

10. Исаев Л.К. О месте метрологии в системе наук и еще раз о ее постулатах / Л.К. Исаев // Измерительная техника. — 1993. — № 8. — С. 10–11.
11. Крысин Ю.М. Об основных постулатах теории измерений / Ю.М. Крысин // Метрологическое обеспечение измерительных систем. — Пенза: ФГУ “Пензенский ЦСМ”, 2004. — С. 23–27.
12. Шишкин И.Ф. Теоретическая метрология. Ч. I: Общая теория измерений / И.Ф. Шишкин. — СПб.: ПИТЕР, 2010. — 192 с.
13. Сулаберидзе В.Ш. О попытках аксиоматического изложения современной метрологии / В.Ш. Сулаберидзе [Электронный ресурс]. — 2011. — Режим доступа: [www.n2.insu.ru/articles/articles.html](http://www.n2.insu.ru/articles/articles.html)
14. Орлов А.И. Основные черты новой парадигмы математической статистики / А.И. Орлов // Научный журнал КубГАУ. — 2013. — № 90 (06). — С. 1–27.
15. Черкашин А.К. Полисистемный анализ и синтез. Приложение в географии / А.К. Черкашин. — Новосибирск: Наука, 1997. — 502 с.
16. Черкашин А.К. Гносеологические и теоретико-географические аспекты дистанционного зондирования Земли из космоса / А.К. Черкашин // IV Белорусский космический конгресс: материалы. Т. 1. — Минск: Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, 2009. — С. 12–16.
17. Курош А.Г. Теория групп / А.Г. Курош. — СПб.: Лань, 2005. — 648 с.
18. Черкашин А.К. Выделение границ функционально-однородных ареалов на космических снимках на основе вычисления определителя Якоби / А.К. Черкашин, Е.А. Истомина // География и природные ресурсы. — 2013. — № 1. — С. 157–165.
19. Цветков Э.И. Основы математической метрологии / Э.И. Цветков. — СПб.: Политехника, 2005. — 510 с.

УДК 528.855

## ПОЛИГОНЫ ДЗЗ В УКРАИНЕ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ И РАЗРАБОТОК

- В.И. Лялько**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик НАН Украины, директор Научного центра аэрокосмических исследований Земли Института геологических наук НАН Украины (ЦАКИЗ), г. Киев
- М.А. Попов**, доктор технических наук, профессор, заместитель директора по научной работе ЦАКИЗ, г. Киев
- С.А. Станкевич**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, главный научный сотрудник ЦАКИЗ, г. Киев
- Я.И. Зельк**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник Института космических исследований (ИКИ) НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев
- С.В. Черный**, кандидат технических наук, доцент, руководитель Харьковского центра ИКИ НАН Украины и ГКА Украины, г. Харьков
- В.А. Яценко**, доктор технических наук, старший научный сотрудник, заведующий отделом ИКИ НАН Украины и ГКА Украины, г. Киев



В.И. Лялько

М.А. Попов

С.А. Станкевич

Я.И. Зельк

С.В. Черный

В.А. Яценко

Рассмотрены концептуальные основы создания сети полигонов ДЗЗ в Украине для калибровки видовой бортовой аппаратуры и валидации спутниковых тех-

нологий и данных. Кратко описаны выполненные в последние годы работы по научно-методическому и информационному обеспечению украинских полигонов ДЗЗ.

*Приводится структура распределения полигонов по территории Украины, определены основные направления их тематического использования. Сформулированы направления работ по дальнейшему развитию сети украинских полигонов ДЗЗ.*

*The conceptual foundations of creating a network of ERS polygons in Ukraine for specific onboard equipment calibration and satellite technology and data validation are considered. The carried out works on the methodological and information support of Ukrainian ERS polygons over the last years are briefly outlined. The distribution structure of the polygons across the territory of Ukraine is shown, the main directions of their topical use are identified. The work directions for further development of the network of Ukrainian ERS polygons are formulated.*

### Состояние вопроса

Как известно, первые системы для съемки земной поверхности из космоса (Corona/Discoverer, Зенит, Янтарь и др.) создавались по инициативе и в интересах военных ведомств, однако достаточно быстро спутниковые съемочные системы стали с успехом применяться также для решения многочисленных “цивильных” задач: контроля природных ресурсов и землепользования, оценки состояния сельскохозяйственных посевов, поиска полезных ископаемых, исследования динамики природных процессов и явлений, оперативного картографирования и т. д. К числу наиболее успешных и “долгоиграющих” проектов создания спутниковых систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) с приложениями в указанных направлениях относятся американская программа Landsat (запуск первого аппарата на орбиту – июль 1972 г.), французская система SPOT (февраль 1986 г.), советская программа “Ресурс-О” (апрель 1988 г.) [1].

Хотя при подготовке к миссии бортовая аппаратура ДЗЗ проходит самые серьезные лабораторные и летные испытания, в ходе которых все ее основные параметры проверяются на соответствие техническому заданию, в процессе работы на орбите некоторые из параметров со временем “уходят” от исходных оптимальных значений. Подобные “уходы” ведут к ухудшению качества получаемых данных ДЗЗ, и, чтобы избежать или хотя бы уменьшить негативные последствия, необходимо периодически корректировать значения соответствующих параметров бортовой аппаратуры.

Операторы информационно-космического сектора, обработчики и пользователи материалов ДЗЗ столкнулись и с другими проблемами, среди которых разнородность в форматах представления данных, отсутствие единых критериев оценки качества данных, плохая совместимость информационных систем и др. Чтобы решать подобные проблемы общими усилиями и системно, в сентябре 1984 г. была создана профильная международная организация –

Комитет по спутниковым наблюдениям Земли (Committee on Earth Observation Satellites – CEOS).

Деятельность CEOS направлена на решение следующих задач [2]:

1) формирование и проведение общего курса стран-участников CEOS на обеспечение полной совместимости получаемых данных, используемых форматов, технологий, сервисов и создаваемых приложений;

2) всяческое содействие совершенствованию создаваемых в мире систем наблюдения Земли из космоса, повышению качества разрабатываемых спутниковых технологий и получаемых данных;

3) координацию деятельности различных национальных, коммерческих и международных компаний при планировании и реализации космических проектов в области наблюдения Земли.

