

## **Разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа системы синтетического видения для перспективных объектов авиационной техники**

**Лунев Е.М.\***, **Неретин Е.С.\*\***, **Дяченко С.А.\*\*\***, **Дуброво А.И.\*\*\*\***

*Объединенная авиастроительная корпорация - Центр комплексирования,*

*Авиационный переулок, 5, Москва, 125139, Россия*

*\*e-mail: [e.m.lunev@gmail.com](mailto:e.m.lunev@gmail.com)*

*\*\*e-mail: [evgeny.neretin@gmail.com](mailto:evgeny.neretin@gmail.com)*

*\*\*\*e-mail: [dyachenkosergey33@yandex.ru](mailto:dyachenkosergey33@yandex.ru)*

*\*\*\*\*e-mail: [andrei-dubrovo@yandex.ru](mailto:andrei-dubrovo@yandex.ru)*

### **Аннотация**

Исследуется алгоритм работы прототипа системы синтетического видения (Synthetic Vision System) для формирования трёхмерной модели рельефа в зоне посадки в условиях частичного или полного отсутствия видимости. Рассматриваемый подход позволяет при ограниченных машинных ресурсах и временных затратах восстановить трёхмерный план рабочей области. Разработано программное обеспечение, реализующее предложенный подход.

**Ключевые слова:** летательный аппарат, система синтетического видения, 3D-моделирование, посадка.

### **Введение**

При разработке перспективных объектов авиационной техники (АТ) необходимо обеспечивать выполнение современных и перспективных требований,

предъявляемых к летательным аппаратам (ЛА) 5-го поколения, к характерным чертам которого относятся [5]:

- наличие глубоко интегрированного многофункционального комплекса бортового оборудования нового типа архитектуры с элементами искусственного интеллекта;

- применение композиционных материалов в составе планера, двигателей и других частей ЛА (с целью уменьшения массовых показателей и увеличения прочностных качеств);

- повышение малозаметности в радиолокационном и инфракрасном диапазонах, высокая боевая эффективность при поражении воздушных, наземных и надводных целей, сверхманёвренность и т. д. для самолётов военного назначения;

- экологичность (минимизация выбросов отходов процесса горения, сокращение шумового загрязнения и пр.) для самолётов гражданского и транспортного назначений.

Одной из наиболее существенных характеристик перспективных образцов АТ является высокая степень автоматизации процесса пилотирования ЛА, позволяющая снизить вероятность человеческой ошибки и увеличить безопасность полёта.

По статистике компании *Boeing* [12] наиболее часто крушения ЛА происходят на этапе посадки (48%). Особенно сложным для экипажа является выполнение посадки в условиях низкой видимости, поскольку визуальное восприятие пилотами обстановки за бортом и ключевых наземных объектов значительно затруднено. Одним из средств, снижающих сложность пилотирования при указанных

обстоятельствах и повышающих ситуационную осведомлённость экипажа, является использование системы синтетического видения (ССВ).

ССВ формирует изображение рельефа пролетаемой местности в трёхмерном (3D) исполнении для согласованного его отображения на основном пилотажном дисплее (ОПД) совместно с другой пилотажно-навигационной информацией. Данные, поступающие от навигационных систем (инерциальной и спутниковой навигационной систем, систем радиовысотомера, воздушных сигналов, управления полётом), позволяют определять текущее взаимное расположение ЛА относительно подстилающей поверхности, что необходимо при формировании модели изображения рабочей области. Для реализации ССВ в составе её информационного обеспечения также необходимо иметь базу данных (БД) карты подстилающей поверхности, служащей для описания точек узлов сетки, образующей топографическую карту местности. Каждый элемент БД содержит географическую широту, долготу и высоту узлов сетки [8].

Применение ССВ особенно актуально для обеспечения выполнения безопасной посадки ЛА пилотами различной квалификации вне зависимости от условий видимости в зоне посадки [4].

