

ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ВЕКТОРНОЙ КАРТЫ АЭРОДРОМА ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА ЕГО ПОВЕРХНОСТИ

В. В. Шустов

ФГУП «Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем»,
г. Москва

Поступила в редакцию 31.05.2015 г.

Аннотация. Рассмотрены вопросы создания векторной карты аэродрома и на ее основе аэродромной картографической базы данных. Дано описание технологии векторизации спутниковых снимков с использованием дуго-узлового подхода к созданию геометрических элементов. Указаны способы обеспечения топологической корректности картографических данных, необходимые для построения маршрутов движения воздушных судов. Приведены примеры создания векторной карты для аэродрома Шереметьево и результаты моделирования движения на аэродроме Домодедово.

Ключевые слова: векторная карта, аэродромная картографическая база данных, топологическая корректность, дуго-узловая структура данных, моделирование движения воздушных судов.

Annotation. The problems of creating a vector map of the aerodrome and on its basis aerodrome map database (AMDB) are considered. The description of vectorization technology of satellite images using edge-node approach to the creation of geometric elements is given. Ways to ensure the map data topological correctness data necessary to build routes of aircraft are shown. Examples of creating vector maps for Sheremetyevo airport and simulation results of traffic on the Domodedovo airport are given.

Keywords: vector map, aerodrome map database, AMDB, topological correctness, edge-node data structure, modeling of aircraft movements.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в связи с повышением интенсивности движения воздушных судов по аэродрому и в связи с повышением требований к безопасности полетов воздушных судов особую актуальность приобрели вопросы создания аэродромных картографических баз данных для использования их в различных приложениях. В частности, база данных аэродрома используется для моделирования движения воздушных судов с целью повышения пропускной способности аэропортов.

Аэродромной картографической базой данных (Aerodrome mapping database – AMDB – в английской транскрипции) является совокупность данных, организованная в

определенную структуру, которая описывает в цифровой форме геометрические и семантические характеристики объектов аэродрома и его элементов. В базе данных хранятся описания таких объектов аэродрома, как взлетно-посадочные полосы (ВПП), рулежные дорожки, перроны, линии руления воздушных судов (ВС), места стоянок и вспомогательная информация. Вспомогательная информация включает сведения о точности и пространственном разрешении данных, их целостности, поставщике данных, свойствах объектов и типах данных.

В работе [1] дано описание использования AMDB в рамках развития усовершенствованных систем управления наземным движением на аэродроме и контроля над ним. Основные вопросы создания действующей аэродромной картографической базы данных и ее использования рассмотрены в работах [2–3].

Классы объектов аэродрома

| код класса | Имя класса (англ.) | Имя класса (русское) | Тип элемента |
|------------|------------------------|-------------------------------|--------------|
| 0 | Runway_Element | Элемент ВПП | polygon |
| 2 | Runway_Threshold | Порог ВПП | point |
| 4 | Painted_centerline | Осевая линия ВПП | line |
| 14 | Taxiway_Element | Элемент рулежной дорожки (РД) | polygon |
| 16 | Taxiway_Guidance_Line | Линия руления на РД | line |
| 21 | Apron_Element | Элемент перрона | polygon |
| 22 | Stand_Guidance_Line | Линия руления на перроне | line |
| 23 | Parking_Stand_Location | Точка стоянки ВС | point |

В рассматриваемой области существуют нормативные документы [4–5], которые регламентируют основные требования к разработке АМДВ. Документ [4] определяет общие принципы создания, структуру и минимальные требования, предъявляемые к аэродромной картографической базе данных. К общим требованиям относятся обязательность представления картографических данных в векторной форме и использование определенной системы координат – WGS-84 [6]. К специальным требованиям относится необходимость использования определенных типов геометрических элементов: точек, линий, полигонов, а также требований, касающихся регламентации расположения соседних элементов – топологические требования. Документ [5] является руководством по разработке протоколов обмена данными применительно к искусственным препятствиям, рельефу земной поверхности и картографической информации по аэродрому.

