

**ОТБОР УЧАСТКОВ ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ ДЛЯ ПОСЛЕСТАРТОВОЙ
РАДИОМЕТРИЧЕСКОЙ КАЛИБРОВКИ
СПУТНИКОВЫХ ОПТИКО-ЭЛЕКТРОННЫХ
СЕНСОРОВ НАБЛЮДЕНИЯ ЗЕМЛИ**

Введение. Актуальность послестартовой радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров в Украине и научный задел авторов

В рамках реализации общегосударственных целевых научно-технических космических программ Украины в 2011–2014 гг. в Институте космических исследований (ИКИ) НАН Украины и ГКА Украины выполнен цикл научно-исследовательских работ по разработке научно-методического обеспечения и созданию средств калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров с использованием контрольно-калибровочного полигона на базе компактно размещенных тестовых объектов на территории Национального центра управления и испытаний космических средств в АР Крым.

Необходимость продолжения такого рода работ обусловлена тем, что в настоящее время в мире на современный рынок продукции космического наблюдения компаниями и операторами космических систем предоставляются не просто высококачественные космические снимки, а калиброванные базовые продукты (БП) обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), основанные на данных обработки высших уровней по сравнению с сырыми данными космических снимков. БП ДЗЗ должны создаваться на основе существующих в мировой практике систем классификации данных ДЗЗ, называемых иначе уровнями обработки данных, предложенных NASA при создании системы Earth Observing System Data and Information System (EOSDIS) [1], расширенных и обоснованных в каталоге рабочей группы по информационным системам и сервисам (Working Group on Information Systems and Services — WIGIS) комитета по спутниковым наблюдениям Земли (Committee on Earth Observation Satellites — CEOS) [2]. Базовые продукты являются наборами данных, выраженными в абсолютных физических единицах, точно привязанными во времени и пространстве к наблюдаемым объектам и получаемыми с помощью регулярно калиброванных в полете спутниковых оптико-электронных сенсоров ДЗЗ.

До настоящего времени в Украине послестартовая калибровка спутниковых оптико-электронных сенсоров не проводилась. В частности, в космической системе (КС) «Січ-2» калибровка съемочной системы не была предусмотрена конструктивно и технологически. Поэтому с применением некалиброванных спутниковых оптико-электронных сенсоров наблюдения Земли в Украине не могли быть созданы базовые продукты данных, конкурентоспособные на международном рынке продуктов и услуг ДЗЗ.

Цель научно-исследовательских работ, выполняемых в направлении послестартовой калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров ДЗЗ, — обеспечение достоверности и повышение точности данных дистанционного зондирования Земли путем метрологической поддержки, в частности калибровки, спутниковых оптико-электронных сенсоров на стадии полета на базе наземной инфраструктуры контрольно-калибровочных полигонов, разрабатываемого научно-методического обеспечения и программно-аппаратных комплексов.

© Я.И. ЗЕЛЫК, С.В. ЧЕРНЫЙ, Л.В. ПОДГОРОДЕЦКАЯ, 2018

Основные научные и практические результаты, полученные авторами в области послестартовой калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров ДЗЗ, опубликованы в работах [3–10]. Они касаются разработки научно обоснованных методик: определение пространственного разрешения на местности и спектральной чувствительности спутниковых оптико-электронных сенсоров на стадии полета, послестартовой радиометрической калибровки сенсора по наблюдаемым тестовым участкам земной поверхности, его перекрестной радиометрической калибровки по данным ДЗЗ существующих космических систем (без использования оборудованных полигонов), атмосферной коррекции по данным всемирной сети AERONET, полевых и аналитических (по архивным данным ДЗЗ) спектральных исследований тестовых объектов. Обоснована инфраструктура контрольно-калибровочных полигонов, созданы прототипы базы данных и геоинформационной системы полигонов; разработаны модули программного обеспечения реализации методик оценки и калибровки характеристик сенсора на стадии полета.

В связи с невозможностью использования компактно размещенных калибровочных участков на территории АР Крым и необходимостью выполнения различных типов послестартовой калибровки спутниковых сенсоров наблюдения Земли (что невозможно осуществить на отдельном полигоне) предложено создание территориально распределенной сети контрольно-калибровочных полигонов на материковой части Украины. Сеть должна содержать полигоны для осуществления таких типов калибровки и оценки характеристик спутниковых оптико-электронных сенсоров на стадии полета: радиометрическая калибровка; определение спектральной чувствительности и границ спектральных диапазонов каналов; оценка пространственного разрешения на местности.

На создаваемой территориально распределенной сети контрольно-калибровочных полигонов по разработанным методикам будет обеспечено на стадии полета в каждом спектральном диапазоне статистически достоверное определение калибровочных коэффициентов усиления и смещения спутникового оптико-электронного сенсора, значения которых будут приведены в файле калибровочных параметров. По определенным калибровочным коэффициентам будет получен статистически достоверный базовый продукт спутниковых данных уровня обработки 1В — спектральная энергетическая яркость принятого излучения на апертуре спутникового сенсора. Этот калиброванный базовый продукт обработки спутниковых данных и производные от него продукты могут быть представлены на международном рынке продуктов ДЗЗ.

