

УДК 528.855+835

Создание средств и разработка методик послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения космической системы «Сич»

Я.И. Зельник

Институт космических исследований Национальной академии наук Украины и
Государственного космического агентства Украины

Сформулированы и решены на первом этапе задачи послестартовой калибровки космических оптических средств с использованием впервые создаваемого в Украине контрольно-калибровочного полигона (ККП) в районе расположения НЦУИКС. По результатам проведенных синхронных со спутниковой съемкой наземных измерений спектральных характеристик отражения тестовых объектов (ТО) создан презентационный каталог ТО и геоинформационная база данных, включающая векторные слои полигональных ТО, спутниковые снимки космических систем «Quick Bird-2» и «Сич-2», цифровую модель местности ККП. Определена инфраструктура ККП.

СТВОРЕННЯ ЗАСОБІВ І РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИК ПІСЛЯСТАРТОВОГО КАЛІБРУВАННЯ ОПТИЧНИХ ЗАСОБІВ КОСМІЧНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ КОСМІЧНОЇ СИСТЕМИ «СІЧ», Зельник Я.І. — Сформульовано та вирішено на першому етапі завдання післястартового калібрування космічних оптичних засобів з використанням вперше створюваного в Україні контрольно-калібрувального полігону (ККП) у районі розташування НЦУВКЗ. За результатами проведених синхронних із супутниковою зйомкою наземних вимірювань спектральних характеристик відбиття тестових об'єктів (ТО) створений презентаційний каталог ТО та геоінформаційна база даних, що містить векторні шари полігональних ТО, супутникові знімки космічних систем «Quick Bird-2» і «Січ-2», цифрову модель місцевості ККП. Визначено інфраструктуру ККП.

CREATION OF TOOLS AND DEVELOPMENT OF TECHNIQUES FOR POST-LAUNCH CALIBRATION OF SPACE OPTIC SENSORS OF «SICH» SPACE SYSTEM, by Zyelyk Ya.I. — The problems of the optical satellite-born equipment post launch calibration using for the first time founded in Ukraine calibration test site (CTS) in the area of National Space Center are formulated and in the first stage solved. On the base of the synchronous satellite imagery with ground-based measurements results of the test object (TO) spectral reflectance characteristics the presentation catalog and geoinformational database are created. Database include the polygonal TO vector layers, «Quick Bird-2» and «Sich-2» satellite images, digital model of CTS territory. CTS infrastructure is defined.

Ключевые слова: контрольно-калибровочный полигон; оптические средства космического наблюдения; послестартовая калибровка; космическая система «Сич».

Key words: calibration test site; optical satellite-born equipment; post-launch calibration; «Sich» space system.

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 $[Вт/(м^2 \cdot ср \cdot мкм)]$ (ср — стерадиан — единица измерения телесного угла) с учетом коэффициента прозрачности атмосферы $[1-11, 14, 15, 21, 22]$. 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, Hyperion и др. [5–11, 14, 15, 21, 22, 31, 32]. Потребителям данных этих сенсоров предоставляются 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 [5–11, 14, 15, 21, 22].

Сегодня в мире создаются базовые информационные продукты (БП) ДЗЗ, каждый из которых должен содержать информацию либо 1) о геофизических и биофизических характеристиках, сопоставимую с результатами наземных бесконтактных и контактных измерений, либо информацию 2) об интегральных характеристиках — индексах (например, нормализованный относительный индекс растительности NDVI), полученных на основе результатов дистанционных измерений в различных спектральных каналах [12]. Такого рода характеристики, на которых базируются БП ДЗЗ, называются обобщенными физическими характеристиками и могут быть эффективно использованы для описания состояния дистанционно наблюдаемых объектов. БП ДЗЗ 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) [33], и расширенных и обоснованных в каталоге рабочей группы по информационным системам и сервисам (Working Group on Information Systems and Services (WIGISS)) [13] комитета по спутниковым наблюдениям Земли (Committee on Earth Observation Satellites (CEOS)) [34].

