система по организации и проведению контрольно-калибровочных работ и заверке данных ДЗЗ на государственном уровне, которая имела бы развитые средства доступа к данным и формирования рабочих и отчетных документов.

КС «Сич-2» [16] предоставляла пользователям данные космических снимков 1 уровня, которые являлись предварительно радиометрически откорректированными, прежде всего, с целью улучшения качества визуального восприятия изображения на снимке («ради красивой картинки»). К числу мер, осуществляющих такую предварительную радиометрическую коррекцию, можно отнести: 1) повышения контрастности изображения, 2) вычитание некоторого минимального уровня шумов («дымки» (цифровые отсчеты пикселей изображения не содержат значений «0»)), 3) автоматическое регулирование экспозиции («выдержки») съемки каждого объекта за счет изменения коэффициента усиления оптико-электронного тракта бортового датчика таким образом, чтобы при любых условиях съемки (например, как в сравнительно пасмурные, так и в ясные дни) максимальные значения цифровых отсчетов самых ярких пикселей изображения были приведены к максимуму разрядной сетки ([0, 255] для КС «Сич»). Такая предварительная радиометрическая коррекция существенно искажает существующий поток сырых данных от оптического сенсора, на основании которого может быть корректно выполнена калибровка в вышеуказанном смысле.

Необходимо знать соотношения, в частности значения коэффициента усиления оптико-электронного тракта бортового сенсора, обеспечивающего адекватную экспозицию («выдержку») съемки каждого объекта, с которыми осуществляется предварительная радиометрическая коррекция данных, чтобы восстано-

вить поток сырых данных. Либо же необходимо предоставить возможность доступа к сырым данным (уровня обработки «0»), чего в случае КС «Сич-2» авторы не смогли получить. Только на основе сырых данных снимков с использованием найденных коэффициентов радиометрической калибровки по разрабатываемой при участии авторов методике может быть корректно построена градуировочная зависимость между сырыми данными в цифровых кодах и соответствующей спектральной энергетической яркостью в физических единицах на апертуре сенсора для снятого конкретного тестового объекта. Если же сырые данные восстановлены или предоставлены не будут, то полученная градуировочная зависимость будет касаться только этого конкретного снимка и не будет обладать обобщающей (генерализирующей) способностью для любых (всех) снимков в соответствующем спектральном диапазоне. В таком случае можно говорить только о радиометрической калибровке данных конкретного снимка.

В ходе развития космических средств дистанционного наблюдения установлено, что наиболее надежные методы калибровки основаны на использовании данных из наземных контрольно-калибровочных полигонов синхронных с космической съемкой наземных измерений характеристик тестовых объектов или относительно стабильных во времени и однородных в пространстве данных характеристик так называемых псевдоинвариантных тестовых участков [12, 13, 21, 22].

Такие методы обладают преимуществами, связанными со следующими факторами: значительной репрезентативностью характеристик различных наземных объектов для калибровки бортовых сенсоров; возможностью учета изменений технических характеристик сенсоров в полете; возможностью разработки алгоритмов валидации данных в реальном времени с использованием сети наземных датчиков. Развитие технологий и методов калибровки и валидации данных оптических приборов на основе контрольно-калибровочных полигонов подспутниковой поддержки требует разработки и совершенствования методик оценивания спектральных характеристик типовых тестовых объектов (ТО), создания базы данных для поддержки наземных синхронных с космической съемкой наблюдений, подготовки и обоснования состава комплекса наземных приборов для качественной и надежной интерпретации результатов наблюдений и исследований, разработки интегрированной информационной системы поддержки контрольно-калибровочных работ.

Таким образом, в рамках подготовки дальнейших миссий КС «Сич» являются актуальными и соответствующими мировому уровню в области калибровки и контроля бортовых средств космического наблюдения работы по созданию контрольно-калибровочного обеспечения оптических средств системы космического наблюдения.

4. Создание средств и разработка методик послестартовой калибровки оптико-электронных средств наблюдения космической системы «Сич» с использованием контрольно-калибровочного полигона

Глобальной целью работ в рамках указанных научных исследований и опытно-конструкторских ра-

бот является создание контрольно-калибровочного обеспечения систем ДЗЗ в Украине на базе разрабатываемых научно обоснованных методик, развернутой наземной инфраструктуры системы полигонов с тестовыми объектами и измерительными приборами и создаваемых программно-технических комплексов в интересах построения в Украине государственной системы оценки достоверности данных космического наблюдения поверхности Земли.

В настоящее время в этом направлении решены следующие задачи:

- проведены наземные измерения спектральных характеристик отражения выбранных тестовых объектов в районе расположения Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУ-ИКС) (г. Евпатория-19) и создан сегмент базы данных и каталог ТО для калибровки оптических средств космического наблюдения КС «Сич-2»;

- обоснована инфраструктура ККП в районе расположения НЦУИКС и разработаны предложения по ее развитию с учетом опыта и возможности использования для калибровки тестовых объектов полигонов и псевдоинвариантных участков, созданных под руководством рабочей группы по калибровке и валидации (Working Group on Calibration and Validation (WGCV) [23, 24] комитета CEOS.

Разработаны и оценены в смысле достижимой точности на статистических данных следующие методики: определения пространственного разрешения на местности; радиометрической калибровки спектральных каналов, оценивания спектральной чувствительности каналов многоспектральной системы ДЗЗ КС «Сич-2».

Основными задачами контрольно-калибровочного полигона подспутниковой поддержки являются: 1) калибровка средств космического наблюдения на основе синхронных данных наземных измерений и космической съемки выбранных тестовых участков и объектов на этапах летно-конструкторских испытаний и штатной эксплуатации; 2) отработка и аттестация методик метрологического послестартового обеспечения средств космического наблюдения; 3) отработка и аттестация методик дистанционного оценивания состояния тестовых объектов поверхности Земли, процессов передачи излучения и состояния среды его распространения; 4) метрологическое обеспечение сертификации информационных продуктов обработки данных ДЗЗ для эффективного решения задач тематической интерпретации и др.