Проведение указанных научных исследований и практических работ необходимо, прежде всего, при создании в Украине наземных средств контроля характеристик космических систем «Січ-2-1», «Січ-2М», которые будут эффективно использоваться при выполнении мероприятий по мониторингу окружающей среды в рамках общегосударственных целевых научно-технических космических программ Украины.

1. Требования к тестовым объектам контрольно-калибровочного полигона, которые обеспечивают корректные условия и достаточную точность калибровки

При формулировании требований к тестовым объектам (ТО) на территории Украины для послестартовой радиометрической калибровки оптико-электронных сенсоров следует учитывать опыт организации полигонов системы LANDNET Sites комитета CEOS, в которой каждый полигон — это отдельный тестовый участок (один тестовый объект с линейными размерами от сотен метров до нескольких километров), оборудованный на постоянной основе соответствующими наземными измерительными устройствами [11]. Кроме того, целесообразно при-

нимать во внимание опыт использования комитетом СЕОС в качестве калибровочных так называемых естественных псевдоинвариантных участков большой площади, которые имеют высокую спектральную отражательную способность, гомогенную в определенном диапазоне спектра, и характеризуются низким содержанием аэрозолей над ними [12]. Последние могут использоваться для оценки долгосрочной стабильности оптических сенсоров и перекрестного сравнения их характеристик.

С учетом этого опыта, а также на основании результатов экспериментальной проверки разработанных в ИКИ НАН Украины и ГКА Украины методик послестартовой радиометрической калибровки и определения пространственного разрешения на местности можно сформулировать следующие требования к ТО контрольно-калибровочных полигонов.

1. ТО должны иметь существенную отражательную способность с величиной спектрального коэффициента отражения не менее 0,3 во всех спектральных диапазонах.

2. Для описания отражательной способности поверхности ТО с достаточной точностью можно применить модель отражения излучения Ламберта [13, 14] (яркость отраженного излучения от диффузной поверхности с моделью отражения излучения Ламберта одинакова во всех направлениях).

3. Спектральные характеристики отражающих поверхностей ТО должны быть гомогенными в пространстве и стабильными во времени.

4. Функция распределения значений коэффициента отражения ТО по спектру должна быть в пределах всего спектрального диапазона достаточно равномерной, без резких перепадов.

5. При реализации методики определения пространственного разрешения на местности необходимо иметь значительный набор эталонных изображений ТО с пространственным разрешением $\sim 0,1$ м (например, аэрофотоснимков высокого разрешения).

6. При статистической оценке точности методики определения пространственного разрешения оптико-электронного сенсора на местности оценивание следует проводить не менее, чем для 10 ТО.

7. Для выбранного ТО пространственное разрешение по эталонным снимкам должно быть примерно в три раза выше, чем заданная погрешность определения пространственного разрешения по спутниковым снимкам с помощью сенсора, который калибруется.

8. При реализации методики радиометрической калибровки спектральных каналов ТО следует выбирать пространственно гомогенным по спектральному коэффициенту отражения поверхности, и по линейным размерам поверхность ТО должна превышать текущее значение пространственного разрешения калиброванного спутникового сенсора минимум в 10 раз.





2. Поиск участков на территории Украины, пригодных для послестартовой радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров







По данным спутниковых снимков и карт Google проведен поиск участков на территории Украины, потенциально пригодных для послестартовой радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров, в частности, в Хмельницкой, Черновицкой, Житомирской, Днепропетровской, Запорожской, Херсонской областях. Общим критерием поиска по данным спутниковых снимков и карт Google было наличие на территории пространственно однородного участка по спектральному коэффициенту отражения с линейными размерами не менее 10×10 наземных интервалов дискретизации оптико-электронного сенсора, что



соответствует размерам участка 10×10 пикселей на спутниковом снимке. В частности, для пространственного разрешения на местности многоспектральных оптико-электронных сенсоров КС «Січ-2» и «Січ-2-1», которое составляет 7,8 м, достаточный линейный размер ТО для радиометрической калибровки должен превышать 78 м.

В табл. 1 отображены участки — потенциальные кандидаты на тестовые объекты распределенного контрольно-калибровочного полигона в указанных областях Украины. Это каменные, титановые, кварцитовые карьеры, песчаная пустыня, соляные озера, природные протяженные образования, которые, благодаря стабильности во времени и гомогенности в пространстве спектральных коэффициентов отражения, можно отнести к псевдоинвариантным (по терминологии комитета CEOS) тестовым участкам.