Для адекватной однозначной тематической интерпретации данных космических наблюдений бортовые оптические средства должны регулярно калиброваться по бортовым источникам калибровки или в результате так называемой викарной калибровки [35], которая осуществляется по результатам космической съемки и синхронных с ней наземных измерений характеристик тестовых участков и объектов на контрольно-калибровочных полигонах (ККП) [14, 15].

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. [5–11, 14, 15, 21, 22]) 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].

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 [14, 15, 21, 22].

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

Глобальной целью работ по созданию ККП и связанных с ним последующих научных исследований и опытно-конструкторских работ является создание контрольно-калибровочного обеспечения систем ДЗЗ в Украине на базе разрабатываемых научно обоснованных методик, развернутой наземной ин-

фраструктуры 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 комитет CEOS предоставляет информационные сервисы для калибровки и валидации через информационный портал Cal/Val Portal [36]. 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 поддержки.

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 Национального центра управления и испытаний космических средств (НЦУКС) (г. Евпатория-19). Фрагменты снимков технических площадок 1 и 3 НЦУИКС, на которых предполагается развертывание ККП, отображены на рис. 1 и 2 соответственно. 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.

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 (см. таблицу [37]). Этот набор содержит восемь участков, оборудованных на постоянной основе инструментами, (так называемых LANDNET Sites (см. таблицу [38]) 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 (см. таблицу [37]), 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.

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 ДКА Украины, в спектральном диапазоне 190–1100 нм [25] и в июне 2012 г. — с применением прецизионно полевого спектрометра ASD FieldSpec 3FR в спектральном диапазоне 250–2500 нм.

В качестве тестовых были выбраны естественные и искусственные объекты площадок 1–3 НЦУИКС с протяженными и относительно гомогенными по отражательной способности поверхностями. В GIS-среде созданы векторные слои площадных полигональных областей, соответствующих выбранным тестовым объектам. Схема расположения ТО на территории НЦУИКС, обозначенных соответствующими площадными полигональными областями, отображена на рис. 3: 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 каж-

дого 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. Для дополнительной фильтрации шумов, уменьшения дисперсии оценок и, как результат, — сглаживания зависимостей спектрального коэффициента отражения $\rho(\lambda)$ 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.

Зависимости спектральных коэффициентов отражения ТО НЦУИКС от длины волны, полученные в результате наземных измерений с применением полевого спектрометра ASP-100F, с обозначениями



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

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

кривых, соответствующими перечню объектов в табл. 1, приведены на рис. 4.