Известен ряд ССВ, реализованных ведущими производителями авионики (в частности, *Honeywell*, *Rockwell Collins*, *Universal Avionics*, ФГУП «ГосНИИАС») [8, 10, 11, 3]. В качестве иллюстрации работы ССВ на рис. 1 приведён 3D-план ландшафта, сгенерированный ССВ компании *Honeywell* [8].



Рисунок 1 – 3D-план ландшафта, сгенерированный ССВ компании *Honeywell*  
на пилотажно-навигационном кадре

Однако задача формирования данного рода изображений при посадке в сложных метеоусловиях (в частности, для самолётов транспортной категории) требует дополнительных исследований.

Целью работы является разработка программно-алгоритмического обеспечения прототипа ССВ, обеспечивающей повышенную ситуационную осведомлённость экипажа и помощь в принятии решений при заходе на посадку в условиях частичного или полного отсутствия видимости для перспективных гражданских самолётов транспортной категории.

### **Представление объектов в системе синтетического видения**

На начальном этапе разработки ССВ необходимо определить исходные данные, на основе которых будет осуществляться генерирование 3D-плана

ландшафта пролетаемой местности. В качестве источника информации предлагается использование БД системы раннего предупреждения приближения к земле (СРППЗ).

Преимуществом данного подхода являются:

- использование единого источника для формирования различной информации на индикаторах в кабине экипажа, что обеспечивает полную согласованность отображения объектов на информационных кадрах ССВ (в 3D-формате) и СРППЗ (в 2D-формате);

- использование единого уже установленного на борту источника данных, что позволяет создать ССВ без необходимости разработки отдельной БД подстилающей поверхности.

БД СРППЗ представляет собой структурированный набор данных о подстилающей поверхности: координаты широты и долготы узлов сетки, а также максимальную высоту рельефа в каждой области, заключённой между ближайшими узлами. Пример данной сетки представлен на рис. 2.

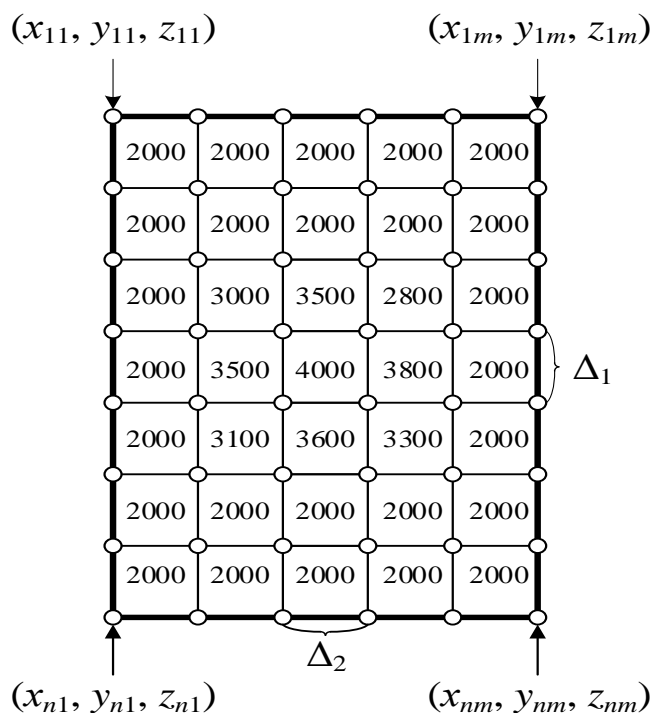


Рисунок 2 – Сетка разбиения карты подстилающей поверхности

Для выполнения 3D-визуализации данной информации необходимо представить закодированный рельеф в виде множества элементарных геометрических фигур. В простейшем случае рабочая область может быть аппроксимирована прямоугольными параллелепипедами, основаниями которых являются прямоугольники, заключённые между ближайшими узлами сетки БД, а их высоты соответствуют значениям максимальных высот рельефа между этими узлами.