Решение этих сложных задач невозможно без унификации терминологии и гармонизации стандартов. Приведем некоторые базовые термины, принятые CEOS, и их трактовку:

- *верификация* – получение объективного свидетельства (например, путем тестирования) того, что данное техническое средство (изделие, устройство, аппаратура и т. д.) удовлетворяет специфицированным требованиям (требованиям технического задания);

- *калибровка* – процесс, имеющий целью установить (либо восстановить) взаимно однозначное соответствие между реакцией (откликом) технического средства и известным сигналом на его входе;

- *валидация* – получение объективного свидетельства, что данная технология или продукт, получаемый на основе ее использования, удовлетворяет требованиям, необходимым для решения конкретной задачи (группы задач);

- *контрольно-калибровочный полигон (ККП)* – часть земной поверхности вместе с расположенными на ней объектами, которая используется для верификации и калибровки технических средств ДЗЗ;

- *тематический полигон (ТП)* – часть земной поверхности вместе с расположенными на ней объектами, которая используется для валидации технологий и продуктов (данных) ДЗЗ. Обычно ТП включает в себя участки территории и другие площадные объекты (так называемые тестовые площадки – test sites), по своим характеристикам относящиеся к разным классам. Номенклатура классов, представленных на таком полигоне, определяется предназначением валидируемых технологий и данных.

Из определений приведенных понятий видно, что процедуры верификации и калибровки имеют целью обеспечить функционирование средства (изделия) в соответствии с требованиями технического задания, а процедура валидации имеет целью установить, насколько эффективны (адекватны) технология или продукт, получаемый на основе ее (технологии) использования, в заданных приложениях.

Следует также отметить, что ККП и ТП, в силу различия решаемых задач, должны удовлетворять своим специфическим требованиям и потому, соответственно, иметь отличающиеся по назначению и составу комплексы средств измерений и наблюдений, разное методическое и программное обеспечение. Это обстоятельство непременно учитывается в рекомендациях и разработках Рабочей группы по калибровке и валидации (Working Group on Calibration and Validation – WGCV) и последовательно реализуется в деятельности стран-участниц CEOS. Сегодня общее количество ДЗЗ-полигонов, сертифицированных CEOS, превышает 30, среди них наиболее известными являются La Crau (Франция), Railroad Valley Playa (США), Tuz Golu (Турция), Negev (Израиль) и др. Страны-участницы CEOS имеют возможность проводить на этих полигонах и калибровку, и верификацию, и валидацию, включая выполнение наземных измерений и наблюдений синхронно с проведением космической съемки.

Украина является одной из стран, способных изготавливать и выводить на орбиту собственные космические аппараты, в том числе спутники ДЗЗ. С запуском каждого нового спутника ДЗЗ серии “Сич” улучшаются характеристики устанавливаемых оптико-электронных сенсоров и растет качество формируемых изображений Земли. Украинскими учеными и специалистами разрабатываются новые и эффективные технологии решения тематических задач на основе материалов съемки отечественными спутниками.

Однако на мировом рынке продавцов космической информации и ДЗЗ-технологий Украина практически не представлена, поскольку отечественные технические средства и технологии и получаемые на их основе информационные продукты не проходят сертификацию в соответствии с международными стандартами ISO [3 и др.]. Чтобы решить проблему выхода на мировой рынок, необходимо сделать обязательным проведение процедур верификации и периодической калибровки технических средств и валидации создаваемых ДЗЗ-технологий и продуктов. Проведение таких процедур невозможно без полевых замеров и измерений, которые обычно выполняются на специально оборудованных участках территории – полигонах ДЗЗ.

В статье приводится обзор исследований и научно-практических работ, проводимых в Украине по созданию и обустройству отечественных полигонов ДЗЗ, а также обсуждаются возможные направления дальнейших работ.

### **Сеть полигонов ДЗЗ в Украине**

Чтобы оценивать ключевые характеристики бортовой аппаратуры в процессе ее работы, поддерживать стабильно высоким качество информационных продуктов, создаваемых на базе материалов съемки Земли отечественными спутниками ДЗЗ, в частности,

серии “Сич”, Научным центром аэрокосмических исследований Земли ИГН НАН Украины (ЦАКИЗ) в 2006–2007 гг. была предложена и обоснована концепция создания на территории Украины сети полигонов ДЗЗ [4, 5].

В основу концепции были заложены следующие положения:

- создаваемая сеть полигонов ДЗЗ должна включать в себя как ККП, так и ТП, что в целом обеспечит возможность решения как задач верификации и калибровки бортовой видовой аппаратуры, так и задач валидации спутниковых технологий и данных ДЗЗ;

- должна быть обеспечена возможность проведения калибровки широкой номенклатуры существующих и перспективных бортовых видовых технических средств различного пространственного разрешения, работающих в разных спектральных диапазонах (оптическом, микроволновом, радиочастотном и т. д.);

- сайтовая структура ТП должна максимально возможно удовлетворять принципу разнообразия классов объектов, обычно рассматриваемых в задачах ДЗЗ, и обеспечивать получение требуемых заверочных данных;

- геоинформационное, научно-методическое, аппаратное и программное обеспечение полигонов ДЗЗ должно соответствовать стандартам ISO и в совокупности обеспечивать качество получаемых спутниковых данных и информационных ДЗЗ-продуктов, удовлетворяющее принятому комитетом CEOS в 2008 г. документу Quality Assurance Framework for Earth Observation (QA4EO) (Стратегия обеспечения качества данных наблюдения Земли);

- полигоны украинской сети полигонов ДЗЗ после их сертификации с участием международных экспертов должны стать неотъемлемой составной частью международной системы полигонов CEOS.