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 харак-

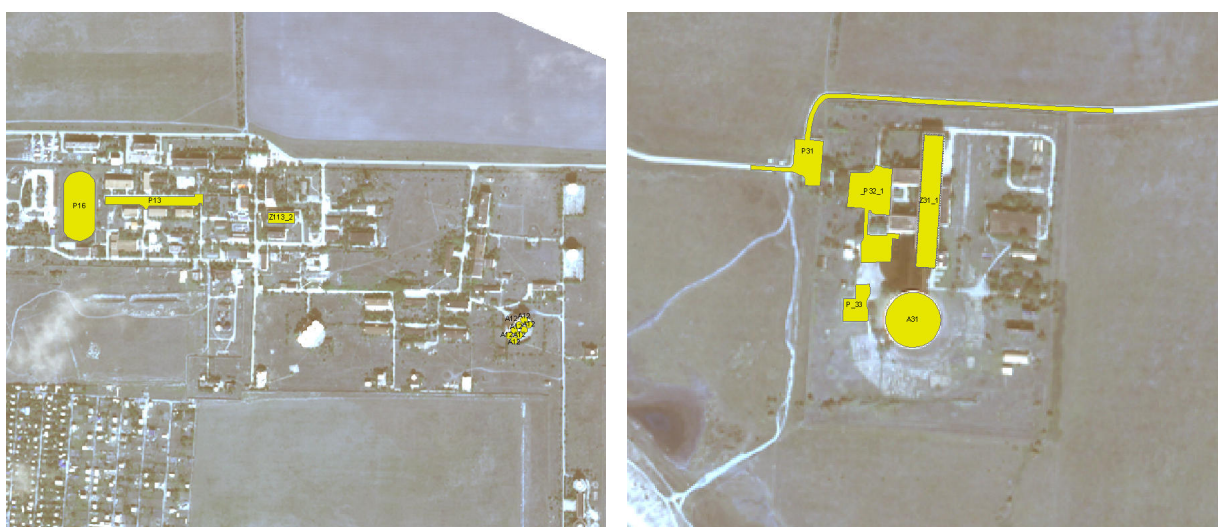


Рис. 3. Схема расположения тестовых объектов на территории НЦУИКС, обозначенных соответствующими площадными полигональными областями: а — на площадке 1, б — на площадке 3

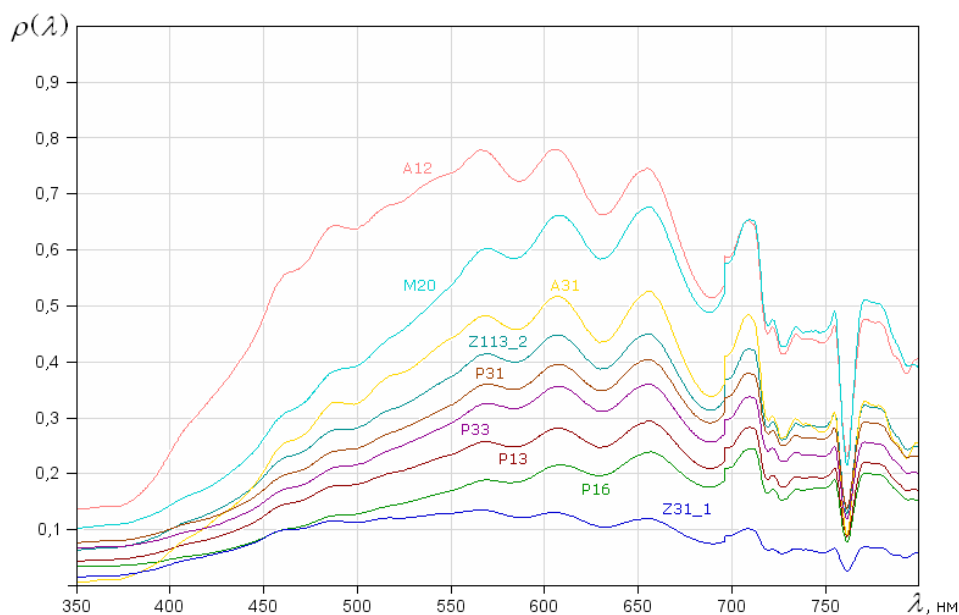


Рис. 4. Зависимости спектральных коэффициентов отражения тестовых объектов НЦУИКС от длины волны на основе наземных измерений с применением полевого спектрометра ASP-100F, с обозначениями кривых, соответствующими перечню объектов в табл. 1

терной 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.

Для хранения и упорядочения накопленных в ходе выполнения проекта данных создается геоинформационная база данных в среде GIS-пакета ArcGis 8.3. (ESRI Inc., <http://www.esri.com/>), 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. При наполнении геоинформационной базы производится импорт и редактирование данных, создаются новые классы пространственных объектов. В качестве атрибутивной информации в базе содержатся сведения о времени, температуре воздуха, давлении, влажности и направлении ветра во время наземных измерений спектральных характеристик отражения выбранных объектов в районе расположения НЦУИКС.

Для обработки проведенных наземных измерений использован формат shape — широко распространенный векторный формат файлов географической информации. Этот формат поддерживается компанией ESRI с целью интероперабельности продуктов компании ESRI с другими программами. Формат shape-файла позволяет сохранять следующие различные типы геометрических объектов: точки, линии, полигоны и др. Отдельный файл может хранить информацию об объектах одного типа. shape-файл — векторный формат для хранения объектов, описываемых геометрией и сопутствующими атрибутами. Из-за своей распространенности формат фактически стал стандартом обмена данными между геоинформационными системами. shapefile — это не один файл, а набор файлов с одинаковыми именами, но разными расширениями. Основой формата являются три обязательных файла: shp, shx и dbf, — и дополнительных sbn, sbx, aih, ain.