Измерения параллелепипеда устанавливаются следующим образом: вершины верхнего основания сформированного  $k$ -го параллелепипеда имеют координаты  $(x_{ij}, y_{ij}, z_k)$ ,  $(x_{(i+1)j}, y_{(i+1)j}, z_k)$ ,  $(x_{i(j+1)}, y_{i(j+1)}, z_k)$ ,  $(x_{(i+1)(j+1)}, y_{(i+1)(j+1)}, z_k)$  (см. рис. 3)

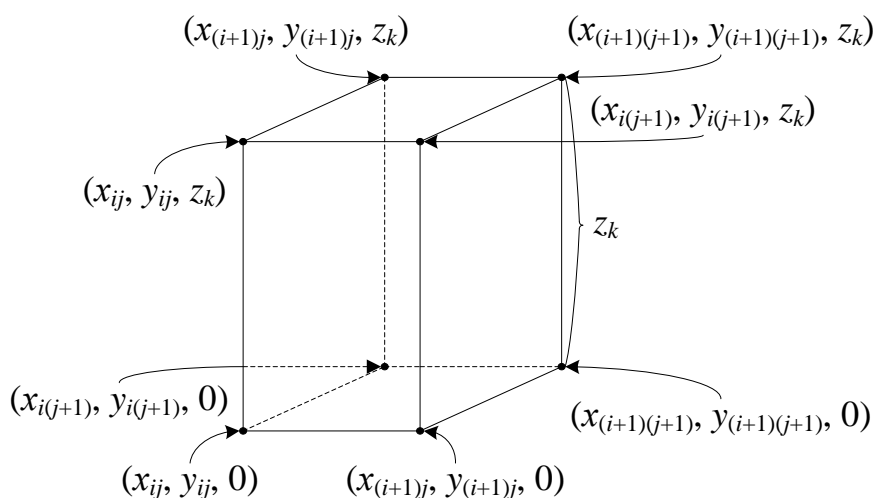


Рисунок 3 – Координаты  $k$ -го прямоугольного параллелепипеда

Для формирования изображения наблюдаемого пилотом аппроксимированного параллелепипедами ландшафта местности с учётом текущего местоположения и ориентации ЛА воспользуемся следующими соотношениями [1].

Проекция каждой вершины  $P$  параллелепипеда на плоскость построения изображения описывается системой уравнений:

$$P_{x'} = -f \frac{A(\theta, \psi, \gamma)_{11}(P_x - S_x) + A(\theta, \psi, \gamma)_{21}(P_y - S_y) + A(\theta, \psi, \gamma)_{31}(P_z - S_z)}{A(\theta, \psi, \gamma)_{13}(P_x - S_x) + A(\theta, \psi, \gamma)_{23}(P_y - S_y) + A(\theta, \psi, \gamma)_{33}(P_z - S_z)},$$

$$P_{y'} = -f \frac{A(\theta, \psi, \gamma)_{12}(P_x - S_x) + A(\theta, \psi, \gamma)_{22}(P_y - S_y) + A(\theta, \psi, \gamma)_{32}(P_z - S_z)}{A(\theta, \psi, \gamma)_{13}(P_x - S_x) + A(\theta, \psi, \gamma)_{23}(P_y - S_y) + A(\theta, \psi, \gamma)_{33}(P_z - S_z)}.$$

где  $P_{x'}$ ,  $P_{y'}$  – координаты отображаемой вершины  $P$  на плоскость построения изображения;  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  – координаты вершины  $P$ ;  $S_x$ ,  $S_y$ ,  $S_z$  – координаты точки проецирования изображения (соответствуют местоположению ЛА);  $f$  – фокусное расстояние системы отображения;  $\theta$  – дирекционный угол оптической оси (элевация);  $\psi$  – продольный угол наклона плана (азимут);  $\gamma$  – угол поворота плана (поворот);  $A(\theta, \psi, \gamma)_{11}, \dots, A(\theta, \psi, \gamma)_{33}$  – элементы матричной функции направляющих косинусов  $A(\theta, \psi, \gamma)$ , зависящей от углов  $\theta$ ,  $\psi$  и  $\gamma$ , вычисляемые по формулам:

$$\begin{aligned} A(\theta, \psi, \gamma)_{11} &= -\cos(\psi) \cdot \cos(\gamma), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{12} &= -\cos(\psi) \cdot \sin(\gamma), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{13} &= \sin(\psi), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{21} &= \cos(\theta) \cdot \cos(\gamma) \cdot \sin(\psi) - \sin(\theta) \cdot \sin(\gamma), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{22} &= \sin(\theta) \cdot \cos(\gamma) + \cos(\theta) \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\gamma), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{23} &= \cos(\theta) \cdot \cos(\psi), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{31} &= -\cos(\theta) \cdot \sin(\gamma) - \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) \cdot \cos(\gamma), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{32} &= \cos(\theta) \cdot \cos(\gamma) - \sin(\theta) \cdot \sin(\psi) \cdot \sin(\gamma), \\ A(\theta, \psi, \gamma)_{33} &= -\sin(\theta) \cdot \cos(\psi). \end{aligned}$$

Восстановив описанным способом изображение рабочей области, аппроксимируемой параллелепипедами, необходимо удалить нелицевые линии. Для решения данной задачи обычно применяются следующие алгоритмы [2, 6, 7, 9]:

1) алгоритм Робертса используется исключительно для выпуклых многогранников и рассматривает внешние нормали к граням тел;

2) алгоритм  $z$ -буфера основан на обобщённой идее буфера кадра. Каждой точке изображения, кроме  $x$ - и  $y$ -измерений, присваивается третья координата  $z$  (глубина), характеризующая расстояние от наблюдателя до прототипа данной точки, лежащего на поверхности объекта;

3) алгоритм «художника» базируется на построении изображения элементов в порядке движения плана от удалённых к близким относительно наблюдателя. В случае экранирования участков сцены невидимые области закрашиваются;

4) алгоритм плавающего горизонта заключается в сведении трёхмерной задачи к двумерной путём пересечения объектов параллельными секущими плоскостями, имеющими постоянные значения координат  $x$ ,  $y$  или  $z$ ;

5) алгоритм Варнока – метод, построенный на свойстве когерентности изображения (тенденции к однородности смежных областей вдоль осей  $x$  и  $y$ ).

Для реализации ССВ в составе бортового оборудования самолётов транспортной категории с учётом особенностей архитектуры используемых в индикаторах вычислителей наиболее подходящим является метод  $z$ -буфера [2]. Блок-схема модифицированного алгоритма, реализующего метод  $z$ -буфера для решения поставленной в работе задачи, приведена на рис. 4.



Используемые обозначения:  $v_{\text{послед. многоуг. сцены}}$  – общее количество многоугольников на сцене;  $v$  – номер текущего многоугольника ( $v \in \mathbb{N}_0, v = \overline{0, v_{\text{послед. многоуг. сцены}}}$ );  $p_{\text{послед. пикс. } v}$  – число пикселей, описывающих  $v$ -ый многоугольник;  $p$  – текущий пиксель  $v$ -го многоугольника ( $p \in \mathbb{N}_0, p = \overline{0, p_{\text{послед. пикс. } v}}$ ).