Таблица 1

№ п/п	Название объекта	Координаты и ориентировочные размеры однородного участка	Изображение объекта
1	2	3	4
1	Карьер ПАО «Подольский цемент», Хмельницкая обл.	48,771523 с.ш., 26,644769 в.д. (640×1060) м	
2	Титановый карьер Лесовщина, Житомирская обл.	50,775048 с.ш., 28,526220 в.д. (570×1160) м	
3	Олешковские пески, Херсонская обл.	46,2299655 с.ш., 33,8689613 в.д. (2000×4000) м	
1	2	3	4
4	Озеро Соляное, Херсонская обл.	46,1256937 с.ш., 34,2173481 в.д. (1000×800) м	

5	Отстойник титанового завода, Херсонская обл.	46,2299655 с.ш., 33,8689613 в.д. (6000×10000) м	
6	Заповедник Аскания-Нова, Херсонская обл.	46,464913 с.ш., 33,980986 в.д. (2000×2000) м	
7	Вольногорское горное месторождение, Днепропетровская обл.	48,502366 с.ш., 34,074887 в.д. (900×1000) м	
8	Тендровская коса, Херсонская обл.	46,342288 с.ш., 31,522253 в.д. (200×2000) м	
9	Кривой Рог 1, карьер Южный, Днепропетровская обл.	47,929121 с.ш., 33,373456 в.д. (900×1300) м	
10	Кривой Рог 2, карьер № 2-бис, Днепропетровская обл.	47,841467 с.ш., 33,310302 в.д. (1000×1000) м	
1	2	3	4

11	Кривой Рог 3, Карьер № 3-бис, Днепропетровская обл.	47,840454 с.ш., 33,308757 в.д. (1500×1800) м	
12	Орджоникидзе, карьер, Днепропетровская обл.	47,686887 с.ш., 34,229101 в.д. (900×3500) м	

3. Исследования спектральных характеристик отражения отобранных тестовых участков

Исследования спектральных характеристик отражения тестовых участков на территории Украины, потенциально пригодных для послестартовой радиометрической калибровки, осуществлялись по архивным данным спутниковых снимков КС Landsat 5ТМ и Landsat-7 ЕТМ+ (на время проведения исследований архивные данные КС Landsat-8 отсутствовали), для которых выполнена атмосферная коррекция. Это данные спектральной отражательной способности поверхности Земли (Surface Reflectance Data) из архива записей данных климата (Climate Data Records — CDRs) Геологической службы США (U.S. Geological Survey — USGS) [15, 16].

В архиве данных Landsat CDRs интерес представляют данные спектральной отражательной способности поверхности Земли — продукта обработки данных уровня 2 всех миссий Landsat (или, другими словами, непрерывной миссии Landsat), полученные в течение более 40 лет. Кроме того, в архиве данных Landsat CDRs имеются и производные от спектральной отражательной способности продукты, выше уровня обработки 2, в частности, различные вегетационные, водные и другие индексы, результаты математического моделирования на регулярной геопространственной сетке, в частности, глобальных изменений климата и т.д. [17]. Данные спектральной отражательной способности поверхности Земли для выбранного множества сцен, содержащих ТО, могут быть заказаны пользователем из архива Landsat CDRs с использованием специального браузера EarthExplorer на сайте [18] при задании конкретных условий поиска, среди которых, в частности, — период съемки и координаты характерных точек участка. Кроме того, участок местности, для которого заказываются спутниковые снимки, может быть задан как набор векторных данных (полигон) путем оконтуривания его пользователем на подстилающей поверхности в окне браузера EarthExplorer.

Поскольку данные Landsat 7 ЕТМ+ имели значительные потери на изображениях вследствие нестабильной работы аппаратуры, а на время проведения описанных в этой статье исследований для КС Landsat 8 атмосферная коррекция не выполнялась и его данные в архиве CDRs USGS отсутствовали, то для исследований авторами использовались лишь данные КС Landsat 5 ТМ. Спектральные каналы сенсоров КС Landsat 5 ТМ хорошо согласуются с соответствующими спектральными каналами многоспектрального сенсора КС «Січ-2» МСУ (табл. 2).

Таблица 2

КС Landsat 5 TM			КС «СПЧ-2» МСУ			
Канал	Диапазон, мкм	Разрешение, м	Канал	Сокращенное название	Диапазон, мкм	Разрешение, м
B1	0,45–0,52	30				
B2	0,52–0,60	30	B1	G	0,50–0,59	8,20
B3	0,63–0,69	30	B2	R	0,61–0,68	8,20
B4	0,76–0,90	30	B3	I	0,79–0,89	8,20
B5	1,55–1,75	30		SWIR	1,55–1,7	41,40
B7	2,08–2,35	30				
B2+B3+B4		30	B4	PAN	0,50–0,90	8,20
B6	10,40–12,50	120 (30)				

Предложена методика спектральных исследований ТО на основе архивных спутниковых данных Landsat CDRs, которая реализуется следующим образом.

— Формирование заказа и получение спутниковых изображений из архива Landsat CDRs в значениях спектральной отражательной способности (спектрального коэффициента отражения) поверхности Земли с учетом атмосферной коррекции на момент съемки для заданного района.

— Поиск и выделение на спутниковом изображении соответствующего ТО.