В настоящее время комитет CEOS предоставляет информационные сервисы для калибровки и валидации через информационный портал Cal/Val Portal. Сейчас Cal/Val Portal посвящен, главным образом, контролю и радиометрической калибровке датчиков инфракрасного и оптического диапазонов (Infrared and Visible Optical Sensors - IVOS). Основная цель портала состоит в предоставлении базовых информационных продуктов ДЗЗ и координировании в международном масштабе деятельности сообществ ученых, разработчиков систем космического наблюдения и потребителей данных ДЗЗ по калибровке и валидации с использованием специально создаваемых контрольно-калибровочных полигонов подспутниковой под-

Исходя из основных задач контрольно-калибровочного полигона подспутниковой поддержки, критериев выбора мест для организации таких полигонов и анализа опыта их создания под руководством рабочей группы по калибровке и валидации (WGCV) комитета CEOS, в качестве ККП в Украине целесообразно использовать участки в районе расположения НЦУИКС.

Проведение на базе ККП калибровки оптических датчиков ДЗЗ в видимом и ближнем инфракрасном диапазоне определяет в качестве одного из важнейших факторов при выборе территории ККП благоприятные астрономические и климатические условия в районе расположения полигона: чистая атмосфера, большое количество безоблачных дней, минимальная сезонная динамика климата. ККП в районе расположения НЦУИКС в значительной мере удовлетворяет этим требованиям. НЦУИКС расположен в степной северо-западной части полуострова Крым на равнинной территории. Климат там умеренно теплый, сухой, без резких колебаний температуры и атмосферного давления. Количество солнечных дней в году - от 260 до 280, средняя относительная влажность - около 65%, годовое количество осадков в Евпатории - около 358 мм.

Исходя из возможностей существующих космических систем ДЗЗ и разнообразия задач, связанных с использованием данных космического наблюдения, желательно, чтобы территория полигона была большой по площади и включала бы участки суши с разнообразным рельефом, растительностью и специфическими геологическими образованиями, внутренними водоемами, а также прилегающую водную акваторию значительной площади (море) с широким спектром приграничных участков «суша-вода» и другими особенностями. Хорошая пространственная однородность значительных по размерам участков и природных и искусственных объектов на большой территории полигона способствует снижению приграничных воздействий, уменьшает проявления нежелательных эффектов рассеяния света от объектов и участков, которые находятся вне данной области. Чем выше пространственная однородность отражательных поверхностей тестовых объектов, тем меньше проявляются загромождающие эффекты искусственного обобщения данных отражательной способности по всей поверхности каждого протяженного объекта полигона. При выборе ТО преимущество должно предоставляться объектам с высокой отражательной способностью поверхностей, поскольку это позволит обеспечить высокое значение отношения сигнал-шум, уменьшить неопределенность, обусловленную влиянием атмосферы, и повысить точность калибровки. В качестве ТО следует выбирать объекты с близкой к Lambertовской отражательной

способностью поверхностей, поскольку при оценке спектральной отражательной способности всей такой поверхности по данным наземных измерений уменьшаются погрешности, обусловленные различной геометрией расположения Солнца и участков наблюдения в разные моменты времени.

Вышеуказанные требования к ККП в значительной степени выполняются при использовании в качестве тестовых участков территорий технических площадок 1-3 НЦУИКС. Снимки площадок 1 и 3 отображены на рис. 1 и 2 соответственно. Суммарная площадь площадок 1-3 НЦУИКС составляет более 870 000 кв. м., а расстояния между ними - значительные: между 1 и 3 - более 4 км; между 3 и 2 - около 5,5 км; между 1 и 2 - около 9 км. На территориях площадок расположены объекты, имеющие строгие стабильные геометрические формы, большие размеры (некоторые из них обладают пространственно однородной отражательной способностью): антенные комплексы (АДУ-1000, РТ-70, П-400), здания, плацы, дороги с асфальтовым и бетонным покрытием. На рис. 1 и 2 пронумерованными маркерами отображены реперы - характерные точки отражающих поверхностей ТО и участков (на четких границах и углах площадных объектов, площадок, перекрестков дорожек). Их географические координаты оценены с погрешностью до нескольких сантиметров в результате топогеодезических измерений с использованием контрольно-корректирующей станции EVRS Системы космического навигационно-временного обеспечения Украины, расположенной на территории площадки 1 НЦУИКС.

В результате предварительного отбора на площадках 1-3 НЦУИКС сформированы 2 группы тестовых объектов:

1) ТО для определения пространственного разрешения на местности и геометрической калибровки - объекты с четкими геометрическими формами и известными с высокой точностью геометрическими параметрами с установленными реперами: антенные полотно крупногабаритных антенных комплексов (РТ-70, АДУ-1000, П-400), крыши зданий и площадки;



Рис. 1. Фрагмент снимка КС «Quick-Bird-2» 2008 г. технической площадки 1 НЦУИКС с тестовыми объектами и маркированными реперными точками



Рис. 2. Фрагмент снимка КС «Quick-Bird-2» 2008 г. технической площадки 3 НЦУИКС с тестовыми объектами и маркированными реперными точками

2) ТО для радиометрической калибровки и определения спектральной чувствительности бортовых оптических сенсоров в спектральных каналах: антенные комплексы РТ-70, АДУ-1000, П-400; стадион, центральный плац, крыша аппаратного корпуса радиотелескопа РТ-70, бетонный и асфальтовый плацы у аппаратного корпуса, солончаковые берега лиманов, поверхность моря и др.