Для преобразования растровых данных в виде аэрофотоснимков, космических снимков или путем сканирования бумажных карт в векторную форму используются специальные программы-векторизаторы. Они могут быть как отдельными приложениями, так и в составе геоинформационных систем (ГИС) [7].

При создании АМДВ с помощью ГИС каждому объекту базы данных кроме геометрических данных присваиваются также семантические атрибуты, в которые записывается дополнительная текстовая и числовая информация. Информация об атрибутах

объектов аэродрома может быть получена из сборника аэронавигационной информации, инструкции по проведению полетов и других источников.

1. ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К СОЗДАНИЮ АМДВ

При разработке аэродромной картографической базы данных должен быть выполнен ряд требований. База данных по структуре и составу данных должна соответствовать нормативным документам [4]–[5]. В АМДВ должна использоваться всемирная геодезическая система 1984 года (WGS-84), описанная в [6]. Использование данной системы объясняется тем, что она рекомендована для использования международной организацией гражданской авиации.

В соответствии с нормативным документом ИКАО [4] АМДВ должна содержать описание набора из более, чем 30 классов объектов аэропорта, некоторые из которых представлены в табл. 1.

Графические элементы, соответствующие объектам аэродрома, должны быть одного из трех типов: точка (point), линия (line) и многоугольник (polygon).

Элементы точечного типа используется для представления контрольной точки аэродрома, порога ВПП, осветительных мачт и др. Элементы линейного типа используется для описания линий руления, осевой линии ВПП. Элементы площадного типа используется для представления ВПП, рулежных дорожек, перронов и т. д.

В соответствии с нормативными документами должны быть выполнены требования топологической корректности геометрических элементов, описывающих объекты аэропорта. В частности, для объектов площадного типа в местах примыкания объектов друг к другу соответствующие участки границ объектов должны совпадать, т. е. не должно быть щелей между контурами, ограничивающими объекты, и наложений контуров друг на друга. Для объектов линейного типа элементы должны начинаться и заканчиваться в узловых точках, т.е. не должно быть случаев, когда линия не доходит до узловой точки, когда имеется небольшой разрыв между концами двух линий, когда линия проходит через узловую точку без разрыва. Для объектов точечного типа точки стоянок должны совпадать с крайними точками линии руления, подходящими к этим точкам.

Согласно нормативным документам, семантические данные каждого объекта аэропорта должны быть описаны определенным набором атрибутов, включающим имя объекта, качественные и количественные характеристики объекта. Для каждого класса объектов должен быть свой набор семантических данных. В качестве примера табл. 2 указан сокращенный набор атрибутов класса объектов, описывающего ВПП аэродрома.

Для цели моделирования движения воздушных судов и наземных транспортных средств существенным требованием является то, что совокупность линий руления должна образовывать непрерывный граф, который используется для последующего создания маршрутов движения транспортных средств.

2. МЕТОДИКА И ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ ВЕКТОРНОЙ КАРТЫ АЭРОДРОМА

Для создания картографической информации в качестве исходных данных используются спутниковые снимки или аэрофотоснимки. Пример спутникового снимка территории района аэропорта Шереметьево, полученный из интернет-портала Yandex, представлен на рис. 1



Рис. 1. Спутниковый снимок аэропорта Шереметьево

Полученные снимки представляются в растровой форме, удобной для восприятия человеком, но неудобной для автоматизированной обработки и последующего использования в задачах моделирования движения на аэродроме.

Растровая форма представления не позволяет выделить геометрические элементы, которые могут быть сопоставлены объектам аэропорта, таким как ВПП, рулежные дорожки, перроны и т. д. Кроме того, растровое представление данных не позволяет строить маршруты движения, используемые для моделирования движения на аэродроме.