— Расчет статистических характеристик однородности спектрального коэффициента отражения тестового объекта (среднего значения, среднего квадратического отклонения и плотности распределения вероятности) в каждом из шести спектральных каналов Landsat 5 TM.

Характеристики данных спектральных коэффициентов отражения земной поверхности, предоставляемых из архива Landsat CDRs, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Название данных	Канал	Тип данных	Содержание данных	Диапазон значений	Приведенный динамический диапазон	Масштабный множитель
sr_band1	Band 1	INT16	Коэффициент отражения	– 2000 – 16000	0 – 10000	0,0001
sr_band2	Band 2	INT16	Коэффициент отражения	– 2000 – 16000	0 – 10000	0,0001
sr_band3	Band 3	INT16	Коэффициент отражения	– 2000 – 16000	0 – 10000	0,0001
sr_band4	Band 4	INT16	Коэффициент отражения	– 2000 – 16000	0 – 10000	0,0001
sr_band5	Band 5	INT16	Коэффициент отражения	– 2000 – 16000	0 – 10000	0,0001
sr_band7	Band 7	INT16	Коэффициент отражения	– 2000 – 16000	0 – 10000	0,0001

Полученные из архива Landsat CDRs данные для определения спектральных коэффициентов отражения нуждаются в дополнительной обработке для их приведения от динамического диапазона [0, 10000], удобного для хранения в архиве, к динамическому диапазону реальных коэффициентов отражения земной поверхности [0, 1] в спектральных каналах. Для выполнения преобразований масштаба данных, вычисления спектральных коэффициентов отражения и статистических расчетов на основе архивных спутниковых данных созданы программные модули.

Они позволяют рассчитать средние значения, среднеквадратичные отклонения спектрального коэффициента отражения в каналах в пределах выбранного для исследования участка, а также плотности распределения вероятности значений коэффициента отражения в каждом из шести спектральных каналов (1–5,7) сенсора КС Landsat 5 ТМ по данным статистических исследований, построить соответствующие графики и выдать информацию в файлах. Для каждого выбранного ТО в каждом спектральном канале указанные статистические характеристики вычислялись на основании каждого спутникового снимка, содержащего указанный ТО, а затем усреднялись по серии доступных спутниковых снимков участка земной поверхности с указанным ТО.

Для ТО Титановый карьер Лесовщина (50,775048 с.ш., 28,526220 в.д. (570×1160) м), отображенного в табл. 1, строка 2, результаты расчета средних значений и среднеквадратичных отклонений коэффициентов отражения в спектральных каналах сенсора КС Landsat 5 ТМ приведены в табл. 4.

Таблица 4

Название данных	Спектральный диапазон, мкм	Коэффициент отражения	СКО коэффициента отражения
sr_band1	0,45–0,52	0,215586	0,002376
sr_band2	0,52–0,60	0,265618	0,004578
sr_band3	0,63–0,69	0,291518	0,005805
sr_band4	0,76–0,90	0,291518	0,005805
sr_band5	1,55–1,75	0,339402	0,005829
sr_band7	2,08–2,35	0,352877	0,006112

Конечная цель исследований спектральных характеристик тестовых объектов по архивным спутниковым данным — определение среди них перечня пригодных для послестартовой радиометрической калибровки оптико-электронных сенсоров, которые могут обеспечить в каждом спектральном канале сенсора, который калибруют, максимальный динамический диапазон спектрального коэффициента отражения земной поверхности. В результате поиска данных объектов в архиве Landsat CDRs в условиях безоблачности в летний период получены и обработаны соответствующие данные для таких тестовых объектов, отображенных в табл. 1: 2) Титановый карьер Лесовщина; 3) Олешковские пески; 8) Тендровская коса; 9) Кривой Рог 1, карьер Южный; 10) Кривой Рог 2, карьер № 2-бис.; 11) Кривой Рог 3, карьер № 3-бис.; 12) Орджоникидзе, карьер, — и для сравнения с ними — ТО с полигонов системы LANDNET Sites комитета CEOS — озера Туз Гулу (Tuz Gölü) [11, 12, 19, 20]. Графики спектральных коэффициентов отражения в зависимости от номера спектрального канала сенсора для указанных объектов приведены на рис. 1. Номер канала 6 (на графике) соответствует спектральному диапазону В7 сенсора КС Landsat 5 ТМ.

Сравнительный анализ спектральных коэффициентов отражения объектов на территории Украины показывает, что наибольшую отражательную способность имеет объект 8 Тендровская коса, наименьшую отражательную способность имеют объекты 9–11 (Кривой Рог 1–3). Спектральный коэффициент отражения ТО озеро Туз Гулу в каналах 2, 3, 4 на графике (им соответствуют каналы В2, В3, В4 сенсора КС Landsat 5 ТМ и каналы G, R, I сенсора КС «Січ-2» МСУ, см. табл. 2) на 5 % больше, чем объекта Тендровская коса, однако в канале 5 на графике (ему соответствует канал В5 сенсора КС Landsat 5 ТМ и канал SWIR сенсора КС «Січ-2» МСУ, см. табл. 2) спектральный коэффициент отражения ТО озеро Туз Гулу вдвое меньше, чем объекта Тендровская коса.