Принципиально важным обстоятельством при выборе района расположения НЦУИКС в качестве ККП подспутниковой поддержки является принадлежность его к ведомству Государственного космического агентства Украины, стабильный правовой статус охраняемой территории, развитие инфраструктуры, средств связи, наличие квалифицированного персонала, который можно задействовать в проведении контрольно-калибровочных работ.

ККП в районе НЦУИКС создается по образцу утвержденного рабочей подгруппой IVOS группы WGCV комитета CEOS набора глобально распределенных по земному шару стандартизированных тестовых участков для послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения. Этот набор содержит восемь участков, оборудованных на постоянной основе инструментами, (так называемых LANDNET Sites) для проведения серий синхронных с космической съемкой наземных измерений. Результаты измерений используются для радиометрической и геометрической калибровок оптических средств в международных космических миссиях и служат для перекрестного сравнения и прогнозирования в полете характеристик различных датчиков. Кроме полигонов системы LANDNET Sites, стандартизированный набор тестовых мест комитета CEOS содержит еще и псевдо-инвариантные участки пустыни, которые имеют высокую отражательную способность, состоят, как правило, из песчаных дюн без растительности и обладают низким содержанием аэрозоля над участками. Они могут быть использованы для оценки долгосрочной стабильности оптических сенсоров и перекрестного сравнения их характеристик. При создании инфраструктуры ККП

осуществляется его описание согласно анкете-шаблону, утвержденному рабочей группой WGCV в 2009 г. как стандарт описания применительно к полигонам системы LANDNET Sites [23, 24]. Шаблон структурирован в форме серии вопросов для описания тестовых участков по таким признакам: доступность, физические характеристики и возможность их поддержания. Шаблон включает следующие сведения [23, 24]: местонахождение полигона; логистическая информация об участках; климатология и характеристики атмосферы над ТО; данные об оборудовании участков измерительными

приборами; информация о точности измерений и калибровки; информация об участках, сведения об информационных системах, базах данных и сертифицированных информационных продуктах; контактная информация.

При планировании инфраструктуры ККП в районе расположения НЦУИКС создается каталог тестовых объектов, наиболее подходящих для оценки пространственной разрешающей способности на местности, радиометрической калибровки спектральных каналов, определения функции спектральной чувствительности спектральных каналов оптической системы космического наблюдения КС «Сич». Каталог представляет собой открытый web-ресурс, который будет создаваться по аналогии с существующими web-порталами с учетом опыта в этом направлении Геологической службы США (US Geological Survey (USGS)), члена комитета по спутниковым наблюдениям CEOS и глобальной системы наблюдения Земли (Global Earth Observation System of Systems (GEOSS)). USGS занимается обработкой и интеграцией информации с наземных полигонов со всего мира в онлайн-каталог поддержки и калибровки аэрокосмических средств ДЗЗ. В каталоге USGS присутствует информация по 36 тестовым участкам, расположенных в разных местах мира, большинство из которых не оборудованы постоянно имеющимися наземными инструментальными измерительными средствами, как это имеет место на восьми контрольно-калибровочных полигонах системы LANDNET Sites комитета CEOS. В онлайн-каталоге содержатся данные о местоположении полигонов, тестовых объектах, характеристиках отражения их поверхностей, инфраструктуре и инструментальной поддержке, классе полигона и другие.

Следуя шаблону рабочей группы WGCV как стандарту описания полигона, можно отметить, что местонахождение ККП в районе расположения НЦУИКС, его благоприятные астрономические и климатические условия, общая информация о тестовых объектах на его технических площадках были проанализированы выше.

Относительно исторических и текущих данных о климате в районе расположения НЦУИКС и наземных метеорологических приборах, используемых для определения метеорологической обстановки, можно сказать следующее. На технических площадках НЦУИКС в течение десятилетий ведутся метеорологические наблюдения. На современном этапе в качестве основных многофункциональных метеорологических приборов используются мобильные цифровые метеорологические станции типа La Crosse WS3650-IT-MG-SIL (906653 и аналогичные). С помощью такой мобильной метеостанции в радиусе 100 м эффективно измеряются такие метеорологические характеристики: температура, влажность, атмосферное давление, направление и сила ветра, уровень осадков, - и дистанционно передаются в коммуникационную сеть. Такими станциями можно обеспечить оперативные измерения метеорологических параметров вблизи всех тестовых объектов, расположенных на технических площадках НЦУИКС.

Следует отметить отсутствие в НЦУИКС приборов, измеряющих концентрацию аэрозолей в атмосфере и прозрачность атмосферы над тестовыми участками, и необходимость приобретения таких приборов для обеспечения инфраструктуры ККП.

Согласно шаблону описания ККП на основе результатов синхронных со спутниковой съемкой КС «Сич-2» экспериментов по определению спектральных характеристик отражения выбранных тестовых объектов по данным наземных измерений создан презентационный каталог ТО на территории контрольно-калибровочного полигона в районе расположения НЦУИКС. Наземные измерения спектральных характеристик отражения были проведены в ноябре 2011 г. с применением полевого спектрометра ASP-100F, принадлежащего ИКИ НАН Украины и ГКА Украины, в спектральном диапазоне 190-1100 нм [25] и в июне 2012 г. - с применением прецизионно полевого спектрометра ASD FieldSpec 3FR, принадлежащего Научному центру аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук (ЦАКИЗ ИГН) НАНУ, в спектральном диапазоне 250-2500 нм.

