

Методы сертификационных испытаний цифровых моделей рельефа, сформированных на основе данных дистанционного зондирования Земли

А.М. Полетаев

Военно-космическая академия имени А.Ф. Можайского
197082, Санкт-Петербург, ул. Ждановская, 13
E-mail: poletam@mail.ru

Рассматриваются типы данных дистанционного зондирования Земли и их точностные характеристики как основных источников пространственных данных о рельефе. Приводятся требования к цифровым моделям рельефа (ЦМР), рекомендуемым Международной организацией гражданской авиации к использованию на воздушных судах. Определена ведущая роль радиолокационных данных в формировании ЦМР для районов 1 и 2 в соответствии с классификацией зональной навигации. Обоснован перечень нормативных документов, позволяющих разрабатывать программы и методики сертификационных испытаний ЦМР.

Ключевые слова: данные дистанционного зондирования Земли, цифровая модель рельефа, сертификационные испытания.

Цифровые модели рельефа (ЦМР) как специфические геопространственные данные по существующей классификации Международного комитета по дистанционному зондированию CEOS относятся к 4 уровню обработки данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗЗ). Уровень требований к точности описания рельефа как системообразующего фактора местности определяется типом научной или инженерно-технологической задачи и методами ее решения. Совершенствование радиометрических и геометрических характеристик приборов сканерного и кадрового типа, устанавливаемых на средствах дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), ставит потребителей перед выбором между наземной съемкой рельефа (дорогостоящей и потому локальной, но геоморфологически упорядоченной) и регулярными растровыми (цифровыми) моделями на значительные районы вплоть до глобального покрытия поверхности Земли (рис. 1).

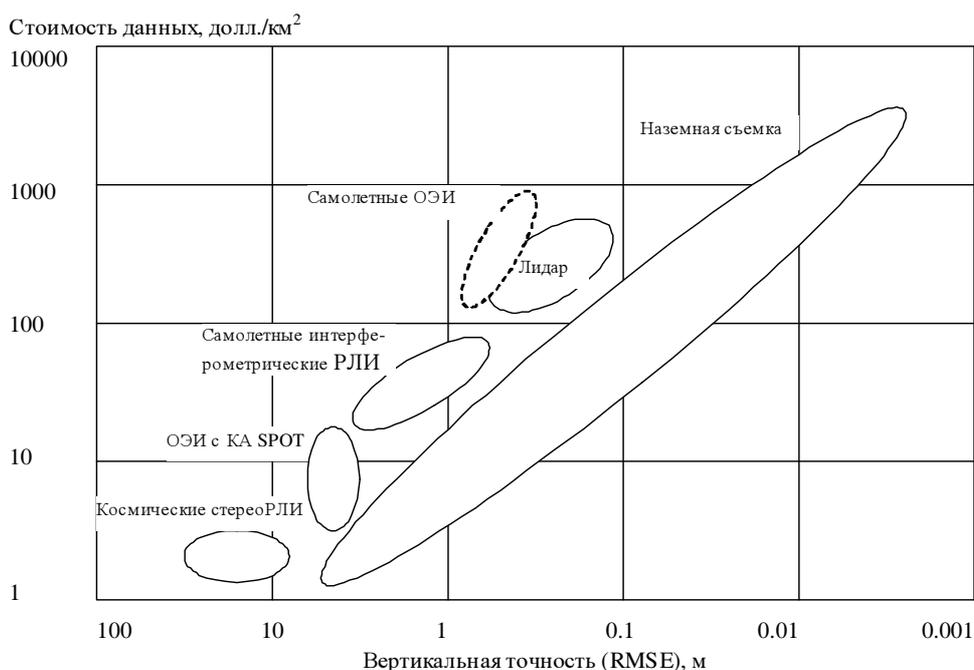


Рис. 1. Оценка стоимости ЦМР в зависимости от источника данных и разрешения

Развитие этого сектора геоинформатики стимулировано решением Международной организации гражданской авиации ICAO об обязательном оснащении воздушных судов системами раннего предупреждения приближения к Земле (Terrain Awareness and Warning System (TAWS)), использующих электронные/цифровые данные о местности. Подобные базы данных о рельефе в составе навигационно-пилотажных комплексов позволяют в процессе полета формировать для экипажа типовые сообщения (звуковые, визуальные, тактильные) об опасных препятствиях, характере рельефа, недопустимой скорости, недостаточной высоты и т.п. Концепция зональной навигации ICAO RNP-RNAV предусматривает использование ЦМР на 4 района, отличающихся по типу характерных манёвров (табл.1). Требования к точности и разрешению ЦМР ужесточаются по мере уменьшения площади района. Государства-члены ICAO обеспечивают наличие с 20.11.2008 г. данных о местности и препятствиях в соответствии со спецификациями для района 1 и данных о местности в соответствии со спецификациями для района 4, с 18.11.2010 г. - для 2 и 3 района.