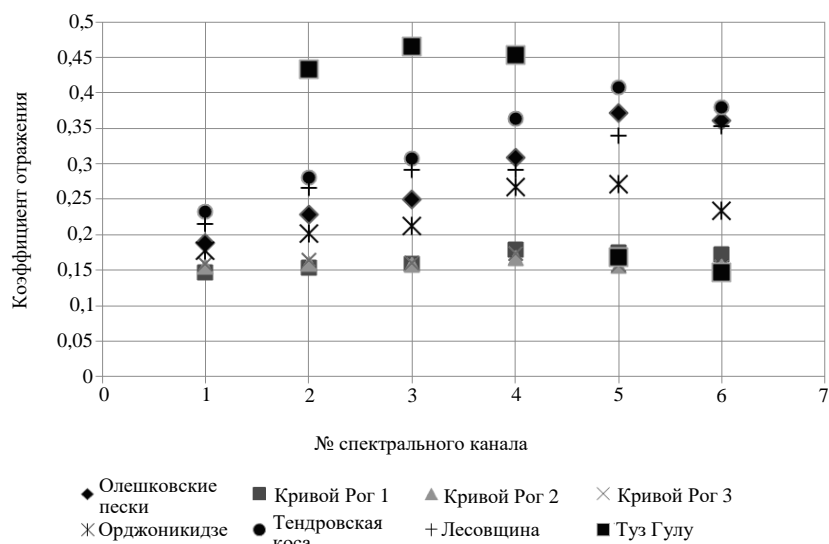


Рис. 1

Следовательно, для послестартовой радиометрической калибровки можно рекомендовать следующие ТО: самые яркие — Тендровская коса и Олешковские пески; средней яркости — Орджоникидзе, карьер; низкой яркости — Кривой Рог 2, карьер № 2-бис.

Таким образом, предложенная и реализованная методика спектральных исследований ТО с использованием архивных данных Landsat CDRs позволяет проводить исследования и, по крайней мере, предварительный отбор ТО для радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров ДЗЗ на больших по размеру участках земной поверхности без проведения наземных измерений. Выбранные в ходе исследования ТО на территории Украины имеют максимальные значения коэффициентов отражения в динамическом диапазоне [0,28; 0,4] в спектральных каналах оптико-электронного сенсора и позволяют проводить, таким образом, калибровку в ограниченном (0–40 %) динамическом диапазоне спектральных коэффициентов отражения в каналах оптико-электронных сенсоров КС «Січ-2», «Січ-2-1». Однако для природных ТО это хороший результат, поскольку самый яркий ТО для радиометрической калибровки — соленое озеро Туз Гулу системы LANDNET Sites комитета CEOS позволяет осуществлять калибровку оптико-электронных сенсоров в спектральных диапазонах КС «Січ-2», «Січ-2-1» только в пределах 0–45 %.

На отобранных в ходе спектральных исследований по архивным спутниковым данным ТО, пригодных для послестартовой радиометрической калибровки оптико-электронных сенсоров, могут быть организованы точные наземные спектрометрические измерения подобно тому, как это было указано в [3–5], результаты которых могут быть внесены в создаваемую геоинформационную базу данных распределенного контрольно-калибровочного полигона [6, 7].

4. Создание геоинформационного слоя тестовых участков распределенного контрольно-калибровочного полигона на территории Украины

Процесс векторизации выбранных участков предусматривает создание полигонального шейп-файла средствами любой доступной программной геоинформационной среды, в частности геоинформационной среды ArcGIS для обработки геоинформационных данных [21–23]. За основу берутся спутниковые изображения территории высокого или среднего пространственного разрешения.

В данной работе в качестве основы для векторизованного представления в среде ArcGIS 9.0 [22, 23] потенциальных тестовых участков распределенного калибровочного полигона использованы снимки территории Украины опико-электронными сенсорами КС Landsat 8 OLI и «Січ-2». В зависимости от типа участка выбирается способ векторизации. В частности, в ручном режиме оцифровываются объекты правильной формы, как правило, антропогенного происхождения (отстойник титанового завода, заповедник и т.д.). Природные же объекты требуют более объективного и точного подхода. В частности, природные образования с условно гомогенным покрытием можно выделить путем предварительной классификации панхроматического изображения и последующей автоматической векторизации полученного результата классификации. На рис. 2 отображены этапы создания полигонального объекта геоинформационного слоя тестовых участков распределенного контрольно-калибровочного полигона на основе панхроматического изображения (ТО — Тендровская коса, Херсонская обл.).