На рис. 3 приведено многоспектральное спутниковое изображение, которое охватывает площадки 1 и 3 НЦУИКС, синтезированное на основе выполненного многозональным сканирующим устройством КС «Сич-2» снимка от 08.11.2011 г. в спектральных диапазонах: (500-590 нм) - зеленый; (610-680 нм) - красный; (790-890 нм) - ближний инфракрасный. В качестве тестовых были выбраны естественные и искусственные объекты площадок 1-3 НЦУИКС с относительно однородными по отражательной способности поверхностями. В GIS-среде созданы векторные



Рис. 3. Спутниковое изображение территории НЦУИКС, синтезированное на основе снимка от 08.11.2011 г. многозонального сканирующего устройства КС «Сич-2» в спектральных диапазонах: (500-590 нм) - зеленый; (610-680 нм) - красный, (790-890 нм) - ближний инфракрасный

слои площадных полигональных областей, соответствующих выбранным тестовым объектам. Схема расположения ТО на территории НЦУИКС, обозначенных соответствующими площадными полигональными областями, отображена на рис. 4: а - на площадке 1, б - на площадке 3. В табл. 1 приведены кодовые обозначения этих ТО и их наименования. Для контроля реального положения точек измерений и последующего контроля геопривязки снимков района расположения НЦУИКС использовался GPS-приемник. Фиксировалось время измерения спектральных характеристик. Для каждого объекта спектральные измерения выполнялись не менее чем в 10 опорных точках, и проводилась статистическая обработка результатов измерений на множестве опорных точек. Для каждого объекта получена усредненная по опорным точкам зависимость спектрального коэффициента отражения от длины волны. В свою очередь, в каждой опорной точке такие спектральные кривые были получены как результат усреднения по результатам не менее 50 измерений.

Применительно к результатам измерений с помощью полевого спектрометра ASP-100F интенсивности отраженного от ТО света $I_{\text{refl}}(\lambda)$ разработан и программно реализован алгоритм обработки данных, позволяющий корректно оценивать спектральный коэффициент отражения $\rho(\lambda)$ поверхности тестового объекта по результатам усреднения серии измерений в каждой опорной точке. В основу алгоритма положена процедура предварительной компенсации шумов прибора, которая выполняется с использованием результатов измерений в лабораторных условиях так называемого «темнового шума» I_{dark} . Перед проведением серии измерений на новом тестовом объекте каждый раз измеряется спектральная интенсивность отражения эталонного белого тела $I_{\text{white}}(\lambda)$.



а б
 Рис. 4. Схема расположения тестовых объектов на территории НЦУИКС, обозначенных соответствующими площадными полигональными областями: а - на площадке 1, б - на площадке 3

С учетом полученных результатов измерений в лабораторных и полевых условиях спектральных интенсивностей отражения I_{dark} , $I_{white}(\lambda)$, $I_{refl}(\lambda)$ спектральный коэффициент отражения отражательной поверхности тестового объекта определяется следующим образом:

$$\rho(\lambda) = \frac{I_{refl}(\lambda) - I_{dark}}{I_{white}(\lambda) - I_{dark}}$$

Для дополнительной фильтрации шумов, уменьшения дисперсии оценок и, как результат, – сглаживания спектральных зависимостей L_i исследовано два типа цифровых фильтров: Савицкого-Голея [26] и Батерворта [27] и был выбран для использования в обработке данных измерений фильтр Савицкого-Голея, поскольку он лучше сохраняет высокочастотные компоненты оцениваемых спектральных зависимостей. Работа фильтра основана на полиномиальной аппроксимации отдельных выборок процесса по критерию минимума среднеквадратической ошибки.

Зависимости спектральных коэффициентов отражения $I_{refl}(\lambda)$ ТО НЦУИКС от длины волны, полученные в результате наземных измерений с применением полевого спектрометра ASP-100F, с обозначениями кривых, соответствующими перечню объектов в табл. 1, приведены на рис. 5.

Таблица 1

Кодовые обозначения и наименование тестовых объектов на площадках 1 и 3 НЦУИКС, обозначенных соответствующими площадными полигональными областями

№	Код	Наименование
1	P16	стадион
2	P13	плац
3	Z113_2	крыша клуба
4	A12	антенный комплекс АДУ-1000
5	A31	зеркало радиотелескопа РТ-70
6	P33	бетонная площадка
7	P31	асфальтовая площадка
8	Z31_1	крыша аппаратного корпуса
9	M20	солончаковый берег озера

Созданный по данным наземных измерений каталог ТО на контрольно-калибровочном полигоне в районе расположения НЦУИКС на презентационном уровне описания содержит 26 отобранных объектов: 11 – на площадке 1; 3 - на площадке 2, 5 - на площадке 3, 7 – за пределами НЦУИКС [28]. Презентационные метаданные ТО содержат такую информацию: название ТО; широта и долгота характерной точки ТО; геометрические размеры; количество измерений спектральных характеристик отражения, название прибора спектрометрии; дата, время измерений, наименование поверхности покрытия ТО; усредненная спектральная характеристика отражения ТО; изображения ТО и поверхности покрытия ТО; служебные данные. Каталог ТО ККП НЦУИКС на презентационном уровне описания представлен основной и подчиненной таблицей, фрагмент которой отображен на рис. 6.

Каталог ТО ККП НЦУИКС на презентационном уровне описания представлен основной и подчиненной таблицей, фрагмент которой отображен на рис. 6.