Один из ключевых вопросов при реализации предложенной концепции – составление списка кандидатов на полигоны. При решении этого вопроса следует исходить из общих требований к полигонам ДЗЗ, сформулированных экспертами CEOS [6]:

- 1) каждый отдельный тестовый участок из состава полигона должен быть геометрических размеров, позволяющих уверенно локализовать и выполнить измерение его истинных свойств на цифровом аэро- или космическом изображении. Рекомендуются, с учетом возможных ошибок пространственной привязки, чтобы минимальные размеры площадки тестового участка составляли от  $2 \times 2$  до  $5 \times 5$  пикселей. Такие размеры позволяют также снизить ошибки измерения оптико-отражательных свойств тестового участка, которые связаны с атмосферными эффектами и засветками от других источников;

- 2) тестовые участки и калибровочные объекты должны иметь достаточно хорошие излучающие / отражающие свойства (с величиной коэффици-

ента отражения падающего излучения в заданном спектральном диапазоне не менее 0,3); поверхность тестовых участков должна быть однородной по своим оптическим свойствам и близкой к ламбертовской;

3) рельеф местности в пределах тестовых участков должен иметь равнинный характер, с уклонами не более нескольких градусов. Однако нужно отметить, что для полигонов в горных районах данное требование особенно трудно выполнимо;

4) излучательно-отражательные характеристики полигонных тестовых объектов (ТО) должны быть достаточно стабильными во времени, неизменными, по крайней мере, на период выполнения процедур калибровки или валидации;

5) при выборе места расположения полигона предпочтение следует отдавать площадкам на достаточно больших высотах над уровнем моря (меньше аэрозолей в атмосфере), удаленным от больших водоемов (меньше водяных паров в атмосфере) и вне урбанизированных и промышленных зон;

6) полигон должен располагаться в зоне маршрутов полета спутников ДЗЗ с преимущественной съемкой в зенит и в светлое время суток;

7) требование логистики: если полигон используется также как подспутниковый, то желательно, чтобы полетное время самолета от ближайшего аэродрома было небольшим.

Вместе с тем, в зависимости от функций и предназначения полигона, выдвигаются дополнительные специфические требования.

Для ККП эти дополнительные требования такие:

- при выборе места расположения ККП предпочтение отдается аридным районам (для которых характерны низкая вероятность облачной погоды и незначительные осадки). Малое количество осадков практически не изменяет уровень влажности грунтов и таким образом они сохраняют постоянство во времени величины коэффициента отражения;

- при отборе кандидатов на ТО следует отдавать предпочтение таким, у которых функция спектрального распределения значений коэффициента излучения или отражения имеет форму более простую и плоскую, без “узких” линий и особо больших (резких) перепадов.

К ТП предъявляются такие дополнительные требования:

- тестовые участки для валидации должны быть отобраны и проверены на соответствие предметной области решаемых задач, а также исходя из радиометрических, геометрических и других требований;

- классовая структура тестовых участков на полигоне должна отвечать принципу максимального разнообразия репрезентов. При этом тестовые участки, являющиеся репрезентами разных классов, но не очень различающиеся по своим излучательно-отражательным характеристикам, должны быть пространственно рассредоточены в пределах полигона;

- количество тестовых участков – репрезентов классов на полигоне должно удовлетворять принципу статистической достаточности;

- обязательно наличие необходимой (для проведения атмосферной коррекции многоспектральных изображений) информации о составе и оптических свойствах профилей (столба) атмосферы в районе расположения полигона.

В рамках реализации стратегии создания сети полигонов ДЗЗ в 2008–2010 гг. было проведено целевое изучение территории Украины и, с учетом приведенных выше требований, были выполнены необходимые оценки. Если следовать требованию обеспечения широкой номенклатуры тематических задач, то полигоны необходимо иметь во всех географо-климатических зонах Украины. Таковых в стране четыре: 1) лесная (Волинская, Ровенская, Житомирская, Киевская, Черниговская области); 2) лесостепь (Львовская, частично Ивано-Франковская, Хмельницкая, Винницкая, Черкасская, Полтавская, Сумская, Харьковская, частично Кировоградская области); 3) степная (Запорожская, Днепропетровская, Одесская, Херсонская, Николаевская, Луганская и Донецкая области); 4) горная (юг Крыма, Закарпатская, частично Львовская и Ивано-Франковская области). В каждой зоне преобладают свои специфические виды растительности, имеются особенности в типах грунтов и рельефа. Зоны также различаются по степени урбанизации, уровню антропогенной нагрузки, водным ресурсам, состоянию приземного слоя атмосферы и др.

Исходя из перечисленных выше требований и соображений, в работе [5] была предложена (как один из возможных вариантов) структура полигонов ДЗЗ на территории Украины (рис. 1). Авторами учтено, что с точки зрения минимизации организационных, материальных и финансовых затрат предпочтение при выборе мест расположения полигонов следует отдавать территориям, где уже обустроены и функционируют природные парки, заповедники, опытные хозяйства и т. д.

Возможности использования определенных участков Шацкого национального природного парка (ШНПП) для выполнения валидационных работ многие годы изучаются совместно учеными Физико-механического института им. Г. Карпенко НАН Украины (ФМИ) и ЦАКИЗ. Ежегодно проводятся полевые работы, отобраны и наблюдаются участки-репрезенты классов из числа объектов на территории парка, выполнены их описание и пространственная привязка, создана и пополняется база космических снимков (Landsat, EOS AM-1, Terra/Aster, RapidEye и др.) территории парка [7–10].

Полигон “Яворивский” расположен в Львовской области, в пределах географического района Розточья. Разнообразию представленных здесь биотопов (лесов, кустарников, травяных покрытий, водно-болотистых угодий, искусственных объектов



Рис. 1. Структура распределения полигонов по территории Украины: 1 – Шацкий национальный природный парк; 2 – полигон “Яворивский” (Львовская область); 3 – фотограмметрический полигон “Гнивань” (Винницкая область); 4 – площадки в Киевской области; 5, 7–11 – полигоны на базе филиалов Украинского степного природного заповедника; 6 – полигон “Скрипали” (Харьковская область); 12 – биосферный заповедник “Аскания-Нова” (Херсонская область); 13 – природный заповедник “Еланецкая степь” (Николаевская область); 14 – Дунайский биосферный заповедник (Одесская область); 15 – полигон на базе Национального центра управления и испытаний космических средств (г. Евпатория, Крым); 16 – полигонный комплекс Морского гидрофизического института (пгт Кацивели, Крым)

и др.) способствует его задействованию при валидации технологий классификации земных покровов, картографирования и др.

Создание фотограмметрического полигона вблизи пгт Гнивань, на юго-западе Винницкой области, было инициировано в 2006 г. Государственной службой геодезии, картографии и кадастра Украины (в настоящее время эта служба включена в структуру Государственного комитета Украины по земельным ресурсам). Предназначение – обеспечение условий для верификации систем дистанционного топографического картографирования местности и апробации технологий изготовления геопространственных данных на основе материалов аэро- и космической съемки. Полигон находится на окраине Подольской возвышенности, имеет площадь около 250 км и представляет собой грядово-волнистую поверхность, изрезанную ярами и балками с глубинами 20...40 м. Абсолютные высоты над уровнем моря колеблются в пределах 220...310 м. Местность густонаселенная, дорожная сеть развита хорошо. Почва распахана под сельскохозяйственные культуры. Лес занимает 10 % территории. По территории полигона протекает река Южный Буг, ширина берега 50...80 м.