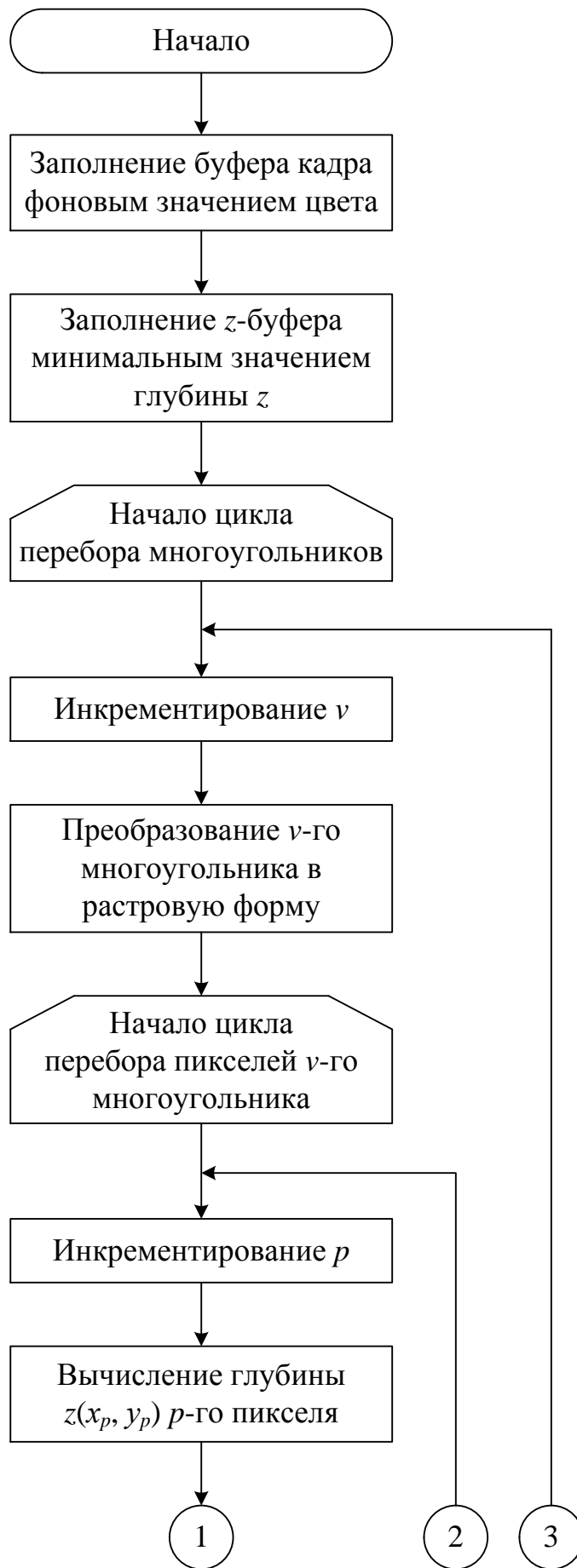


Рисунок 4 – Блок-схема работы алгоритма z-буфера, начало

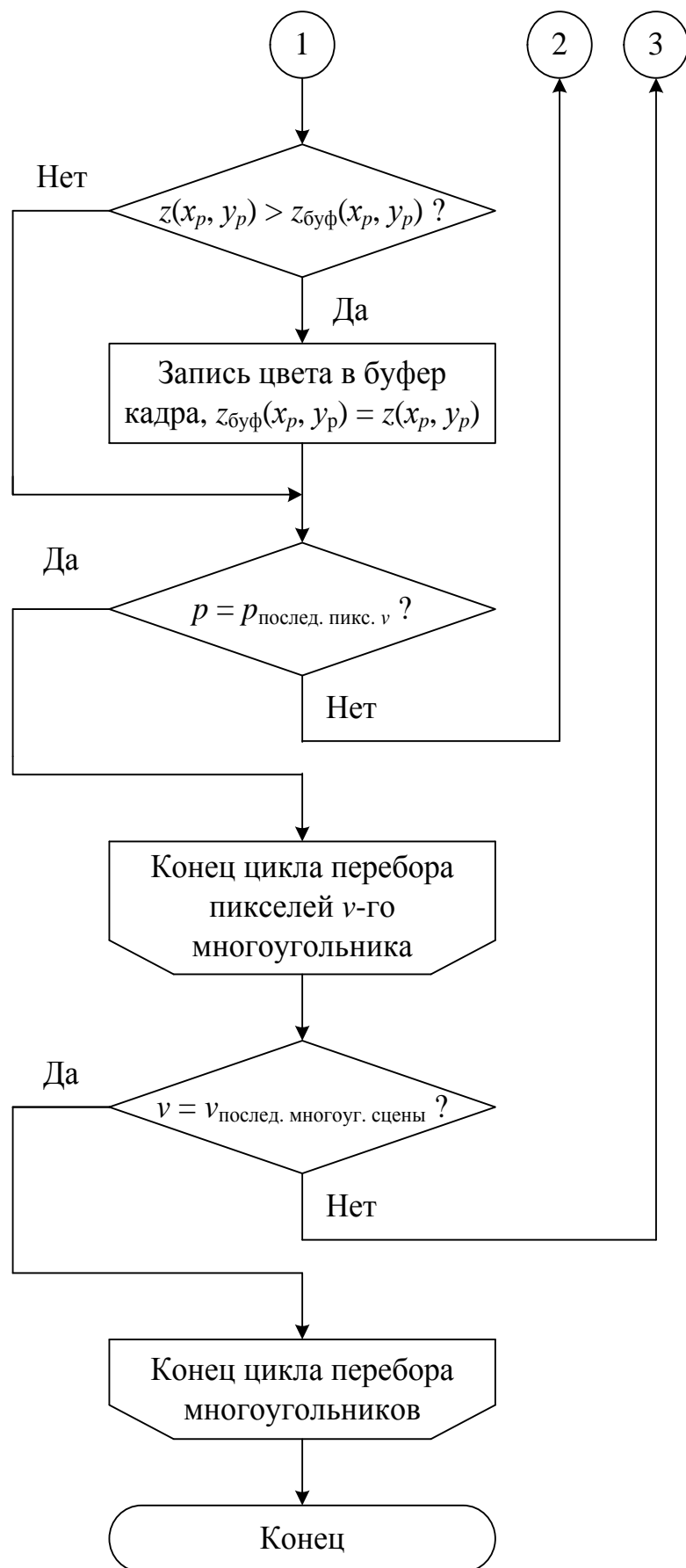


Рисунок 4 (продолжение) – Блок-схема работы алгоритма z-буфера, продолжение

## Результаты работы алгоритма формирования изображения

Предложенный алгоритм реализован в виде программного обеспечения (ПО) в системе аналитических вычислений *MATLAB*. Входными данными для разработанного ПО являются БД подстилающей поверхности (размеры карты  $x_k, y_k, z_k$ , величины шагов  $\Delta_1$  и  $\Delta_2$  сетки разбиения, массивы координат  $X, Y, Z$  узлов сетки) и текущее положение точки наблюдения ( $x_{ЛА}, y_{ЛА}, z_{ЛА}$ ). Результатом работы программы служит 3D-модель рабочей области.

Примером работы созданного ПО является 3D-план зоны посадки, представленной на рис. 5 (вид сверху) со следующими объектами местности: ЦУП – центр управления полётами; РТП – распределительный трансформаторный пункт; ВПП – взлётно-посадочная полоса; ГА – граница аэродрома (ограждение). Моделирование проведено при следующих выбранных начальных условиях:  $x_k = 220$  м,  $y_k = 150$  м,  $\Delta_1 = \Delta_2 = 5$  м,  $x_{ЛА} = -1000$  м,  $y_{ЛА} = -900$  м,  $z_{ЛА} = -150$  м.