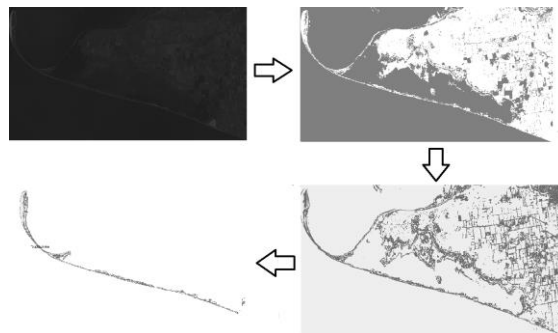


Рис. 2

После этого векторный слой редактируется путем удаления ненужных полигонов. Таким образом было векторизовано изображение ТО Тендровская коса (Херсонская обл.) — природного узкого протяженного объекта с преимущественно песчаным типом поверхности. Именно протяженность и неравномерность формы делает невозможным использование ручных инструментов векторизации. Для классификации использовалось панхроматическое изображение, полученное сенсором КС Landsat 8 OLI: канал 8 с пространственным разрешением 15 м. К области интереса — выделенной части снимка с изображением песчаной косы, была применена процедура классификации пикселей изображения без обучения по алгоритму ISODATA (Итерационная самоорганизующаяся методика анализа данных — Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique, ISODATA) в среде ERDAS IMAGINE [24, 25] с разделением на два класса. Применение такой процедуры классификации позволило получить растровое изображение исследуемой территории с разделением на два класса: «вода» и «суша». Дальнейшие действия после процедуры векторизации полученного растра позволяют автоматически отбросить объекты класса «вода» и в ручном режиме удалить ненужные полигональные объекты класса «суша» — часть изображения материковой суши.

Аналогичным образом обработаны спутниковые изображения каменных карьеров западного и северного региона Украины на основе съемки опико-электронным сенсором КС «Січ-2». В этом случае в качестве основы для векторизации использовалось композитное псевдоцветное изображение, полученное путем RGB-синтеза монохромных изображений в трех каналах сенсора (зеленый/красный/ближний инфракрасный (Green/Red/Infrared — GRI)) с пространственным разрешением 8,4 м, которое, учитывая высокую яркость выработок каменных карьеров, позволяет с высокой точностью локализовать контуры объекта. На примере снимка сенсором КС «Січ-2» ТО — каменного карьера ПАО «Подольский цемент» — этапы реализации этой процедуры отражены на рис. 3.

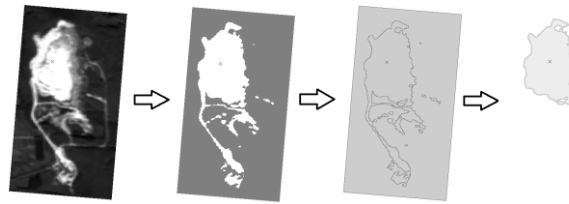


Рис. 3

На рис. 3 отображены этапы создания полигонального объекта геоинформационного слоя тестовых участков распределенного подспутникового полигона на основе композитного изображения (на примере снимка сенсором КС «Січ-2» каменного карьера ОАО «Подольский цемент»).

Другого подхода требует создание тестового полигонального объекта заповедных территорий. В первую очередь, возникает необходимость использования достоверной картографической основы. Функциональные зоны биосферного заповедника Аскания-Нова им. Ф.Э. Фальц-Фейна отражены на рис. 4.

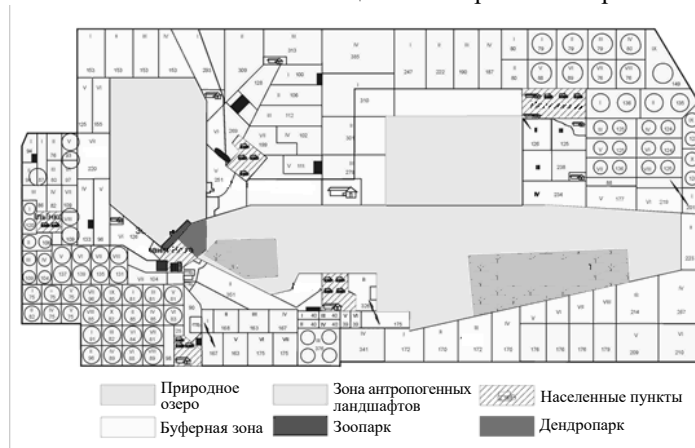


Рис. 4

Результаты нанесения контуров заповедника, которые выделяют относительно однородные в пространстве по спектрам отражения участки, с использованием снимка КС Landsat 8 OLI в качестве подстилающей поверхности отображены на рис. 5.



Рис. 5

Векторизацию такого рода объектов целесообразно осуществлять в ручном режиме, так как классификация изображения с последующей его векторизацией в автоматическом режиме не даст ожидаемого результата. Это объясняется тем, что такого рода участки разнородные и, кроме природных территорий, содержат антропогенные ландшафты — населенные пункты, сельскохозяйственные угодья и т.п.

В общем, тестовые участки распределенного контрольно-калибровочного полигона, большая часть которых представлена в табл. 1, можно разделить по местонахождению — северный, южный и западный регионы Украины. На рис. 6 отображены в виде слоя более темных векторизованных полигональных объектов на фоне земной поверхности региона в геоинформационной системе тестовые участки распределенного контрольно-калибровочного полигона южного региона, а на рис. 7 — западного региона Украины соответственно.