В условиях отсутствия отечественных нормативных документов по описанию и тестированию ЦМР поставщикам данных ДЗЗ (ДДЗЗ) и органам сертификации необходимо руководствоваться стандартами общего применения [1-11] и отраслевыми стандартами и инструкциями Роскартографии и Военно-топографического управления [12-18], Ростехрегулирования [19-20], Федеральной авиационной службы [21-24]. Поскольку требования ICAO к ЦМР 1 и 2 района аналогичны требованиям к ЦМР DTED Level 1 и DTED Level 2, разрабатываемых в США, то на первоначальной стадии допустимо при разработке методик испытаний учитывать проверенные практикой процедуры описания и подтверждения характеристик ЦМР [25-29]. Отсутствие нормативной базы усугубляется требованиями ICAO по представлению данных ЦМР в системах координат WGS-84 и MSL, что приводит к необходимости пересчета плановых координат и высот по ГОСТ Р 51794-2001.

Таблица 1. Требования к данным о рельефе в системе раннего предупреждения столкновения с землей

<i>Требуемые характеристики ЦМР</i>	<i>Район 1</i>	<i>Район 2</i>	<i>Район 3</i>	<i>Район 4</i>
Информация о рельефе должна быть представлена цифровыми отсчетами высот точек поверхности в угловых или линейных величинах сетки регулярной или нерегулярной формы	Вся территория государства (всей суши)	Территория узлового диспетчерского района (зона диспетчерской ответственности радиусом 45 км от аэродрома)	Территория аэродрома (90 м от центральной линии ВПП, 50 м от внешних границ объектов)	Территория действующих категорий 2 и 3 (посадки и взлета – 60 м от внешней границы ВПП и 900 м от нее).
Интервал (шаг сетки)	3 угл.сек. (~ 90 м)	1 угл.сек. (~ 30 м)	0,6 угл.сек. (~ 20 м)	0,3 угл.сек. (~9 м)
Точность в вертикальной плоскости	30 м	3 м	0,5 м	1 м
Разрешающая способность в вертикальной плоскости	1 м	0.1 м	0.01 м	0.1 м
Точность в горизонтальной плоскости	50 м	5 м	0,5 м	2,5 м
Срок введения ЦМР	20.11.2008	18.11.2010	18.11.2010	20.11.2008
Наиболее вероятный источник ДДЗЗ	Радиолокационные (SRTM)	Радиолокационные (TerраSAR-X), оптикоэлектронные (ALOS, IKONOS)	Лидарная и СРНС-съемка	Лидарная и СРНС-съемка

При обосновании объемов выборки контрольных точек и процедур тестирования необходимо иметь информацию о точностных характеристиках ДДЗЗ, на основе которых формируется ЦМР, и

методах их получения и вторичной обработки. Основными источниками информации о рельефе являются:

- цифровые карты местности (ЦКМ);
- ДДЗЗ от средств оптического диапазона (съемки - фото, оптико-электронные, лидарные) и радиодиапазон (стерео- и интерферометрическая съемка);
- результаты контактной съемки (традиционные геодезические и нивелирные измерения, съемка с помощью спутниковых радионавигационных систем (СРНС)).

Рельеф местности как топографический объект является малоизменяющимся, поэтому низкая актуальность ЦКМ по территории России (10-30%) не играет особой роли, однако на всю территорию имеются ЦКМ только среднего масштаба (1:1 000 000, 1:500 000, 1:200 000). Наиболее точные данные поступают от наземной съемки рельефа (дорогостоящей и потому локальной, но геоморфологически упорядоченной).

Информация о рельефе местности на основе ДДЗЗ извлекается в результате обработки параметров электромагнитного поля (ЭМП) оптического и радиодиапазонов (табл.2). Вследствие большего количества измеряемых параметров ЭМП и большой площади охвата наиболее перспективным источником информации о рельефе следует считать интерферометрические радиолокационные изображения (РЛИ).