В Киевской области выделен ряд площадок, которые могут эффективно использоваться (а некоторые уже много лет используются) в качестве

ТП, преимущественно сельскохозяйственного направления. Среди них – участки в Чернобыльской зоне, в Барышевском районе, полигон “Девички” и др.

Полигоны на базе филиалов Украинского степного природного заповедника охватывают практически всю юго-восточную территорию страны, для них существуют достаточно полные базы данных фитоценологического мониторинга, осуществляемого на постоянной основе Институтом ботаники НАН Украины. Подобные мониторинговые исследования ведутся также на территории заповедников “Аскания-Нова” и “Еланецкая степь”.

Полигон “Скрипали” (Харьковская область) функционирует с 1987 г., его научно-методическое обеспечение осуществляют ученые Харьковского национального университета им. В.Н. Каразина. Территория полигона включает лесонасаждения (~70 %), земли сельскохозяйственного назначения (~15 %), селитебные объекты, участки дорог с асфальтовым и бетонированным покрытием, малые водные объекты. Выделено более 20 эталонных участков – площадок 25×25 м<sup>2</sup>, отражающих характеристики территории в любых сезонных и погодных условиях, организовано около 300 опорных точек для пространственной привязки [11]. На полигоне развернут комплекс метрологических средств (мир, отражателей, маркеров и т. д.), позволяющий проводить оценки радиометрической

чувствительности, пространственной разрешающей способности и других характеристик бортовых радиолокационных систем, а также оценивать качество получаемых данных. Все метрологические средства полигона аттестованы, сертифицированы и в настоящее время успешно используются при калибровке бортового оборудования системы малых космических аппаратов (МКА) типа “Кондор-Э” [12].

Дунайский биосферный заповедник имеет общую площадь 46,4 тыс. га. В территорию заповедника включены рукава Дуная и плавни, имеются участки с растительностью, зоны антропогенных ландшафтов, природные ландшафты от полупустынных до переувлажненных и водных. Организации НАН Украины, в структуре которой находится заповедник, проводят здесь большой объем экологических исследований, изучают влияние на флору и фауну климатических изменений.

Национальный центр управления и испытаний космических средств (НЦУИКС) расположен на западном побережье Крыма, вблизи г. Евпатория. Характер местности – степной, равнинный. Климат имеет минимальную сезонную динамику, количество солнечных дней в году – до 280, атмосфера чистая. На территории НЦУИКС имеется большое количество технических сооружений, построек, есть дорожная сеть, участки с растительностью. Благодаря наличию квалифицированных специалистов полигон на базе НЦУИКС может функционировать на постоянной основе [13].

Для морских исследований и валидации соответствующих ДЗЗ-технологий служит полигонный комплекс Морского гидрофизического института (МГИ) в пгт Качивели (Крым). Комплекс создан для изучения экологических, природоресурсных и других проблем черноморского региона. В состав комплекса входят уникальная платформа, установ-

Направления тематического использования украинских полигонов ДЗЗ

Но- мер	Полигон	Направления использования								
		Верификация и калибровка бортовой аппаратуры	Классификации земных покровов	Определение сигнатур объектов (спектральных, поляризационных, временных и др.)	Экосистемы (лес, растительность, оценивание биологических параметров)	Мониторинг суши, водоемов, атмосферы	Климатические изменения	Землепользование, кадастр, картографическое обеспечение	Гидрологические задачи (разведка подземных вод, оценка запасов и др.)	Море и прибрежная зона
1	Шацкий национальный природный парк		+	+	+	+	+			+
2	Полигон “Яворивский”				+			+		
3	Фотограмметрический полигон “Гнивань”	+	+	+				+		
4	Площадки в Киевской области		+	+	+		+	+		+
5, 7–11	Полигоны на базе филиалов Украинского степного природного заповедника		+	+	+		+			+
6	Полигон “Скрипали”	+			+	+				+
12	Биосферный заповедник “Аскания-Нова”		+		+		+		+	
13	Природный заповедник “Еланецкая степь”		+		+		+		+	
14	Дунайский биосферный заповедник НАН Украины			+	+	+	+		+	
15	Полигон на базе НЦУИКС	+		+						+
16	Полигонный комплекс МГИ НАН Украины					+				+

ленная на сваях на прибрежном шельфе, а также аппаратура для измерений различных биофизических параметров на суше [14].

Основные направления тематического использования украинских полигонов ДЗЗ приведены в таблице [4, 5].

Необходимо отметить, что предложенная ЦАКИЗ концепция создания на территории Украины сети полигонов ДЗЗ была поддержана НАН Украины и Государственным космическим агентством Украины (ГКАУ) и нашла отражение в заданиях Общегосударственной целевой космической программы Украины.

### Калибровка бортовых видовых средств и валидация данных: отправные положения

В общем случае параметры и характеристики бортовых видовых средств – сенсоров – разделяют на геометрические, радиометрические, спектральные, временные и поляризационные [15].

К числу геометрических характеристик относят пространственное разрешение, точность позиционирования, функцию рассеяния точки, поле зрения, к числу радиометрических параметров – степень линейности преобразования входного сигнала в выходной, точность регистрации и др., к числу