При создании векторных слоев для тестовых объектов НЦУИКС (стадиона, крыш зданий, асфальтовых и бетонных площадок, поверхностей зеркал антенных комплексов) в качестве геоинформационного основания использовался снимок КС «Quick Bird-2» субметрового диапазона территории НЦУИКС за 2008 г. Привязка снимка была откорректирована на основе реперных точек, отображенных на рис. 1 и 2, полученных при проведении полевых исследований с помощью системы спутникового позиционирования на предварительном этапе работ. Для природных тестовых объектов в районе НЦУИКС (песчаные и грунтовые берега, водоемы, карьер по добыче ракушечника) в качестве геоинформационного основания для векторизации использованы квазисинхронный с наземными измерениями снимок с КС «Сич-2» от 03.06.2012 г.

В процессе обработки было векторизовано ряд полигональных искусственных и естественных тестовых объектов с различными типами покрытий. Процесс векторизации заключался в оконтуривании на изображении в ручном или автоматическом режиме форм выбранных объектов с точностью до пикселя (0,6 м) и формировании в соответствующих файлах формата shape данных относительно координат узлов полигональных объектов. Среди них, в частности, стадион, крыши зданий, асфальтовые и бетонные площадки, поверхности зеркал антенных комплексов, солончаки, песчаные берега, водоемы, карьер. Изображение векторных слоев полигональных объектов на площадках 1 и 3 НЦУИКС приведено на рис. 3а и 3б соответственно.

Предварительный анализ спутниковых снимков КС «Сич-2» показал недостаточную точность их геопозиционирования. На рис. 5 изображен фрагмент многоспектрального спутникового изображения, синтезированного на основе выполненного многозональным сканирующим устройством КС «Сич-2» снимка от 08.11.2011 г. (являющегося подстилающей поверхностью) с полигональным объектом — соленым озером возле площадки 3 НЦУИКС. Полигональный объект получен в результате классификации изображений на основании точно геопозиционированного снимка КС «Quick-Bird-2» и также имеет точную геопривязку. На подстилающей поверхности — снимке КС «Сич-2» реальный объект — соленое озеро является сдвинутым относительно классифицированного полигонального объекта примерно на 1000 м в направлении на юго-запад. После коррекции геопозиционирования снимка КС «Сич-2» с применением модуля пространственной привязки Georeferencing в среде ArcMap на основе векторного слоя реперных точек, 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» (см. рис. 6).