Таблица 2. Используемые параметры электромагнитного поля в различных диапазонах

Типы съемок	Используемые параметры электромагнитного поля					
	Временные				Пространственные	
	Амплитуда	Частота	Время задержки	Фаза	Угол распространения	Мгновенное поле зрения
Лазерная локация (активная лидарная съемка)	Амплитуда (коэффициент отражения)	Нет	Да (совместно с амплитудой)	Нет	Угол (размах) сканирования поперек направления полета	Единицы микроардиан
Стереосъемка (пассивная)	Яркость пикселей двух перекрывающихся оптико-электронных изображений (ОЭИ) (коэффициента спектральной яркости)	Нет	Нет	Нет	Параллакс (разность направлений)	Единицы градусов
Стереосъемка (активная)	Яркость пикселей двух перекрывающихся РЛИ (эффективная площадь рассеивания)	Да (доплеровский центроид при синтезе РЛИ)	Да	Нет	Параллакс (разность направлений)	Единицы градусов (ширина диаграммы направленности антенны)
Интерферометрия (активная)	Яркость пикселей двух перекрывающихся РЛИ (эффективная площадь рассеивания)	Да (доплеровский центроид при синтезе РЛИ)	Да	Да	Интерферометрическая база (разность направлений)	Единицы градусов (ширина диаграммы направленности антенны)

В оптическом диапазоне ДДЗЗ для ЦМР получаются в результате стереометрической и лазерной сканирующей съемки (в настоящее время производится с самолетов приборами типа Optech ALTM, Leica ALS, TopoSys FALCON). Примерами стереосъемки являются: однопроходная 2-3 камерами (2 камеры PAN космического аппарата (КА) IRS-P5,-P6; 2 камеры HRS КА SPOT-5, 3 камеры PRIZM КА ALOS, 2 камеры ASTER КА Terra); однопроходная одной камерой с поворотом вдоль трассы и двухпроходная одной камерой с поворотом поперек трассы (КА EROS-A, -B; OrbView-3, QuickBird; IRS-1C, IRS-1D, SPOT-2, SPOT-4, Ресурс-ДК). В радиолокационном диапазоне ДДЗЗ для ЦМР получаются в результате стереометрической и интерферометрической съем-

ки. Стереосъемка вследствие принципиально бокового обзора может быть реализована в форме однопроходной для двух однотипных КА (ERS-1/ERS-2, Radarsat-1/-2, TerraSAR-X/TanDEM-X) и двухпроходной для одного КА (PALSAR КА ALOS, ASAR КА Envisat). Интерферометрическая съемка возможна при размещении на борту носителя двух антенн (подапертур), расположенных вдоль (КА Radarsat-2, самолет Convair-580) и поперек траектории (Shuttle SRTM, самолеты AirSAR, Convair-580, STAR-3i). Лазерная локация (лидарная съемка) осуществляется пока только с самолетов и позволяет не только получать информацию о рельефе за счет регистрации времени задержки, но и цифровые пространственные модели местности за счет регистрации амплитуды (коэффициента рассеяния). Анализ рынка ДДЗЗ показывает, что ЦМР для района 1 и 2 ориентированы на использование результатов топографической съемки SRTM, полученных в ходе полета в феврале 2000 г. Space Shuttle Endeavor STS-99 с двухпозиционным интерферометрическим радиолокатором С- и Х- диапазонов [30]. Эти результаты периодически уточняются в различных версиях ЦМР геологической службы США USGS и агентства NIMA (SRTM-1, SRTM-2 с коррекцией объектов гидрологии - SRTM Water Body Data, SRTM-3 с коррекцией горных участков) на основе ДДЗЗ самолетной радиолокационной и лидарной съемки и контактной СРНС-съемки. Приводимые оценки точности ЦМР SRTM (ошибки по высоте – абсолютные 16 м и относительные 6-10 м (LE90), горизонтальные ошибки – абсолютные 20 м и относительные 15 м (CE90)) являются осредненными по площади (континентам).

Для проверки полноты (территории охвата), целостности и логической согласованности необходима визуализация данных всей сертифицируемой ЦМР, при этом инструментальному контролю для проверки точности может подвергаться часть данных – до 5-10 %. В зависимости от заявляемых параметров ЦМР контрольными точками могут являться: плановые координаты и высоты пунктов государственной геодезической (ГГС), гравиметрической и нивелирной сети; геодезические измерения с помощью аппаратуры СРНС ГЛОНАСС/GPS/Galileo; координаты точечных объектов планово-высотной основы ЦКМ (масштаб должен быть согласован с разрешением ЦМР); ДДЗЗ с точностными характеристиками на порядок лучше проверяемых. Поэтому для лидарной съемки адекватными контрольными наборами данных могут служить только геодезические измерения на основе СРНС. В формирование эталонных ЦМР целесообразно также включать координаты начала и конца взлетно-посадочных полос (ВПП) аэродромов (так называемые «пороги ВПП»). В ЦКМ формата ВТУ ГШ SXF измерительной информацией о рельефе является только значения высот и урезов воды (объекты тематического слоя «Планово-высотная основа» - до 150-200 объектов на номенклатурный лист масштаба 1:200 000), а изолинии являются более или менее точной аппроксимацией для графического отображения рельефа.