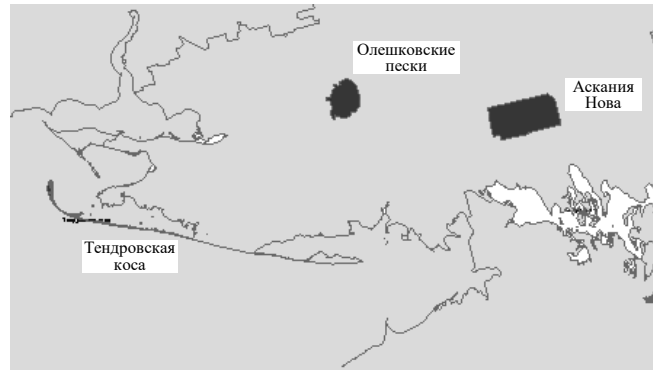


Рис. 6



Рис. 7

Заключение

Сформулированы требования к тестовым объектам распределенного контрольно-калибровочного полигона, которые обеспечивают корректные условия и достаточную точность калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров наблюдения Земли. Ключевыми из них являются следующие: 1) пространственная гомогенность отражательной способности тестовых участков со значениями спектрального коэффициента отражения большими, чем 0,3; 2) тестовые участки должны превышать по линейным размерам текущее значение пространственного разрешения на местности калибруемого сенсора минимум в 10 раз.

На основе сформулированных требований проведен поиск, выполнены спектральные исследования и осуществлен отбор пригодных для калибровки тестовых объектов на территории Украины в Хмельницкой, Черновицкой, Житомирской, Днепропетровской, Запорожской, Херсонской областях с использованием архивных данных КС «Січ-2» и архива записей данных климата (Climate Data Records) Географической службы США (US Geological Survey).

Предложена и реализована методика спектральных исследований по архивным спутниковым данным и отбора тестовых объектов, пригодных для послестартовой радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров наблюдения Земли, основанная на анализе коэффициента отражения тестового участка во всех спектральных каналах калибруемого спутникового сенсора. Пригодными для послестартовой радиометрической калибровки являются протяженные участки, которые по линейному размеру превышают наземный интервал дискретизации оптико-электронного сенсора более, чем в 10 раз, с высокими значениями коэффициента отражения в диапазоне 0,3–0,4 во всех спектральных каналах сенсора. К наиболее подходящим для осуществления послестартовой радиометрической калибровки можно отнести такие участки на территории Украины: самые яркие — Тендровская коса и Олешковские пески; средней яркости — Орджоникидзе, карьер; низкой яркости — Кривой Рог 2, карьер № 2-бис.

Разработанная методика позволяет проводить спектральные исследования и предварительный отбор тестовых объектов, пригодных для послестартовой радиометрической калибровки спутниковых оптико-электронных сенсоров наблюдения Земли, для больших территорий, например для всей территории Украины, с использованием архивных спутниковых данных без организации наземных измерений. Это позволяет оперативно провести предварительные спектральные исследования и отобрать пригодные для калибровки тестовые участки. В дальнейшем, при организации на этих участках наземных точных спектрометрических измерений, можно повысить достоверность и точность послестартовой радиометрической калибровки.

Создан геоинформационный слой тестовых участков распределенного контрольно-калибровочного полигона на территории Украины в форме полигонального шейп-файла средствами геоинформационной системы. В качестве основы для векторизованного представления тестовых участков использованы снимки территории Украины сенсорами космических систем Landsat 8 OLI и «Січ-2». В ручном режиме оцифрованы объекты правильной формы, как правило, антропогенного происхождения (отстойник-накопитель химических отходов, заповедник и т.п.). Природные же объекты с условно однородным покрытием выделены путем предварительной классификации панхроматических изображений и последующей автоматической векторизации полученного результата классификации. Описанный дифференцированный подход к векторному представлению тестовых участков в геоинформационной системе в зависимости от типа их землепользования позволяет значительно сократить время и повысить точность локализации контуров тестовых участков распределенного контрольно-калибровочного полигона.

Ya.I. Zelyk, S.V. Chornyy, L.V. Podgorodetska

**ВІДБІР ДІЛЯНОК ЗЕМНОЇ ПОВЕРХНІ
ДЛЯ ПІСЛЯСТАРТОВОГО
РАДІОМЕТРИЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ
СУПУТНИКОВИХ ОПТИКО-ЕЛЕКТРОННИХ
СЕНСОРІВ СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗЕМЛІ**

Проведено спектральні дослідження та здійснено відбір тестових ділянок земної поверхні території України, придатних для післястартового радіометричного калібрування супутникових оптико-електронних сенсорів спостереження Землі, на основі архівних супутникових даних та створено відповідний векторний геоінформаційний шар.