Таблица 2

Список атрибутов класса объектов, описывающего ВПП

| Имя | Описание |
|---------|--|
| featype | Номер класса объектов |
| idarpt | Код аэродрома по ИКАО (пример: UUEE) |
| idrww | Идентификатор объекта (пример: 07L.25R) |
| pcn | Классификационный номер прочности покрытия |
| width | Ширина ВПП |
| length | Длина ВПП |

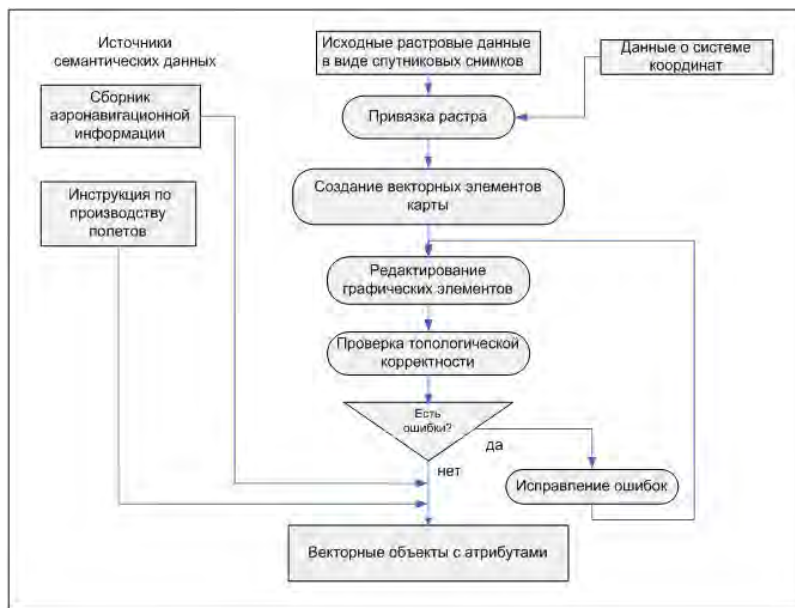


Рис. 2. Основные этапы создание графических объектов

Для выделения графических элементов и установления их связи с семантическими данными необходимо преобразование графической информации, которая содержится в спутниковых снимках, из растрового представления к векторному виду. Этот переход осуществляется в процессе, который называется векторизацией растрового изображения.

В соответствии с векторным подходом все графические элементы, которые сопоставляются реальным объектам местности, делятся на три типа: точечные, линейные и площадные объекты. Совокупность всех элементов, описывающих схожие объекты (например, все рулежные дорожки) группируется в один слой. Кроме того, обычно используется соглашение, что в каждом слое находятся элементы только одного перечисленного выше типа.

Векторные объекты должны удовлетворять определенным топологическим требованиям, заключающимся в соответствии геометрических характеристик элементов, примыкающих друг к другу в пределах одного слоя или нескольких слоев.

Эти представления и соглашения оформлены в виде требований нормативных документов [4]–[5] и в виде требований, описанных в разделе 1.

Основные этапы создания геометрических объектов. Для создания геометрических объектов использован метод векторизации по

растровой подложке, описанный в [7]. В соответствии с этим методом на экран выводится растровое изображение, и с использованием графического указателя и с помощью команд графического редактора создаются контуры объектов, видимых на изображении, путем фиксации точек этих контуров с достаточной точностью. В этом случае задача распознавания объектов, подлежащих векторизации, возлагается на человека. Для отдельных классов объектов, например, линий руления в случае качественных снимков возможна автоматизированная векторизация растровых изображений. Однако в целом системы автоматического распознавания объектов на изображении применительно к задаче выделения элементов инфраструктуры аэродрома в настоящее время пока не достигли уровня практического использования.

Общая схема основных этапов создания графических элементов, соответствующих объектам аэродрома и ввод семантических данных в графическую систему представлен на рис. 2.

На начальном этапе векторизации растровых данных осуществляется привязка изображения к системе координат проекта, которая включает операции смещения, масштабирования и поворота. При этом указывается соответствие двух точек исходного изображения и двух точек прямоугольника проекта,

который соответствует исходному спутниковому снимку. В результате применения операций трансформации растра изображение вписывается в заданный ему прямоугольник территории аэродрома.

Для создания площадных, линейных и точечных объектов используются различные подходы и команды графической среды.

Создание площадных объектов. Площадной объект может представляться либо единым графическим элементом, представляющим последовательность точек ограничивающего его контура, либо набором границ – линейных элементов, расположенных на его границе.