Вследствие больших объемов контрольных измерений необходимо применение специализированного программного обеспечения, сертифицированного для этих целей и имеющего следующие типовые функции:

1. Преобразование координат объектов - систем координат СК-42 (СК-95), ПЗ-90 (новая версия ПЗ-90.02) и Балтийской системы высот в WGS-84 и MSL.
2. Импортирование данных и графическое совмещение: а) ЦКМ различных масштабов (слои планово-высотной основы, гидрографии) и типа (векторные, растровые); б) ручной (табличный) ввод координат пунктов ГГС; в) ЦМР общераспространенных и других форматов; г) ДЗЗ (изображения, измерения); д) измерения СРНС-съемки.
3. Формирование эталонных ЦМР для равномерного и БД контрольных точек для неравномерного контроля высот и плановых координат.
4. Вычисление статистических характеристик точности координат объектов по высоте и в плане (абсолютных и относительных ошибок).
5. Регулируемая загрузка ЦМР на экран и в обработку – по файлам, по частям (районам), по номенклатурным листам ЦКМ.
6. Осуществление стандартного контроля данных ЦМР (паспорт, структура, метрика, семантика, топология, сведение ЦМР на соседние районы (табл.3)) на основе «Классификатора карто-

графической информации цифровых и электронных планов городов, топографических, обзорно-географических и авиационных карт» и «Правил цифрового описания картографической информации цифровых и электронных карт».

Таблица 3. Соответствие типовых испытаний ЦМР и элементов качества по ГОСТ Р ИСО 19113-2003

<i>Испытания ЦМР</i>	<i>Применимый элемент качества</i>	<i>Область определения качества данных</i>
Проверка территории охвата ЦМР (корректность структуры файлов, полнота состава паспортных данных, объектового состава, семантических данных, метрических данных)	Полнота (соответствие состава справочных метрических и семантических данных) Тематическая точность	Географический район Правильность классификации
Проверка горизонтальной системы координат	Логическая согласованность (согласованность справочных, метрических и семантических данных)	Концептуальная, доменная, топологическая согласованность и согласованность по формату
Проверка вертикальной системы координат	Логическая согласованность (согласованность справочных, метрических и семантических данных)	Концептуальная, доменная, топологическая согласованность и согласованность по формату
Проверка разрешения в горизонтальной плоскости	Тематическая точность	Правильность классификации Правильность и точность количественных атрибутов
Проверка разрешения по высоте	Тематическая точность	Правильность классификации Правильность и точность количественных атрибутов
Проверка требований к точности в горизонтальной плоскости	Позиционная точность (точность справочных, метрических и семантических данных)	Абсолютная или внешняя точность, относительная или внутренняя точность, точность позиционирования относительно координатной сетки
Проверка требований к точности в вертикальной плоскости	Вертикальная точность (точность справочных, метрических и семантических данных)	Абсолютная или внешняя точность, относительная или внутренняя точность, точность позиционирования относительно координатной сетки
Проверка требований к формату представления	Логическая согласованность (согласованность справочных, метрических и семантических данных)	Концептуальная, доменная, топологическая согласованность и согласованность по формату

Программу и методику испытаний целесообразно разрабатывать на положениях международных и национальных стандартов и руководящих документов Роскартографии и Военно-топографического управления по проверке ЦКМ и требований ИСАО. Так, например, исходя из целевого назначения ЦМР (формирования так называемой «первой поверхности отражения») в качестве контрольных точек целесообразно выбирать именно значения высот, а не впадин. Кроме того, в авиационных правилах полета различают равнинные и горные районы, по которым требуется обеспечение различных точностей ЦМР. Стандарты по метрологии, включая международные, определяют в целом проблему проведения измерений, но не привязанную к конкретному объекту испытаний. Рекомендации по метрологии определяют статистические показатели точности измерений общего применения, которые можно использовать при определении характеристик ЦМР. Таким образом, несмотря на отсутствие отечественных нормативных документов в области ДДЗЗ сертификационные испытания ЦМР возможно проводить на основе документов общего применения.