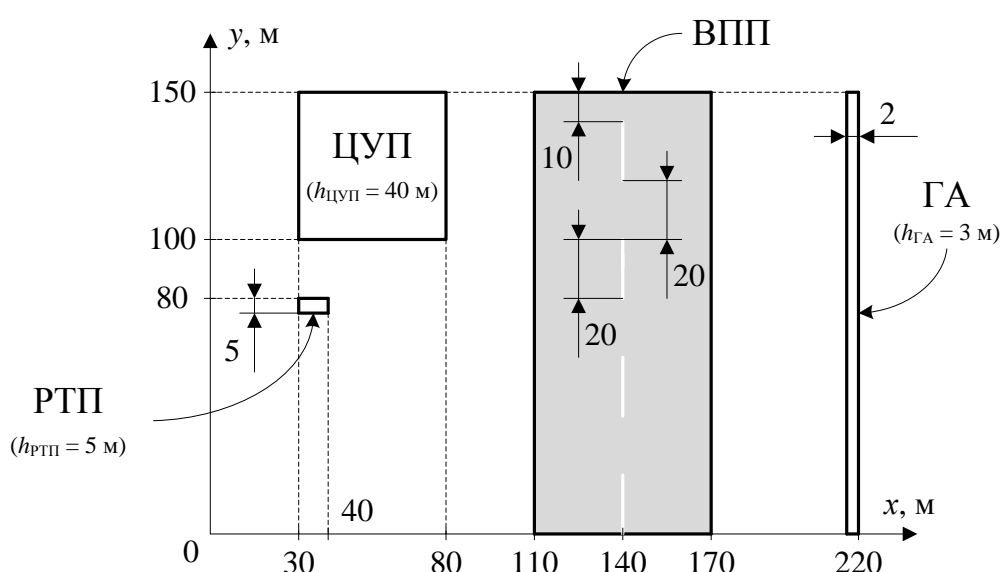


Рисунок 5 – Пример области посадки ЛА с указанием габаритов наземных объектов

Результаты работы ПО изображены на рис. 6.