Для создания площадных объектов аэродрома типа ВПП, рулежных дорожек, перронов и т. д. используется представление элементов площадного типа в виде дуго-узловой модели, согласно которой объект представляется связанным набором границ и центроидом – точкой, размещенной внутри этого набора, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Схема создания площадных элементов

При этом подходе вся территория аэродрома разбивается заданными границами на участки, ограниченные линейными элементами, называемые дугами. Дуги начинаются и заканчиваются в узлах. При этом каждый элемент границы создается только один раз. Каждый участок идентифицируется своим центроидом-элементом, имеющим точечный тип и размещенным внутри площадного элемента.

Достоинствами дуго-узловой подхода являются:

- меньшая трудоемкость создания, т. к. границы создаются один раз,
- простота обеспечения топологической корректности,
- простота модификации границ элементов.

Такая структура данных позволяет удобно решать вопросы обеспечения топологической корректности смежных элементов одного или нескольких классов. Корректная дуго-узловая модель не позволяет возникать таким топологическим ошибкам как щели между смежными элементами или наложение этих элементов друг на друга, как показано на рис. 4. Такие ошибки возникают, если контура смежных элементов создаются независимо друг от друга.

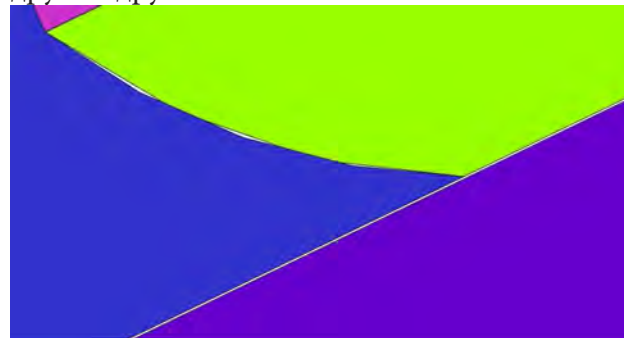


Рис. 4. Топологические ошибки смежных площадных элементов

Для создания корректной дуго-узловой модели площадных элементов используются соответствующие команды среды графического редактора. Выявление и коррекция топологических ошибок, возникающих в процессе векторизации, проводится в интерактивном режиме, как показано на схеме, изображенной на рис. 2.

После создания корректной дуго-узловой модели производится автоматическая сборка границ объектов в единые замкнутые элементы.

Создание линейных объектов. Линейные элементы, соответствующие таким объектам аэродрома как оси ВПП, линии руления на рулежных дорожках, перроны и т.д., представляются последовательностью точек, которые соответствуют с определенным приближением линиям, видимым на спутниковых снимках.

Линии руления должны удовлетворять требованиям, изложенным в разделе 1. В частности, так как они используются далее построения маршрутов движения ВС и НТС, то линии руления также должны образовывать дуго-узловую структуру данных как внутри одного класса объектов, так и в совокупности всех классов линейных объектов. Другими словами можно сказать, что совокупность всех линий руления должна образовывать связный непрерывный граф сетки маршрутов.

В частности, не должно быть недоводов, переводов, нерасчлененности линий руления в узлах, как показано на рис 5.

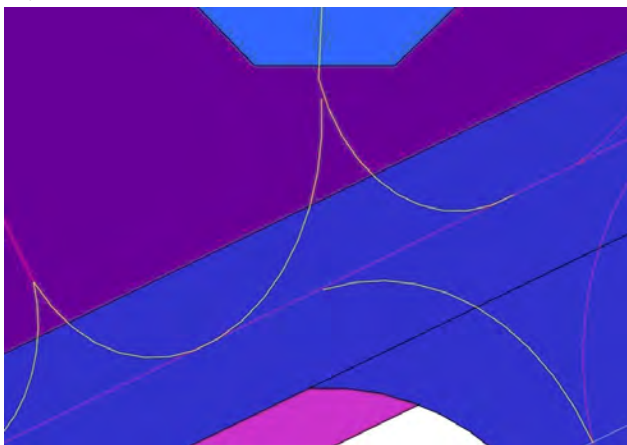


Рис 5. Топологические ошибки смежных линейных элементов

Топологическая корректность линейных элементов обеспечивается технологией их создания, топологической проверкой и процедурой исправления ошибок. В частности, при создании линии руления соответствующая линия начиналась в узловой точке и заканчивалась в другой узловой точке; при этом не допускалось прохода линии через узловую точку без разрыва.