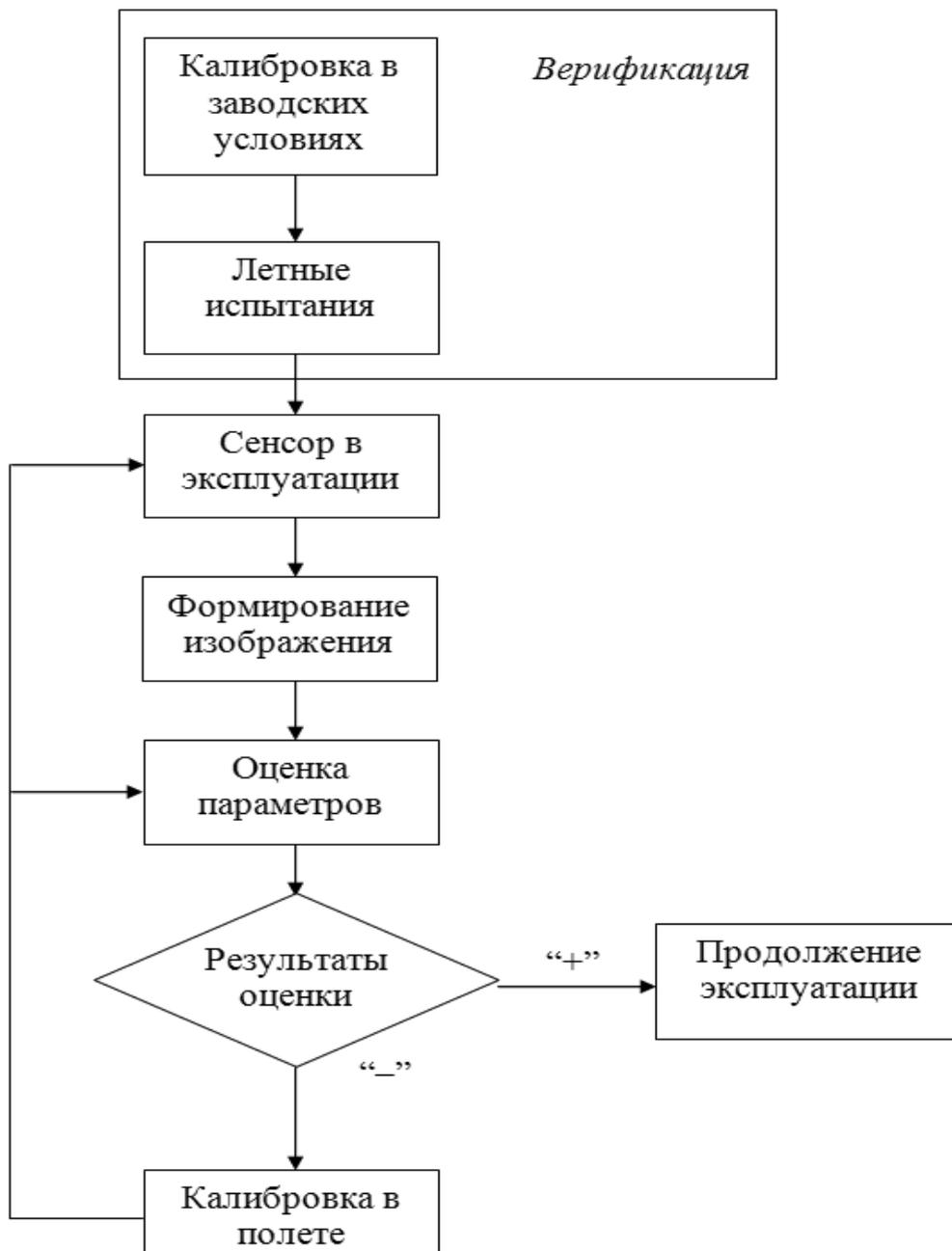


Рис. 2. Схема проведения калибровки бортовых видовых технических средств

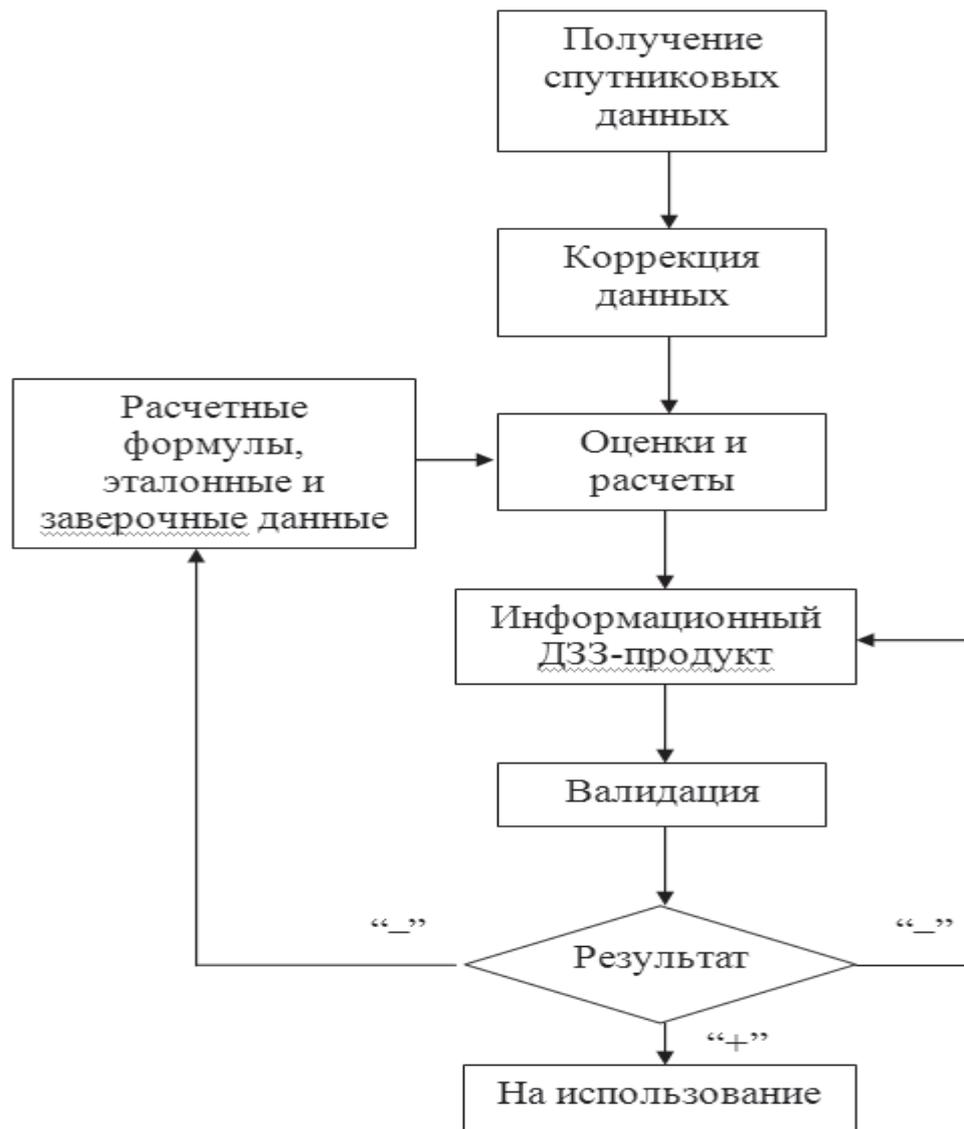


Рис. 3. Методологическая схема проведения валидации информационных ДЗЗ-продуктов

спектральных параметров – границы каждого из рабочих спектральных интервалов (каналов) сенсора, положение максимума спектральной чувствительности в канале и др., к числу временных параметров – инерционность ответа, стабильность реакции и т. д., к числу поляризационных свойств сенсора – поляризационную чувствительность, тип поляризации и ее параметры.