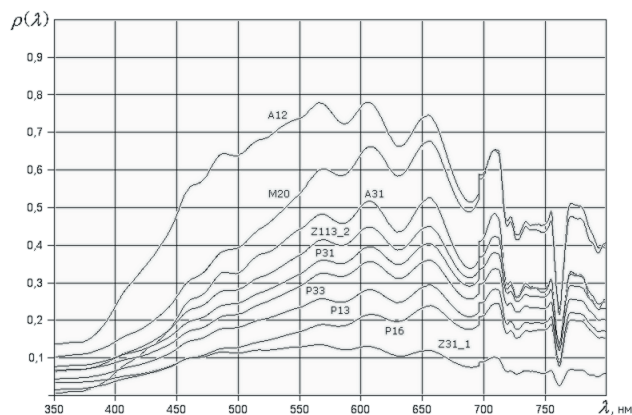


Рис. 5. Зависимости спектральных коэффициентов отражения $\rho(\lambda)$ тестовых объектов НЦУИКС от длины волны λ на основе наземных измерений с применением полевого спектрометра ASP-100F, с обозначениями кривых, соответствующими перечню объектов в табл. 1: P16 – стадион; P13 – плац; Z113_2; A12 - антенный комплекс АДУ-1000; A31 - зеркало радиотелескопа РТ-70; P33 - бетонная площадка; P31 – асфальтовая площадка; Z31_1 – крыша аппаратного корпуса; M20 – солончаковый берег озера

Для хранения и упорядочения накопленных в ходе выполнения проекта данных создается геоинформационная база данных в среде GIS-пакета ArcGis 8.3. (ESRI Inc.), включающая векторные слои полигональных искусственных и естественных объектов НЦУИКС, векторные слои точек измерения спектральных характеристик, спутниковые снимки КС «Quick Bird-2» и «Сич-2», цифровую модель местности района расположения НЦУИКС.

Дані про наземні вимірювання (продовження)



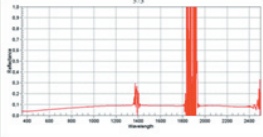


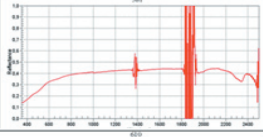


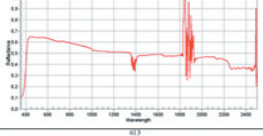


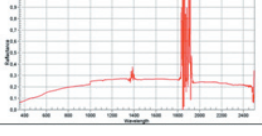
№	Зображення ТО	Назва поверхні покриття ТО	Зображення поверхні покриття ТО	Усереднена спектральна характеристика відбиття ТО	Усереднене на висота вимірів на ТО
1.		Бітумне покриття з дрібними камінцями			23
2.		Асфальтове покриття			14
7.		Спеціальне покриття 1			25
8.		Прозорий риберойд			12

Рис. 6. Фрагмент підчиненої таблиці презентаційного каталога ТО ККП НЦУІКС

При заповненні геоінформаційної бази проводиться імпорту і редагування даних, створюються нові класи просторових об'єктів. В якості атрибутивної інформації в базі містяться дані про час, температуру повітря, тиск, вологість і напрямку вітру в час наземних вимірювань спектральних характеристик відбиття об'єктів в районі розташування НЦУІКС.

Для обробки проведених наземних вимірювань використано формат shape - широко розповсюджений векторний формат файлів географічної інформації. Цей формат підтримується компанією ESRI з метою інтероперабельності продуктів компанії ESRI з іншими програмами. Формат shape-файла дозволяє зберігати наступні різні типи геометричних об'єктів: точки, лінії, полігони і др. Відокремлений файл може зберігати інформацію про об'єктах одного типу. shape-файл - векторний формат для зберігання об'єктів, описуваних геометрією і супутніми атрибутами. Через свою розповсюдженість формат фактично став стандартом обміну даними між геоінформаційними системами. shape-файл - це не один файл, а набір файлів з однаковими іменами, але різними розширеннями. Основні формати являються трьома обов'язковими файлами: shp, shx і dbf, - і додатковими sbn, sbx,aih, ain.

При створенні векторних шарів для тестових об'єктів НЦУІКС (стадіону, дахів будівель, асфальтових і бетонних площадок, поверхонь дзеркал антенних комплексів) в якості геоінформаційного підґрунтя використано знімок КС «Quick Bird-2» субметрового діапазону території НЦУІКС за 2008 рік. Прив'язка знімка була виправлена на основі реперних точок, зображених на рис. 1 і 2, отриманих при проведенні польових досліджень з допомогою системи супутникового позиціонування на попередньому етапі роботи. Для природних тестових об'єктів в районі НЦУІКС (піщані і ґрун-

тові берега, водойми, кар'єр по добувці ракушечника) в якості геоінформаційного підґрунтя для векторизації використано квазісинхронний з наземними вимірюваннями знімок КС «Сич-2» від 03.06.2012 г.

В процесі обробки було векторизовано ряд полігональних штучних і природних тестових об'єктів з різними типами покриттів. Процес векторизації включався в оконтурювання на зображенні в ручному або автоматичному режимі форм обраних об'єктів з точністю до пікселя (0,6 м) і формування в відповідних

файлах формату shape даних відносно координат вузлів полігональних об'єктів. Серед них, зокрема, стадіон, дахи будівель, асфальтові і бетонні площадки, поверхні дзеркал антенних комплексів, солончаки, піщані берега, водойми, кар'єр. Зображення векторних шарів полігональних об'єктів на площадках 1 і 3 НЦУІКС наведено на рис. 4, а, б відповідно.

В dbf-файл векторних шарів полігональних об'єктів були внесені дані про час вимірювання спектральних характеристик, взяті з track-файлів GPS-приймача, тип покриття, і погодних умов в час проведення досліджень, а саме: відносна і абсолютна атмосферна тиск (гПа), температура повітря (°C), відносна вологість повітря (%), точка роси (°C), ефективна температура (°C), швидкість вітру (м/с), напрямку вітру (в градусах по годинній стрілці (0° - Північ)), опадки (мм).