Заключение. 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 реали-

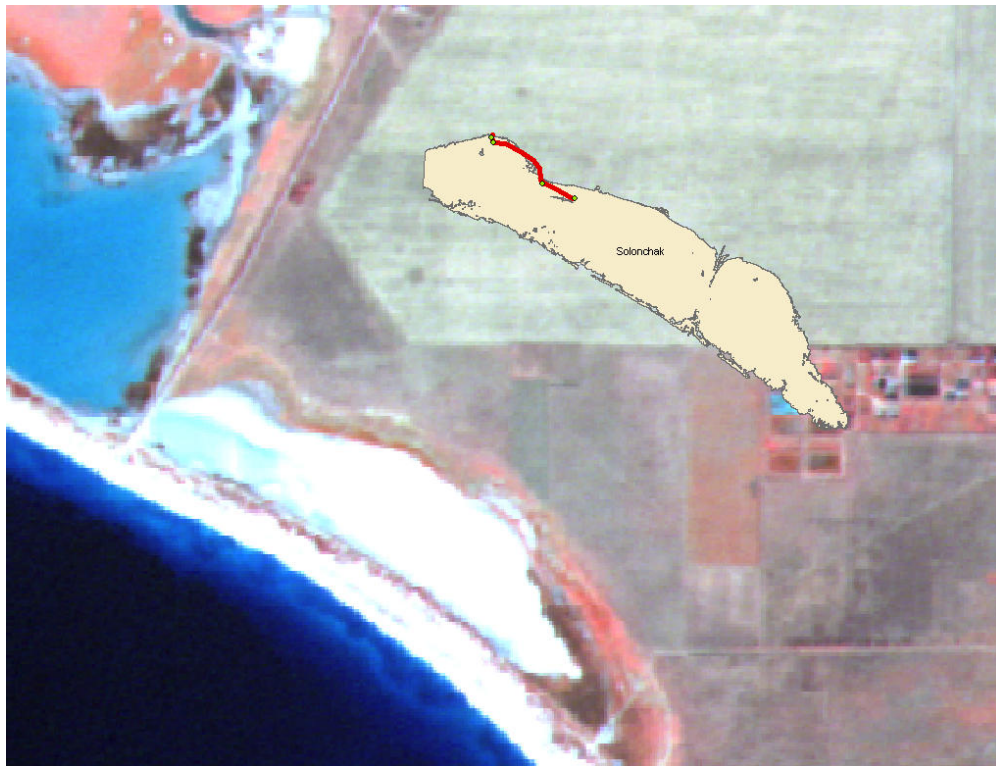


Рис. 5. Фрагмент многоспектрального спутникового изображения (являющегося подстилающей поверхностью), синтезированного на основе снимка, выполненного многозональным сканирующим устройством КС «Сич-2» от 08.11.2011 г. с полигональным объектом — соленым озером возле площадки 3 НЦУИКС



Рис. 6. 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».

зации 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. 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]. 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».

1. Шовенгердт Р.А. Дистанционное зондирование. Методы и модели обработки изображений. — М.: Техносфера, 2010. — 560 с.
2. Назаров А.С. Фотограмметрия. — Минск: ТетраСистемс, 2006. — 368 с.
3. Беляев Б.И., Катковский Л.В. Оптическое дистанционное зондирование. — Минск: БГУ, 2006. — 455 с.
4. Железняк О.О., Чубко Л.С. Космічна фотограмметрія. — К.: НАУ, 2012. — 220 с.
5. Chander G., Markham B.L. Revised Landsat-5 TM Radiometric Calibration Procedures and Postcalibration Dynamic Ranges // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. — 2003. — **41**, № 11. — P. 2674–2677.
6. Chander G., Markham B. Revised Landsat-5 Thematic Mapper Radiometric Calibration // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. — 2007. — **4**, № 3. — P. 490–494.
7. Teillet P.M., Barker J.L., Markham B.L., Irish R.R., Fedosejevs G., Storey J.C. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets // Remote Sensing of Environment. — 2001. — **78**. — P. 39–54.
8. Thome K.J. Absolute radiometric calibration of Landsat 7 ETM+ using the reflectance-based method // Remote Sensing of Environment. — 2001. — **78**. — P. 27–38.
9. Chander G., Markham B.L., Helder D.L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. — 2009. — **113**. — № 5. — P. 893–903.
10. Gurol S., Ozen H., Leloglu U. M., Tunali E. Tuz Golu: New Absolute Radiometric Calibration Test Site / The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B1. Beijing 2008. — P. 35–40.
11. Czaplá-Myers J.S., Thome K.J., Cocilovo B.R., McCorkel J.T., Buchanan J.H. Temporal, spectral, and spatial study of the automated vicarious calibration test site at Railroad Valley, Nevada / Proc. of SPIE Vol. 7081 70810I-1. 2008 SPIE Digital Library. — 9 p. (<http://144.206.159.178/ft/CONF/16420331/16420348.pdf>).
12. Лупян Е.А., Саворский В.П. Базовые продукты обработки данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2012. — **9**. — № 2. — С. 87–96.
13. Interoperable Catalogue System — Valids CEOS/WGISS/ICS/Valids, Issue 1.2, April 2005, 55 p.
14. Slater P.N., Biggar S.F., Holm R.G., Jackson R.D., Mao Y., Moran M.S., Palmer J.M., Yuan B. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors // Remote Sens. Environ. — **1987**. — **22**. — P. 11–37.
15. Biggar S.F., Thome K.J., Wisniewski W. Vicarious Radiometric Calibration of EO-1 Sensors by Reference to High-Reflectance Ground Targets // IEEE Transactions on geosciences and remote sensing. — 2003. — **41**, № 6. — P. 1174–1179.
16. Космічна система «Січ-2»: завдання та напрями використання. — Київ: Державне космічне агентство України, 2012. — 48 с.
17. Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року. — Київ: Державне космічне агентство України, 2012. — 48 с.
18. Лялько В.И., Попов М.А. Полигоны ДЗЗ в Украине как элемент глобальной системы GEOSS/GMES // Космічна наука і технологія. — 2008. — **14**, № 2. — С. 3–12.
19. Лялько В.И., Попов М.А. Полигоны ДЗЗ Украины и перспективы их использования в системе GEOSS // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. — 2008. — **2**, Вып. 5. — С. 548–556.