Указанные параметры и характеристики (или их некоторая часть, в зависимости от конкретного предназначения сенсора) являются объектом оценивания при изготовлении сенсора и в процессе его эксплуатации [16]. Верификация видового технического средства производится сначала на земле, в заводских условиях, а потом путем летных испытаний. Контроль состояния параметров и рабочих характеристик сенсора после его установки на борт космического аппарата (КА) и запуска осуществляется периодически в процессе космического полета [17].

Последовательность и условия проведения указанных работ схематично показаны на рис. 2.

Условия, лежащие в основе получения качественных спутниковых данных, сформулированы в упомянутом выше документе QA4EO и сводятся к следующему:

- полигон, на котором проводится валидация, должен пройти сертификацию CEOS. Все технические средства, используемые в измерениях, должны быть откалиброваны. Также должна быть обеспечена прослеживаемость (traceability) получаемых данных к эталонам физических величин, выражаемых в единицах системы СИ;

- процедуры валидации выбираются из числа стандартных либо должны быть гармонизированы с соответствующими международными стандартами. Для каждого конкретного сенсора или другого технического средства должны быть доступными (например, через портал) описания процедур его

калибровки и валидации, а также полученные при этом результаты.

Исходя из опыта и рекомендаций СЕОС, была принята методологическая схема проведения валидации информационных ДЗЗ-продуктов обеих групп, показанная на рис. 3.

Точность решения тематических задач ДЗЗ зависит от качества коррекции исходных (“сырых”) спутниковых данных — геометрической, радиометрической, атмосферной. Для проведения коррекции могут использоваться как известные программные средства (ENVI, ArcGIS), так и оригинальные компьютерные программы.

Валидация информационного ДЗЗ-продукта производится с использованием критериев, выбор которых определяется предназначением технологии. По предназначению все ДЗЗ-технологии можно подразделить на две большие группы. Одна группа ДЗЗ-технологий имеет целью дистанционно измерять значения оптических, биофизических и других параметров земной поверхности, атмосферы и иных объектов. Информационным продуктом таких технологий являются распределения значений подобных параметров в пространстве или во времени. В качестве критерия качества обычно служат оценки точности соответствия полученных значений параметров истинным (референсным). Наиболее простой метод оценки точности базируется на вычислении среднеквадратического отклонения (СКО).

Другая группа ДЗЗ-технологий позволяет дистанционно получать содержательную информацию относительно определенных классов объектов или явлений, их количества, состояния, поведения и т. д. При оценивании качества такой информации возможны два вида ошибок: тематическая (thematic error) и позиционная (positional error).

В расчетах тематических ошибок важное значение имеет степень репрезентативности используемой выборки [18]. Для ее оценки принято использовать биномиальную модель, согласно которой минимальное количество необходимых измерений в выборке рассчитывается по формуле

$$n = \frac{Z_{\alpha/2}^2 \cdot p(1-p)}{b^2},$$

где  $p$  — вероятность правильной классификации;  $Z_{\alpha/2}$  — значение из таблицы стандартного нормального ( $z$ ) распределения (Standard Normal ( $z$ ) Distribution);  $b$  — допустимая ошибка (allowable error).

Позиционные ошибки отражают неопределенность соответствия между координатами объекта на снимке и Земле. Обычно позиционную ошибку оценивают через СКО и считается, что величина расхождения между полученной и заявленной ошибками СКО является статистикой с хи-квадрат ( $\chi^2$ ) распределением [18].

## Проведенные исследования и разработки

Работы по созданию и обустройству полигонов ДЗЗ в Украине включали в себя:

- создание научно-методического обеспечения калибровки видовых оптических средств;
- создание научно-методического обеспечения валидации спутниковых технологий и данных;
- разработку информационного обеспечения.

Были выполнены соответствующие проекты и научно-исследовательские работы (НИР). В период 2009–2011 гг. в рамках Программы научных исследований НАНУ и ГКАУ “Научные основы создания, методическое, техническое и информационное обеспечение создания системы мониторинга геосистем на территории Украины (GEO-UA)” выполнялся проект “Методическое обеспечение создания полигона ДЗЗ на базе Шацкого национального природного заповедника”. В его выполнении принимали участие ЦАКИЗ, ФМИ и Институт ботаники НАН Украины.

В период 2011–2013 гг. во исполнение задач Общегосударственной целевой космической программы Украины выполнялась НИР “Создание контрольно-калибровочного полигона подспутниковой поддержки (Полигон)”, заказчиком выступало ГКАУ, исполнителями — Институт космических исследований (ИКИ) НАН Украины и ГКА Украины (головной исполнитель), Харьковский центр ИКИ и ЦАКИЗ.

Целью проекта GEO-UA было изучение возможности создания ТП на базе ШНПП, для чего было проведено детальное изучение территории парка и отобраны кандидаты на тестовые участки. Изучение велось полевым методом, а также использовались космические снимки. Были изучены особенности ландшафтной структуры, типы земных покровов и экосистемы парка. Были отобраны природные ТО под ряд тематических задач, проведено их спектрометрирование и составлены паспорта.

Цель НИР “Полигон” — создание системы метрологической аттестации методик тематической обработки спутниковых данных, получаемых спутниками ДЗЗ серии “Сич”.

Проект “Полигон” предусматривал решение следующих задач [19–21]:

- 1) разработку принципов контрольно-калибровочного обеспечения систем ДЗЗ и плана развития инфраструктуры полигона на территории НЦУИКС;
- 2) отбор ТО на территории ККП НЦУИКС, позволяющих в совокупности выполнять процедуры калибровки бортовых сенсоров, включая оценку их текущего пространственного разрешения и определение спектральной чувствительности;
- 3) разработку методик определения пространственного разрешения на местности, оценивания спектральной чувствительности и радиометрической калибровки спектральных каналов бортовых сенсоров;

4) разработку программно-аппаратного комплекса для атмосферной коррекции спутниковых снимков и послестартовой калибровки оптико-электронных сенсоров.