Попередній аналіз супутникових знімків КС «Сич-2» показав недостатню точність їх геоприв'язки. На рис. 7 зображено фрагмент багаторічного супутникового зображення, синтезованого на основі виконаного багаторічного скануючого пристроєм КС «Сич-2» знімка від 08.11.2011 г. (являючись підстилою поверхнею) з полігональним об'єктом - солоним озером біля площадки 3 НЦУІКС.

Полігональний об'єкт отримано в результаті класифікації зображень на основі точно геоприв'язаного знімка КС «Quick-Bird-2» і також має точну геоприв'язку. На підстилою поверхню - знімку КС «Сич-2» реальний об'єкт - солоне озеро являється зсунутих відносно класифікованого полігонального об'єкта приблизно на 1000 м в напрямку на південь-захід. Після корекції геоприв'язки знімка КС «Сич-2» з використанням модуля просторової прив'язки Georeferencing в середі ArcMap на основі векторного шару реперних то-

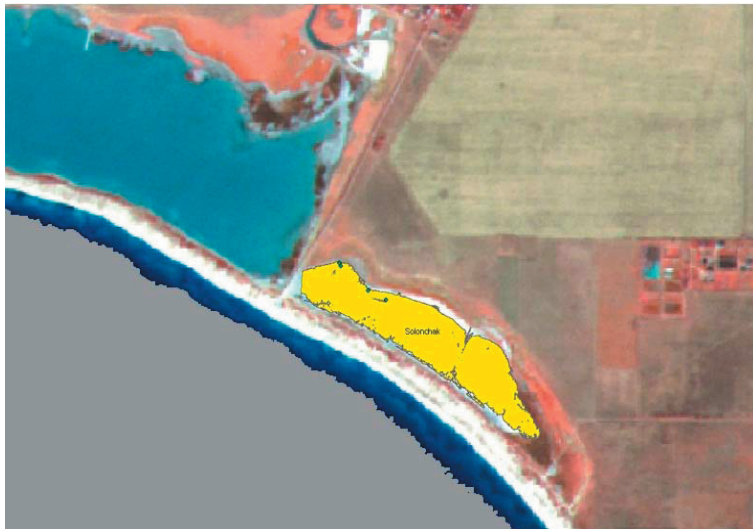


Рис. 7. Фрагмент многоспектрального спутникового изображения (являющегося подстилающей поверхностью), синтезированного на основе снимка, выполненного многозональным сканирующим устройством КС «Сич-2» от 08.11.2011 г. с полигональным объектом - соленым озером возле площадки 3 НЦУИКС

чек, координаты которых были прецизионно определены на предыдущем этапе работ, был получен приемлемый результат геопривязки снимка КС «Сич-2». Изображение соленого озера возле площадки № 3 НЦУИКС на снимке КС «Сич-2» совпало с изображением соответствующего ему полигонального объекта, классифицированного по снимку КС «Quick-Bird-2» (рис. 8).

Принимая во внимание указанный шаблон описания ККП, утвержденный рабочей группой WGCV комитета CEOS [23, 24], кратко проанализируем аппа-



Рис. 8. Приемлемый результат коррекции геопозиционирования снимка КС «Сич-2» с применением модуля пространственной привязки Georeferencing в среде ArcMap на основе векторного слоя прецизионно определенных реперных точек. Изображение соленого озера возле площадки № 3 НЦУИКС на снимке КС «Сич-2» совпало с изображением соответствующего ему полигонального объекта, классифицированного по снимку КС «Quick-Bird-2»

ратуру для проведения прецизионных измерений геодезических координат (система WGS 84) реперов на объектно-ландшафтной территории НЦУИКС, отображенных на рис. 1 и 2.

Измерения геодезических координат реперов на площадках НЦУИКС проводилось с использованием контрольно-корректирующей станции EVRS Системы космического навигационно-временного обеспечения Украины, расположенной на площадке 1 НЦУИКС, координаты приемной антенны которой определены с высокой точностью. Станция EVRS оборудована высокоточным приемником сигналов спутников GPS - NovAtel MPC - и микрощелевой приемной антенной решеткой - антенной NovAtel GPS-702. Полевые измерения в реперных точках выполнялись высокоточными многочастотными мобильными GPS-приемниками NovAtel DL-V3.

Таким образом, оборудование, необходимое для проведения прецизионных измерений геодезических координат реперов на объектно-ландшафтной территории НЦУ-

ИКС имеется, может быть обновлено, а геодезические работы по прецизионному определению координат реперных точек могут быть заказаны на выбранных тестовых объектах.

Согласно шаблону описания ККП проанализируем основные приборы для наземных измерений, используемые на полигонах системы LANDNET Sites комитета CEOS, которыми целесообразно оснастить ККП в районе расположения НЦУИКС.

По данным измерений прямого интегрального солнечного излучения, поступающего на поверхность при не закрытом облаками диске Солнца определяются характеристики прозрачности атмосферы: интегральный коэффициент прозрачности и фактор мутности. Дополнительно по данным прямого коротковолнового излучения Солнца и влагосодержания (концентрация водяного пара) атмосферы определяется аэрозольная оптическая толщина атмосферы для различных длин волн над тестовыми объектами полигона. Для этих целей используются солнечные фотометры CIMEL, расположенные по всему миру, в рамках международной сети AERONET CIMEL network (AERONET – AErosol RObotic NETwork;) и портативные солнечные фотометры MICROTOPS II [24].

От значения аэрозольной оптической толщины атмосферы, измеряемой с помощью этих приборов, существенно зависит отражательная способность поверхностей ТО, что важно при проведении викарной радиометрической калибровки на основе наземных измерений спектрального коэффициента отражения ТО и данных синхронного космического снимка ТО с использованием существующих и разрабатываемых математических моделей аэрозолей в атмосфере [24].