Для проверки топологической корректности совокупности линий руления использовались соответствующие команды графической среды и программы, реализующие разработанные для этой цели алгоритмы проверки. При наличии ошибок их местоположение локализуется и с использованием команд графической среды исправляются. Итерационный цикл «топологическая проверка-исправление ошибок» заканчивается,

когда после очередной проверки ошибки не обнаруживаются, как это показано на рис. 2.

Создание точечных объектов. Точечные объекты, такие как контрольные точки аэродрома, пороги ВПП, стоянки ВС, представляются точечными элементами типа TEXT, имеющими пространственную локализацию в виде точки вставки. Точечные объекты также должны удовлетворять требованиям, изложенным в разделе 1. В частности, точки стоянки ВС должны совпадать с крайними точками линий руления на стоянке. В противном случае маршрут движения ВС не может быть построен.

Пример нарушения топологической корректности точечных и линейных элементов представлен на рис 6, на котором изображены точки стоянки воздушных судов и подходящие к ним линии руления на стоянке. Здесь точки стоянки не совпадают с концами соответствующих участков линий руления.

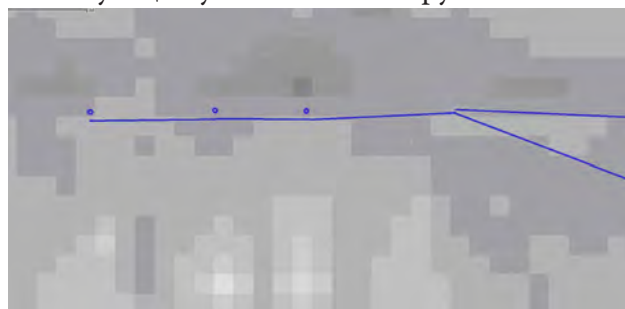


Рис. 6. Топологические ошибки в расположении точечных и линейных элементов

Для создания точечных объектов используется соответствующая команда графического редактора, параметры которой выбираются в зависимости от класса создаваемого объекта и индивидуальных характеристик объекта.

Установление связей и экспорт в СУБД. Объекты аэродрома характеризуются не только геометрическими данными, но и семантическими атрибутами, которые представлены в текстовой форме и хранятся в таблицах внешней базы данных.

Установление связи графического элемента и строки таблицы, хранящей атрибутивную информацию по этому элементу, осуществляется таким образом, что в элемент

записывается значение идентификатора объекта и в определенное поле таблицы записывается значение этого же идентификатора.

Такая связь позволяет для определенного графического элемента находить соответствующую строку СУБД и совершать интересующие пользователя действия с полями этой строки, например, просматривать поле, изменять значение и т.д., используя язык запросов SQL.

С помощью макроса, написанного на встроенном в графическом средстве языке BASIC, в каждый графический элемент всех классов проекта аэродрома вставляется свой идентификатор объекта. В центроиды площадных объектов, содержащих названия этих объектов, также вставлены идентификаторы объектов. Далее средствами графической среды осуществляется сброс привязки с центроида объекта на его контур.

В СУБД может храниться не только атрибутивная информация об объектах, но и геометрические данные об этих объектах, в том числе координаты точек, описывающих эти объекты.

С помощью макроса BASIC для каждого графического элемента проекта выводятся координаты вершин, определяющих этот элемент, в текстовый файл. Для точечного элемента – это одна вершина, для линейных и площадных элементов – это последовательность вершин, представляющих эти элементы.

Данные об объектах аэродрома, которые экспортируются из графической среды во внешний текстовый файл, далее используются для заполнения таблиц аэродромной картографической базы данных, разработанной в СУБД Oracle.