В силу ряда причин по состоянию на конец 2013 г. были решены лишь задачи, названные в п. 1–3. В настоящее время в ИКИ проводятся работы по созданию первой версии программно-аппаратного комплекса (ПАК), в частности, программного обеспечения калибровки в свободной открытой Quantum GIS (QGIS) [22]. Разрабатывается унифицированный подход к реализации в QGIS таких компонентов ПАК: геоинформационной базы данных ККП; динамических сервисов взаимодействия с базой данных; динамических сервисов выполнения методик определения пространственного разрешения на местности; радиометрической калибровки по спектральной энергетической яркости на апертуре сенсора перекрестным методом и методом, использующим наземные данные.

В рамках выполнения проекта “Полигон” организациями-исполнителями ЦАКИЗ и ИКИ совместно со специалистами ГКАУ были разработаны несколько новых методик, необходимых для калибровки. Так, разработана методика послестартовой оценки пространственной разрешающей способности оптических средств по природным ТО [17, 23]. Задача определения разрешающей способности решается путем расчета функции рассеяния точки (ФРТ) по известному входному и выходному изображениям ТО. Для оценки ФРТ использован оптимальный фильтр Винера. Разрешающая способность аппаратуры наблюдения по ФРТ определяется как размер пятна рассеивания и вычисляется как среднеквадратическое отклонение в аппроксимации кривой Гаусса главного максимума ФРТ.

Было разработано пилотное программное обеспечение для решения задач радиометрической калибровки дифференциальным и перекрестным методами и определения разрешающей способности оптических систем ДЗЗ по природным ТО, что позволило провести статистические испытания методики послестартовой оценки разрешающей способности оптических средств по данным систем ДЗЗ КА “Сич-2”, “Ландсат-5, 7” и ЕО-1.

Разработана методика послестартовой калибровки с оценкой спектральной чувствительности многоспектральной съемочной аппаратуры по результатам космических съемок ТО [24]. Особенностью разработанной методики является повышение точности калибровки благодаря использованию специальной параметризации функции спектральной чувствительности многоспектральной съемочной аппаратуры спутниковой системы “Сич-2”. В качестве кандидатов на ТО были исследованы такие объекты: асфальтовое и бетонное покрытия, чаша телескопа РТ-70, поверхность стадиона, открытый

грунт, песчаный берег моря и др. Был выполнен большой объем прецизионных спектральных измерений природных и искусственных объектов с использованием полевого спектрометра FieldSpec3FR.

Методами пространственного и корреляционного анализа результатов наземных измерений и статистического Гетис-анализа материалов космической съемки были оценены их пространственная однородность и стабильность во времени [25].

Отметим также, что в период 2008–2010 гг. ЦАКИЗ проводил полевые исследования и изучение ТО на территории полигона “Гнивань”. Производились спектральные измерения, составлено геоботаническое описание различных видов растительности, выполнена геопривязка и др. В этих работах также принимали участие специалисты Научно-исследовательского института геодезии и картографии.

Нужно отметить, что измерения спектральных характеристик различных объектов с использованием полевого спектрометра FieldSpec3FR выполнялись в течение ряда лет на полигонах НЦУИКС, ШНПП, “Гнивань”, ряде площадок Киевской обл. и др. Результаты измерений заносились в специально созданную спектральную базу данных (СБД) [26]. Одной из особенностей СБД является предоставление пользователям возможности проведения различных расчетов, обработки и сложного (интеллектуального) анализа спектрограмм. В настоящее время в СБД накоплено около 18 тысяч спектрограмм нескольких сотен природных и искусственных объектов (растительности, грунтов, минералов, покрытий и т. д.).

#### **Направления дальнейших работ**

Таким образом, за период после выдвижения концепции создания на территории Украины сети полигонов ДЗЗ выполнен весьма значительный объем работ по выбору полигонов и описанию тестовых участков, научно-методическому обеспечению процедур калибровки видовых оптических средств и валидации спутниковых технологий и данных, созданию необходимого информационного обеспечения.

Дальнейшие усилия необходимо направить на решение таких задач:

- расширение полигонной заверочной базы, составление и актуализацию описаний ТО, точное геопривязывание полигонных объектов;
- наращивание спектральной базы данных для ТО и архива космических снимков полигонов сети;
- подготовку к паспортизации ККП НЦУИКС и обустройство очередных полигонов ДЗЗ;
- совершенствование созданных методик калибровки и валидации, расширение списка технологий и информационных продуктов, получаемых на основе многоспектральных снимков спутнико-

вой системы “Сич”, которые могут проходить валидацию на полигонах ДЗЗ Украины;

- обоснование облика программно-технического комплекса для автоматизации работ по калибровке и валидации, создание пакета программного обеспечения;

- коррекцию существующей структуры аннотационного файла изображения, формируемого многоспектральной съемочной аппаратурой спутниковой системы “Сич” (что позволит устранить неопределенность описания исходных данных, необходимых для проведения послестартовой калибровки);

- оценку экономической эффективности и преимуществ, достигаемых при использовании создаваемой сети отечественных полигонов ДЗЗ и включении ее в структуру международных полигонов CEOS.