Ya.I. Zelyk, S.V. Chornyy, L.V. Podgorodetska

**SELECTION OF THE LAND SITES
FOR THE POST-LAUNCH RADIOMETRIC
CALIBRATION OF THE SATELLITE
ELECTRO-OPTIC SENSORS
FOR THE EARTH OBSERVATION**

Spectral studies and selection of the land test sites for the territory of Ukraine, suitable for post launch radiometric calibration of satellite electro-optic sensors is carried out. The studies are based on the archival satellite data. The corresponding vector geographic information layer is created.

1. *HQ Earth Science Data Systems (ESDS) Program. ESDS Policies. Data & Information Policy. Data Levels. Data Processing Levels.* — <https://earthdata.nasa.gov/earth-science-data-systems-program/policies/data-information-policy/data-levels> (31.05.2017).
2. *Committee on Earth Observation Satellites (CEOS).* — Ceos.org (31.05.2017).
3. *Creation of a calibration test site of subsatellite support / Ya.I. Zyelyk, V.A. Yatsenko, V.E. Nabivach, O.V. Semeniv, L.V. Podgorodetskya // Journal of Automation and Information Sciences.* — 2013. — **45**, N 12. — P. 48–65.
4. *Zyelyk Ya.I. Information-technological support of post launch calibration of optoelectronic monitoring sensors of «Sich» space system // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies.* — 2013. — **5**, N 9(65). — P. 27–38.
5. *Зельк Я.І. Создание средств и разработка методик послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения космической системы «Січ» // Вісник астрономічної школи.* — 2013. — **9**. — С. 93–101.
6. *Зелик Я.І., Семенів О.В. Створення геоінформаційної бази даних підсупутникового калібрувального полігону // Там же.* — 2014. — **10**, № 2. — С. 115–122.
7. *Зелик Я.І., Семенів О.В. Геоінформаційна база даних розподіленого контрольно-калібрувального полігону // Там же.* — 2015. — **11**, № 2. — С. 114–121.
8. *Spectral response in-flight estimation of Sich-2 multispectral satellite system / M.O. Popov, S.A. Stankevich, Ya.I. Zyelyk, S.V. Sklyar, O.V. Semeniv // Ukrainian Journal of Remote Sensing.* — 2014. — № 1. — P. 16–17. — <http://ujrs.org.ua/ujrs> (31.05.2017).
9. *Зелик Я.І., Чорний С.В., Коваленко О.О. Програмне забезпечення для радіометричного калібрування багатоспектральних оптичних систем дистанційного зондування Землі за перехресним методом // 14-а Українська конференція з космічних досліджень. Ужгород, 8–12 вересня 2014 р. Тези доповідей конференції.* — Київ: ІКД НАН України та ДКА України, 2014. — С. 140.
10. *Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи «Січ-2» за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати / М.О. Попов, С.А. Станкевич, Я.І. Зелик, С.В. Шкляр, О.В. Семенів // Космічна наука та технологія.* — 2012. — **18**, № 5. — С. 59–65.
11. *LANDNET Sites (CEOS Reference Sites).* — <http://calvalportal.ceos.org/ceos-landnet-sites> (31.05.2017).
12. *Test Site Catalog.* — http://calval.cr.usgs.gov/rst-resources/sites_catalog/ceos-reference-sites (31.05.2017).
13. *Закон Ламберта.* — https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%9B%D0%B0%D0%BC%D0%B1%D0%B5%D1%80%D1%82%D0%B0 (31.05.2017).
14. *Petland A. Linear shape from shading // Intl. Comput. Vision.* — 1990. — **4**. — P. 153–162.
15. *Landsat Surface Reflectance Climate Data Records.* — <https://pubs.er.usgs.gov/publication/fs20133117> (31.05.2017).
16. *Landsat Surface Reflectance Climate Data Records.* — <https://pubs.usgs.gov/fs/2013/3117/pdf/fs2013-3117.pdf> (31.05.2017).
17. *Landsat Surface Reflectance Higher-Level Data Products.* — <https://landsat.usgs.gov/landsat-surface-reflectance-high-level-data-products> (31.05.2017).
18. *Earth Explorer.* — <https://earthexplorer.usgs.gov> (31.05.2017).
19. *Guroi 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.* — 2008. — **37**, part B1. — P. 35–40.
20. *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, CEOS, 2009.* — 37 p.
21. *Зацерковний В.І., Бурачек В.Г., Железняк О.О., Терещенко А.О. Геоінформаційні системи і бази даних.* — Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя, 2014. — 492 с.
22. *ArcGIS 9.0. Начало работы. Руководство пользователя ESRI.* — New York, 2004. — 272 с.
23. *ArcGIS 9.0. ArcMap. Руководство пользователя ESRI.* — New York, 2004. — 558 с.
24. *ERDAS Field Guide, Technical Documentation ERDAS INC.* — Norcross, GA. — 2009. — 824 p.
25. *Зелик Я.І., Підгородецька Л.В. Детектування посівів озимих культур за супутниковими даними на основі ґрунтового-адаптивного перпендикулярного вегетаційного індексу // Вісник астрономічної школи.* — 2015. — **11**, № 1. — С. 91–98.

Получено 02.06.2017