Описание реляционного варианта реализации аэродромной картографической базы данных на платформе СУБД Oracle приведено в работе [3]. Этот способ представления картографических данных по аэродрому выбран и используется для моделирования управляемого движения воздушных судов по аэродрому.

3. ПРИМЕР СОЗДАНИЕ ВЕКТОРНОЙ КАРТЫ АЭРОДРОМА И ЕЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ НА АЭРОДРОМЕ

Описанная технология, основанная на применении на дуго-узловом подходе, использована для создания цифровых векторных карт ряда аэродромов.

Исходная графическая информация в виде спутниковых снимков взята с картографических сервисов, предоставляемых, интернет-порталами Yandex и Google. Разрешение снимков, характеризующееся размером минимального элемента изображения, составляло 0.33–0.67 метров на пиксел.

Семантические данные для объектов аэропорта, в частности, номеров стоянок, наименований рулежных дорожек и другие, взяты из Сборников аэронавигационной информации, выпущенных ФГУП «Центр аэронавигационной информации» [8].

Ниже, на рис. 7 представлен фрагмент векторной карты аэродрома Шереметьево с основными его объектами: взлетно-посадочными полосами, рулежными дорожками, перронами, линиями руления, и точками стоянок ВС, обозначенными их номерами.

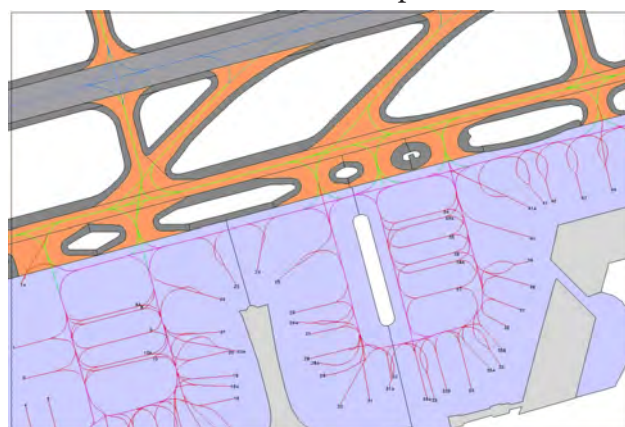


Рис. 7. Фрагмент карты аэродрома Шереметьево

Данные о линиях руления и точках стоянок используются далее для последующего создания маршрутов движения воздушных судов, на основе которых осуществляется моделирование движения воздушных судов по поверхности аэродрома.

На основе созданных векторных карт создана картографическая база данных аэродрома, которая вошла в состав программно-информационного обеспечения комплексного исследовательского стенда моделирования систем управления воздушного движения [9]. Этот стенд позволяет исследовать движение потока ВС на всех этапах их полета и осуществлять процесс моделирования от момента старта ВС со стоянки аэродрома вылета до прибытия на стоянку аэродрома прилета.

В качестве примера на рис. 8 показано отображение ситуации на аэродроме Домодедово при моделировании движения воздушных судов на исследовательском стенде.

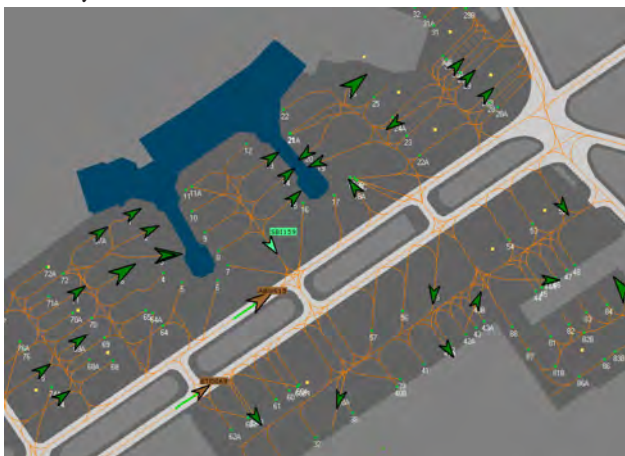


Рис. 8. Отображение ситуации при моделировании на аэродроме Домодедово

На рисунке видны самолеты, которые находятся на стоянках и движутся по заданным маршрутам на рулежных дорожках.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрены основные вопросы создания векторных карт для последующего создания на этой основе аэродромной картографической базы.