#### Список литературы

1. *Гарбук С.В.* Космические системы дистанционного зондирования Земли / С.В. Гарбук, В.Е. Гершензон. – М.: Изд-во А и Б, 1997. – 296 с.
2. CEOS Leadership to Ensure High-Quality Earth Observation Data: A Strategic Vision // Committee on Earth Observation Satellites, Working Group on Calibration and Validation, 1995. – 32 p.
3. ISO 9000 International Standards for Quality Management, 2<sup>nd</sup> ed. // International Organization for Standardization, P.O. Box, CH-1211, Geneva, 20, Switzerland. – 244 p.
4. *Лялько В.И.* Тестовые и калибровочные полигоны ДЗЗ в Украине как элемент глобальной системы GEOSS/GMES / В.И. Лялько, М.О. Попов // 7-ма Українська конференція з космічних досліджень, 3–8 вересня 2007 р., Євпаторія: зб. тез. – С. 169.
5. *Лялько В.И.* Полигоны ДЗЗ Украины и перспективы их использования в системе GEOSS / В.И. Лялько, М.О. Попов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – М.: ИКИ РАН, 2008. – Т. 2, вып. 5. – С. 548–556.
6. Prime Candidate Earth Targets for the Post-Launch Radiometric Calibration of Space-Based Optical Imaging Instruments / P.M. Teillet, J.A. Barsi, G. Chander, K.J. Thome // Earth Observing Systems XII, Ed. By J.J. Butler, J. Xiong. Proc. SPIE. – 2007. – Vol. 6677–66770S. doi: 10.1117/12.733156.
7. Використання геоінформаційних технологій для моніторингу локальних екосистем України / Л.І. Муравський, В.В. Кошовий, О.Т. Олійник [та ін.] // Відбір і обробка інформації. – 2006. – Вип. 24 (100). – С. 19–30.
8. Актуальні проблеми створення полігонів ДЗЗ в Україні (на прикладі Шацького національного природного парку / В.І. Лялько, М.О. Попов, Л.П. Ліщенко [та ін.] // Аерокосмічні спостереження в інтересах сталого розвитку та безпеки. GEO-UA. – К.: Наук. думка, 2008. – С. 82–84.
9. Створення тестових ділянок на території Шацького національного природного парку для валидації даних дистанційного зондування / В.І. Лялько, М.О. Попов, Л.П. Ліщенко [та ін.] // Науковий вісник Волинського національного університету ім. Лесі Українки. – 2009. – № 1. – С. 122–128. – (Сер. “Географічні науки”).
10. Роль Шацького національного природного парку в контексті завдань Державної цільової екологічної програми моніторингу навколишнього природного середовища / Я.П. Дідух, В.В. Кошовий, В.І. Лялько [та ін.] // Там само. – 2009. – № 1. – С. 8–14.
11. Подспутниковые полигоны Украины / Л.М. Атрошенко, Н.Н. Горобец, С.И. Костяшкин, Л.П. Сафронова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов: сб. науч. статей. Вып. 5. Том II. – М.: ООО “Азбука – 2000”, 2008. – С. 265–271.
12. Опыт создания полигонно-калибровочного комплекса для радиолокатора с синтезированной апертурой космического базирования / Л.М. Атрошенко, Н.Н. Горобец, М.Г. Красногорский, В.М. Малоков // Вестник СибГАУ. – 2013. – № 5 (51). – С. 30–32.
13. Создание контрольно-калибровочного полигона подспутниковой поддержки / Я.И. Зельк, В.А. Яценко, В.Е. Набивач [и др.] // Проблемы управления и информатики: Междунар. науч.-техн. журнал. – 2013. – № 6. – С. 123–141.
14. Перспективы развития морских и наземных стационарных опорных полигонов для геоэкологического мониторинга / В.И. Лялько, М.А. Попов, В.А. Иванов, А.С. Кузнецов // Екологічна безпека прибережної та шельфової зон та комплексне використання ресурсів шельфу: зб. наук. праць. – Севастополь: МПІ НАН України, 2009. – Вип. 19. – С. 19–35.
15. *Kresse W.* ISO Standards for Geographic Information / W. Kresse, K. Fadae. – Berlin: Springer, 2004. – 324 p.
16. *Панфилов А.С.* Условия подготовки и проведения абсолютных радиометрических измерений с помощью оптико-электронной аппаратуры наблюдения Земли / А.С. Панфилов, В.Р. Гаврилов, В.И. Саприцкий // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 1. – С. 85–91.
17. Послестартовая калибровка многоспектральной съемочной аппаратуры спутниковой системы “Сич-2” / М.А. Попов, С.А. Станкевич, С.В. Шкляр [и др.] // 13<sup>th</sup> Ukrainian Confe-

- rence on Space Research: Abstracts. — Yevpatoria, Crimea, Ukraine, 2013, 2–6 September. — P. 196.
18. Попов М.А. Методология оценки точности классификации объектов на космических изображениях / М.А. Попов // Проблемы управления и информатики. — 2007. — № 1. — С. 97–103.
  19. Современное состояние и перспективы использования тестовых полигонов ДЗЗ: цели, задачи, принципы и концепции / С.В. Абламейко, Б.И. Беляев, Я.И. Зельк [и др.] // 5-й Белорусский космический конгресс: материалы. Т. 1. — Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2011. — С. 172–176.
  20. Зельк Я.И. Информационно-технологическая поддержка послестартовой калибровки оптико-электронных сенсоров наблюдения космической системы “Сич” / Я.И. Зельк // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. — 2013. — № 5. — С. 27–38.
  21. Зельк Я.И. Создание средств и разработка методик послестартовой калибровки оптических средств космического наблюдения космической системы “Сич” / Я.И. Зельк // Вісник астрономічної школи. — 2013. — Т. 9. — С. 93–101.
  22. [qgis.org/ru/site/](http://qgis.org/ru/site/) (QGIS — Свободная географическая информационная система с открытым кодом).
  23. Авдеев М.А. Методические погрешности градуировки многозональных сканирующих устройств широкополосным сигналом / М.А. Авдеев, С.В. Черный // Системы обработки информации. — Харьков: ХУПС, 2013. — Вып. 6 (113). — С. 45–51.
  24. Калібрування спектральної чутливості сенсора багатоспектральної супутникової системи “Січ-2” за наземними спектрометричними вимірюваннями: попередні результати / М.О. Попов, С.А. Станкевич, Я.І. Зельк [та ін.] // Космічна наука і технологія. — 2012. — Т. 18. — № 5. — С. 59–65.
  25. Оценка гомогенности спектральных характеристик тестовых участков для калибровки спутниковой многоспектральной съемочной аппаратуры / М.А. Попов, С.А. Станкевич, В.Н. Подорван, С.С. Дугин // 13<sup>th</sup> Ukrainian Conference on Space Research: Abstracts. — Yevpatoria, Crimea, 2013, 2–6 September. — P. 195.
  26. Спектральна база даних для вирішення тематичних задач ДЗЗ: принципи побудови і реалізація / М.О. Попов, С.П. Ковальчук, В.І. Пикунік [та ін.] // 3-тя Всеукраїнська конференція “ГЕО-UA”: матеріали. — Євпаторія, АР Крим, 3–7 вересня 2012. — С. 101–103.