На ККП системы LANDNET Sites комитета CEOS используются гонио радиометрические спектрометрические системы для проведения серии нескольких угловых измерений двулучевой функции отражательной способности (bidirectional reflectance distribution function (BRDF)) поверхности ТО. Четырехмерная двулучевая функция BRDF определяет, как свет отражается от непрозрачной поверхности.

Четыре переменные в функции: направления входящего светового излучения; отраженного светового излучения, которые определены относительно нормали к поверхности (в общем случае - неплоской); угол азимута и угол зенита Солнца. Функция возвращает отношение отраженной спектральной энергетической яркости вдоль направления отраженного света к спектральной энергетической освещенности отражающей поверхности по направлению падающего света. BRDF измеряется в ср-1, где стерадиан (sr) - единица измерения телесного угла. Примеры использования гонио радиометрических спектрометрических систем можно найти на ККП Negev (Израиль), на ККП Tuz Golu (Турция) [24].

5. Выводы

В статье отражены результаты исследований, проведенных в направлении создания в Украине метрологического послестартового обеспечения систем ДЗЗ на базе разрабатываемых научно обоснованных методик, развернутой наземной инфраструктуры системы контрольно-калибровочных полигонов с тестовыми объектами и измерительными приборами и создаваемых программно-технических комплексов в интересах построения в Украине государственной системы оценки достоверности данных космического наблюдения поверхности Земли. До сегодняшнего дня в Украине калибровка в полете оптических средств систем космического наблюдения Земли с использованием контрольно-калибровочных полигонов не осуществлялась, а существующий аннотационный файл данных ДЗЗ КС «Сич-2» не содержал информации, касающейся выполнения контрольно-калибровочных работ. Наличие, кроме высококачественных спутниковых снимков, еще и базовых информационных продуктов ДЗЗ на основе результатов космического наблюдения, полученных с помощью откалиброванных оптических средств, позволит Украине выйти на международный рынок услуг дистанционного зондирования. При реализации предстоящих миссий КС «Сич» необходима корректировка

аннотационного файла данных ДЗЗ путем включения дополнительной информации, необходимой и достаточной для проведения послестартовой калибровки бортовых оптических средств с предоставлением численных значений калибровочных коэффициентов, аналогично, как в мировых КС.

Исходя из сформулированных основных задач контрольно-калибровочного полигона подспутниковой поддержки, критериев выбора мест развертывания таких полигонов с использованием в качестве стандарта описания ККП шаблона, утвержденного рабочей группой по калибровке и валидации комитета CEOS, обоснованы требования к инфраструктуре ККП в районе расположения НЦУИКС (г. Евпатория-19). На основе результатов синхронных со спутниковой съемкой КС «Сич-2» наземных измерений спектральных характеристик отражения выбранных ТО создан презентационный каталог тестовых объектов и геоинформационная база данных. Она содержит векторные слои полигональных природных и искусственных объектов НЦУИКС, слои точек измерений спектральных характеристик, спутниковые снимки КС «Quick Bird-2» и «Сич-2», цифровую модель местности ККП. С учетом шаблона описания ККП проанализированы такие приборы для наземных измерений, которыми должны быть оборудованы тестовые участки полигона при выполнении контрольно-калибровочных работ: 1) как из числа имеющихся в распоряжении исследователей: цифровые метеостанции, спектрометры ASP-100F, ASD FieldSpec 3FR, аппаратура для прецизионных измерений геодезических координат реперов; 2) так и приборы, используемые на полигонах системы LANDNET Sites комитета CEOS: солнечные фотометры CIMEL в сети AERONET CIMEL network, портативный солнечный фотометр MICROTOPS II, гонио радиометрические спектрометрические системы. Разработаны и предварительно оценены в отношении достижимой точности на статистических данных с использованием снимков КС «Сич-2» 2011-2012 гг. следующие методики: 1) оценивания спектральной чувствительности каналов многоспектральной системы ДЗЗ [25]; 2) определения пространственного разрешения на местности [29]; 3) радиометрической калибровки спектральных каналов [30]. Их рассмотрение является предметом отдельных статей. Результаты проведенных научных исследований и разработанные методики актуальны и будут использованы и реализованы в метрологическом обеспечении послестартовой поддержки оптических средств космического наблюдения разрабатываемой космической системы "Сич-2-1".

Литература

1. Шовенгердт, Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений [Текст] / Р.А. Шовенгердт. – М.: Техносфера, 2010. – 560 с.
2. Назаров, А.С. Фотограмметрия [Текст] / А.С. Назаров. – Минск: ТетраСистемс, 2006. – 368 с.
3. Беляев, Б.И. Оптическое дистанционное зондирование [Текст] / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский. – Минск: БГУ, 2006. - 455 с.
4. Железняк, О.О. Космічна фотограмметрія [Текст] / О.О. Железняк, Л.С. Чубко. - К.: НАУ, 2012. - 220 с.
5. Chandar, G. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges [Текст] / G. Chandar, B. Markham // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2003. - Т. 41, №. 11. – С. 2674 – 2677.
6. Chandar, G. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration [Текст] / G. Chandar, B. Markham // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. - 2007. - Т. 4, № 3. – С. 490-494.

7. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets [Текст] / P.M. Teillet, J.L. Barker, B.L. Markham, R.R. Irish, G. Fedosejevs, J.C. Storey // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Т. 78, № 1-2. – С. 39– 54.
8. Thome, K.J. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method [Текст] / K.J. Thome // Remote Sensing of Environment. – 2001. – Т. 78, № 1-2. – С. 27– 38.
9. Chander, G. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors [Текст] / G. Chander, B.L. Markham, D.L. Helder // Remote Sensing of Environment. - 2009. – Т. 113, № 5.- С. 893-903.
10. Tuz Golu: New absolute radiometric calibration test site [Текст] / S. Gurol, H. Ozen, U. M. Leloglu, E. Tunali // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2008. – Т. 37, B1. – С. 35-40.
11. Temporal, spectral, and spatial study of the automated vicarious calibration test site at Railroad Valley, Nevada [Текст] / J. S. Czaplak, Myers, K.J. Thome, B.R. Cocilovo, J. T. McCorkel, J. H. Buchanan // Proc. of SPIE. – 2008, 7081 70810I-1. - SPIE Digital Library. – 9 p. (<http://144.206.159.178/ft/CONF/16420331/16420348.pdf>).
12. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [Текст] / P.N. Slater, S.F. Biggar, R.G. Holm, R.D. Jackson, Y. Mao, M.S. Moran, J.M. Palmer, B. Yuan // Remote Sensing of Environment. – 1987. – Т. 22. – С. 11–37.
13. Biggar, S.F. Vicarious radiometric calibration of EO-1 sensors by reference to high-reflectance ground targets [Текст] / S.F. Biggar, K.J. Thome, W. Wisniewski // IEEE Transactions on Geosciences and Remote sensing. – 2003. – Т. 41, № 6. - С. 1174-1179.
14. Лупян, Е.А. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли [Текст] / Е.А. Лупян, В.П. Саворский // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 2. - С. 87-96.
15. Interoperable Catalogue System [Текст] // Valids CEOS/WGISS/ICS/Valids, Issue 1.2, April 2005, 55 с.
16. Космічна система «Січ-2»: завдання та напрями використання [Текст]. – Київ: Державне космічне агентство України, 2012. – 48 с.
17. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року [Текст]. – Київ: Державне космічне агентство України, 2012. – 48 с.
18. Лялько, В.И. Полигоны ДЗЗ в Украине как элемент глобальной системы GEOSS/GMES [Текст] / В.И. Лялько, М.А. Попов // Космічна наука і технологія. – 2008. – Т. 14, № 2. – С. 3-12.
19. Лялько, В.И. Полигоны ДЗЗ Украины и перспективы их использования в системе GEOSS [Текст] / В.И. Лялько, М.А. Попов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2008. – Т. 2, вып. 5. – С. 548-556.
20. Современное состояние и перспективы использования тестовых полигонов ДЗЗ: цели, задачи, принципы и концепции [Текст] / С.В. Абламейко, Б.И. Беляев, Я.И. Зельк, В.Л. Катковский, В.И. Лялько, М.А. Попов, Л.В. Подгородецкая, В.А. Яценко // Пятый белорусский космический конгресс (25-27 октября 2011 г., Минск). Материалы конгресса. – Минск: Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси, 2012. – Т. 1. – С. 172 – 176.
21. Teillet, P.M. Calibration, validation, and quality assurance in remote sensing: A new paradigm [Текст] / P.M. Teillet, D. Horler, N.T. O'Neill // Can. J. Remote Sens. – 1997. – Т. 23, № 4. - С. 401–414.
22. Radiometric calibration of Landsat [Текст] / K.J. Thome, B. Markham, J. Barker, P.N. Slater, S.F. Biggar // Photogramm. Eng. Remote Sens. – 1997. – Т. 63, № 7. - С. 853–858.
23. Questionnaire for information regarding the CEOS WGCV IVOS subgroup Cal/Val test sites for land imager radiometric gain QA-4EO-WGCV-IVO-CSP-001 [Текст]. Ver. 1.1, CEOS, 2009. – 18 с.
24. Questionnaire for information regarding the CEOS WGCV IVOS subgroup Cal/Val test sites for land imager radiometric gain. QA-4EO-WGCV-IVO-CSP-008. Tuz Gölü [Текст]. Ver. 2.0, CEOS, 2009. – 37 с.
25. Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати [Текст] / М.О. Попов, С.А. Станкевич, Я.І. Зєлик, С.В. Шкляр, О.В. Семенів // Космічна наука та технологія. – 2012. – 18, № 5. – С. 59-65.
26. Orfanidis, S.J. Introduction to signal processing [Текст] / S.J. Orfanidis. - Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996. – 798 с.
27. Rabiner, L.R. Theory and application of digital signal processing [Текст] / L.R. Rabiner, B. Gold. - Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975. – 777 с.
28. Створення каталогу тестових об'єктів для калібрування знімальної системи і валідації даних ДЗЗ КА «Січ-2» [Текст] / Я.І. Зєлик, В.Є. Набівач, М.О. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Чорний, В.О. Яценко // «Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки» GEO-UA 2012. Третя Всеукраїнська конференція «GEO-UA». Матеріали доповідей. Євпаторія. АР Крим, Україна, 3-7 вересня 2012 р. – Київ, «Вид-во «Кафедра», 2012. – С. 46 - 49.
29. Оцінювання розрізняювальної здатності систем дистанційного зондування Землі з використанням еталонних знімків на підставі вирішення зворотних задач оптики [Текст] / С.В. Чорний, М.А. Авдєєв, Я.І. Зєлик, О.О. Коваленко // 12-я Украинская конференция по космическим исследованиям. Евпатория, Крым, Украина. 3 - 7 сентября 2012 г. Сборник тезисов. – Киев: ИКИ НАНУ и НКАУ. - С. 88.
30. Розробка методологічного забезпечення калібрування багатоспектральної апаратури дистанційного зондування Землі як складової частини контрольно-калібрувального полігону України [Текст] / С.В. Чорний, М.О. Авдєєв, Я.І. Зєлик, В.О. Яценко, О.В. Семенів, В.І. Лялько, М.О. Попов // 11-я Украинская конференция по космическим исследованиям. Евпатория, Крым, Украина. 29 августа -2 сентября 2011 г. Сборник тезисов. – Киев: ИКИ НАНУ и НКАУ. - С. 85.