В результате проведенной работы разработана технология получения векторных картографических данных, основанная на векторизации растровых изображений и использовании космических снимков. Использование дуго-узлового подхода, технологии создания и программных средств проверки и контроля позволило обеспечить топологическую корректность получаемых данных,

необходимых, в частности, для создания маршрутов движения воздушных судов на поверхности аэродрома.

На основе разработанной технологии и с использованием космических снимков высокого разрешения и данных сборников аэронавигационной информации созданы векторные карты аэродромов Шереметьево, Сочи, Домодедово, Внуково.

Созданная на основе векторных карт аэродромная картографическая база данных используется в составе исследовательского стенда управления воздушным движением для моделирования движения воздушных судов на поверхности аэродрома. Использование AMDB показало ее эффективность, расширяемость и применимость для различных приложений.

Разработанная технология получения картографических данных и аэродромная база данных могут быть использованы в системах поддержки работы диспетчеров в аэропортах, летных тренажерах, системах визуализации на борту воздушного судна, для моделирования движения на аэродроме и для других приложений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фальков Э. Я., Лалетин С. Г. Аэродромные картографические базы данных // *Авиаглобус*. 2005. – № 2. – С. 22–23.
2. Шустов В. В., Канадин В. Н., Дворникова О. Д. Технология проектирования и создания аэродромной картографической базы данных на платформе СУБД Oracle. // *Интеллектуальные системы: труды 11 межд. симпозиума / под ред. К.А. Пупкова*. Россия, Москва, РУДН 30 июня – 4 июля 2014 г. – М.: РУДН, 2014 – С. 274–279.
3. Шустов В. В., Канадин В. Н., Дворникова О. Д. Особенности создания картографической базы данных как геоинформационной модели аэродрома // *Вестник компьютерных и информационных технологий* – 2015. – № 5. – С. 20–28.
4. Guidelines for Electronic Terrain, Obstacle and Aerodrome Mapping Information. ICAO. Doc 9881. [Электронный ресурс].

URL: <http://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014ECARAIM/REF06-Doc9881.pdf> (дата обращения: 20.03.2015).

5. Interchange Standards for Terrain, Obstacle, and Aerodrome Mapping Data. RTCA DO – 291B, 2011 [Электронный ресурс]. URL: http://www.rtca.org/store_product.asp?prodid=630 (дата обращения: 20.03.2015).

6. Руководство по Всемирной геодезической системе – 1984 (WGS-84). [Электронный ресурс]. URL: <http://www.aerohelp.ru/data/432/Doc9674.pdf> (дата обращения: 30.05.2015).

7. Коновалова Н. В., Капралов Е. Г. Введение в ГИС: Учеб. пособие для геогр. спец. ву-

зов – Петрозаводск : Изд. Петрозаводского университета, 1995. – 148 с.

8. Сборник аэронавигационной информации Российской Федерации [Электронный ресурс]. Введ. 2002-04-15. ФГУП ЦАИ ГА. URL: <http://www.caiga.ru/common/AirInter/validaip/html/rus.htm> (дата обращения: 20.03.2015).

9. Бахиркин М. В., Кан А. В., Канадин В. Н. Комплекс полунатурного моделирования интегрированных систем управления воздушным движением // Имитационное моделирование. Теория и практика. ИММОД-2011: сб. тр. СПб., 2011. – С. 39–42.

Шустов В. В. – кандидат технических наук, старший научный сотрудник, ФГУП ГосНИИ авиационных систем.

Тел. 8(499)157-93-46

E-mail: vshustov@gosniias.ru

Shustov V. V. – Ph.D. (Eng.), Senior Researcher, State Research Institute of Aviation Systems State Scientific Center of Russian Federation.

E-mail: vshustov@gosniias.ru