Литература

1. ГОСТ Р 51794-2001 «Аппаратура радионавигационной глобальной навигационной спутниковой системы и глобальной системы позиционирования. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек».
2. ГОСТ Р ИСО 19105-2003 Географическая информация. Соответствие и тестирование
3. ГОСТ Р ИСО 19113-2003 Географическая информация. Принципы оценки качества
4. ГОСТ Р ИСО 5725-1-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 1. Основные положения и определения
5. ГОСТ Р ИСО 5725-2-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 2. Основной метод определения повторяемости и воспроизводимости стандартного метода измерений
6. ГОСТ Р ИСО 5725-3-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 3. Промежуточные показатели прецизионности стандартного метода измерений
7. ГОСТ Р ИСО 5725-4-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 4. Основные методы определения правильности стандартного метода измерений
8. ГОСТ Р ИСО 5725-5-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 5. Альтернативные методы определения прецизионности стандартного метода измерений
9. ГОСТ Р ИСО 5725-6-2002. Точность (правильность и прецизионность) методов и результатов измерений. Часть 6. Использование значений точности на практике
10. ГОСТ 16263-70 Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Метрология. Термины и определения
11. ГОСТ Р 8.563-96 ГСИ. Методики выполнения измерений
12. ОСТ 68-3.4.1-03 Стандарт отрасли. Карты цифровые. Оценка качества данных. Основные положения.
13. ОСТ 68-3.4.2-03 Стандарт отрасли. Карты цифровые. Методы оценки качества данных. Общие требования.
14. ОСТ 68-3.7.1-03 Цифровые модели местности. Каталог объектов местности. Состав и содержание.
15. ГКИНП (ОНТА)-02-262-02. Инструкция по развитию съемочного обоснования и съемке ситуации и рельефа с применением глобальных навигационных спутниковых систем ГЛОНАСС И GPS. - Федеральная служба геодезии и картографии России
16. Основные положения о государственной геодезической сети РФ ГКИНП (ГНТА)-01-006-03
17. Классификатор тематических задач. Оценки природных ресурсов и окружающей среды, решаемых с использованием материалов дистанционного зондирования Земли. Редакция 7.– Иркутск, Москва 2008. – 52 с. ил.
18. Программа и методики испытаний цифровых и электронных карт РД КЯЕА.2.001-01-2002-ЛЮ
19. Рекомендация МИ 2247-93. ГСИ. Метрология. Основные термины и определения
20. РМГ 43-2001 Рекомендации по межгосударственной стандартизации. Применение Руководства ИСО по выражению неопределенности измерений (взамен МИ 2552-99).
21. Федеральные авиационные правила полетов в воздушном пространстве Российской Федерации.
22. Требования по обработке аэронавигационных данных к процессу обработки и поставки данных по аэродромам, рельефу и препятствиям КТ-200А (аналог RTCA DO-200A/EUROCAE ED76 Requirements for the Aeronautical Data Process, 1999)
23. TSO-C151 Proposed Technical Standard Order. Terrain Awareness and Warning System
24. Руководство по Всемирной Геодезической Системе, 2-е издание (ICAO Doc 9674 AN/946 World Geodetic System 1984 (WGS-84) Manual) 2002
25. Стандарт Министерства обороны США MIL-PRF-89020B NOT 1 Требования к описанию данных цифровой модели высот рельефа (Digital Terrain Elevation Data (DTED)) - National Imagery and Mapping Agency's (NIMA), 2000.
26. Стандарт Министерства обороны США MIL-STD-600001. Точности картографических, плановых и геодезических измерений (Mapping, charting and geodesy accuracy). – Defense Mapping Agency (DMA), 1990. - 54 с.

27. Стандарт Министерства обороны США MIL-D-89000 NOT 1. Данные цифровой модели высот рельефа уровня 1 (DTED Level 1). - DMA, 1990.

28. Стандарт Министерства обороны США MIL-PRF-89001 NOT 1. Данные цифровой модели высот рельефа уровня 2 (DTED Level 2). - DMA, 1990.

29. Standards for Digital Elevation Models (Part 1: General, Part 2: Specifications, Part 3: Quality Control). - U.S. Geological Survey 1998

30. SRTM Documentation. National Aeronautics and Space Administration (NASA) and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA), NASA/JPL, 2000

Methods of the certified test of the digital elevation models based on Earth remote sensing data

A.M. Poletaev

Military space academy of the name A.F.Mozhaysky

Types of the Earth remote sensing data and their accuracy properties as the main sources spatial data about relief are considered. Requirements of digital elevation model (DEM), recommended International Civil Aviation Organization for use on aircrafts, are described. Leading role of radar data in forming of DEM for region 1 and 2 in accordance with categorization of the zonal navigation is determined. The list of normative documents, allowing develop the program and procedure of the certified test DEM, is motivated.

Keywords: Earth remote sensing data, digital elevation model, certified test.