20. Абламейко С.В., Беляев Б.И., Зельк Я.И., Катковский В.Л., Лялько В.И., Попов М.А., Подгородецкая Л.В., Яценко В.А. Современное состояние и перспективы использования тестовых полигонов ДЗЗ: цели, задачи, принципы и концепции // 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., Horler D., O'Neill N.T. Calibration, validation, and quality assurance in remote sensing: A new paradigm // Can. J. Remote Sens. — 1997. — **23**, № 4. — P. 401–414.
22. Thome K.J., Markham B., Barker J., Slater P.N., Biggar S.F. Radiometric calibration of Landsat // Photogramm. Eng. Remote Sens. — 1997. — **63**, № 7. — P. 853–858.
23. Questionnaire for information regarding the CEOS WGCV IVOS subgroup Cal/Val test sites for land imager radiometric gain QA4EO-WGCV-IVO-CSP-001. Version 1.1, CEOS, 2009. — 18 p.
24. Questionnaire for information regarding the CEOS WGCV IVOS subgroup Cal/Val test sites for land imager radiometric gain. QA4EO-WGCV-IVO-CSP-008. Tuz Gölü. Ver. 2.0, 2009. — 37 p.
25. Попов М.О., Станкевич С.А., Зелик Я.І., Шкляр С.В., Семенів О.В. Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати // Космічна наука та технологія. — 2012. — **18**, № 5. — С. 59–65.
26. Orfanidis S.J. Introduction to Signal Processing. — Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1996. — 798 p.
27. Rabiner L.R., Gold B. Theory and Application of Digital Signal Processing. — Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1975. — 777 p.
28. Зелик Я.І., Набівач В.Є., Попов М.О., Станкевич С.А., Чорний С.В., Яценко В.О. Створення каталогу тестових об'єктів для калібрування знімальної системи і валідації даних ДЗЗ КА «Січ-2» // «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, «Видавництво «Кафедра», 2012. — С. 46–49.
29. Чорний С.В., Авдєєв М.А., Зелик Я.І., Коваленко О.О. Оцінювання розрізняювальної здатності систем дистанційного зондування Землі з використанням еталонних знімків на підставі вирішення зворотних задач оптики // 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. Чорний С.В., Авдєєв М.О., Зелик Я.І., Яценко В.О., Семенів О.В., Лялько В.І., Попов М.О. Розробка методологічного забезпечення калібрування багатоспектральної апаратури дистанційного зондування Землі як складової частини контрольно-калібрувального полігону України // 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.
31. http://www.racurs.ru/www_download/articles/IKONOS.pdf
32. <http://www.agu.org/cgi-in/SFgate/SFgate?&listenenv=table&multiple=1&ange=1&directget=1&application=fm06&database=%2Fdata%2Fepubs%2Fwais%2Findexes%2Ffm06%2Ffm06&maxhits=200&=%22B41A-0167%22>
33. <http://earthdata.nasa.gov/data/standards-and-references/processing-levels>
34. <http://www.ceos.org/>
35. <http://www.ncaveo.ac.uk/calibration/radiometry/in-flight>
36. <http://calvalportal.ceos.org>
37. http://calval.cr.usgs.gov/sites_catalog_ceos_sites.php#CEOS
38. <http://calvalportal.ceos.org/cvp/web/guest/ceos-landnet-sites>

Поступила в редакцию 31.06.2013