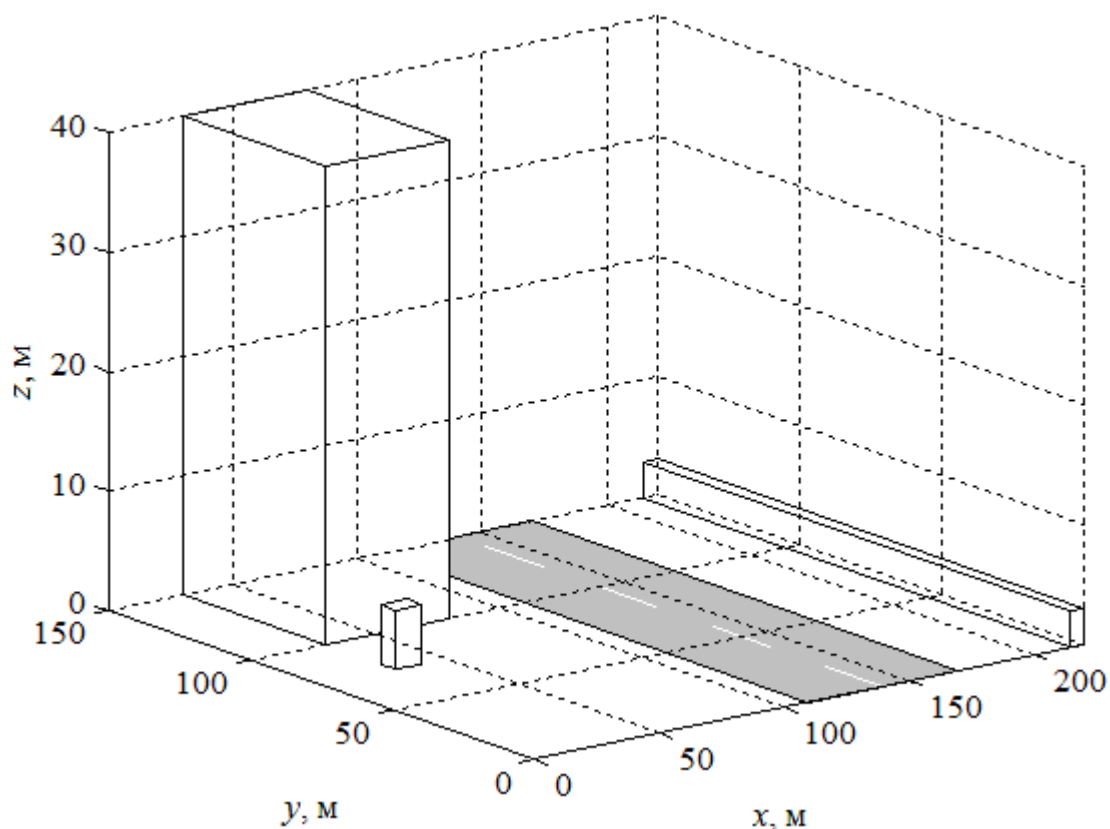


Рисунок 6 – Результаты имитационного моделирования построения изображения с использованием созданного ПО

Результаты моделирования подтвердили работоспособность разработанного программно-алгоритмического обеспечения.

### **Результаты моделирования работы прототипа системы синтетического видения**

Для проведения тестирования работы прототипа системы синтетического видения была проведена серия экспериментов, состоящая из 90 экспериментов. Каждый эксперимент состоял из генерации новой траектории полёта на этапах

захода на посадку и посадки вдоль линии глиссады, а также моделирования 3D-плана ландшафта подстилающей поверхности в каждой точке траектории.

Пример результата работы прототипа ССВ на базе предложенного программно-алгоритмического обеспечения для представленного на рис. 7 фрагмента топографического плана местности в районе аэродрома Инсбрук, показан на рис. 8.

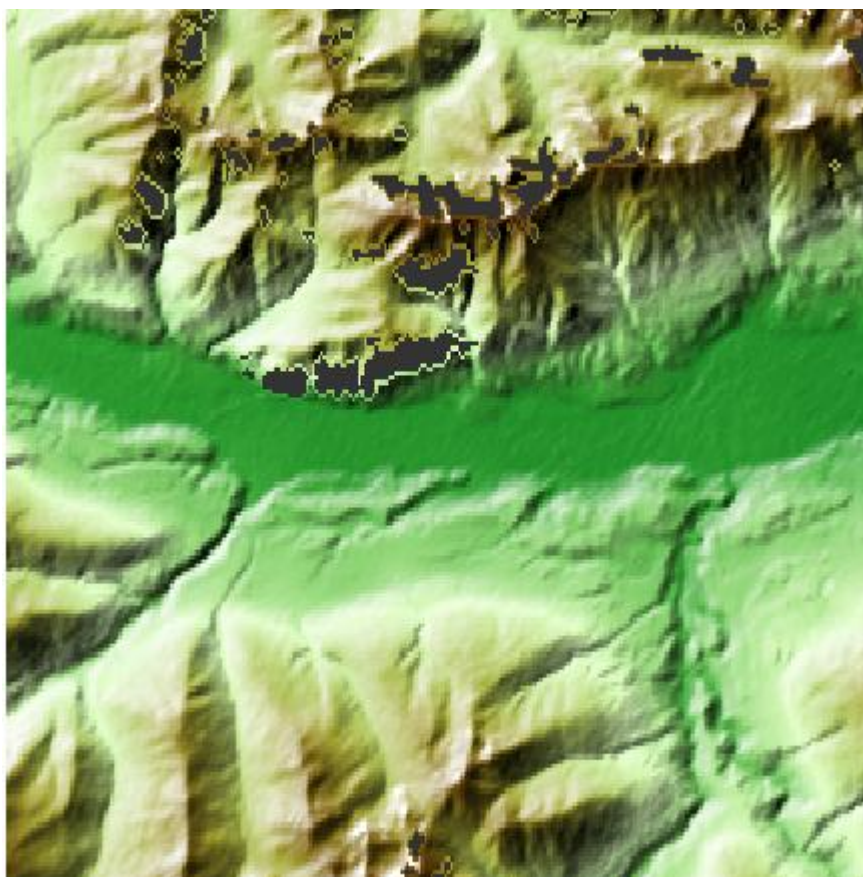


Рисунок 7 – Фрагмент топографического плана местности.

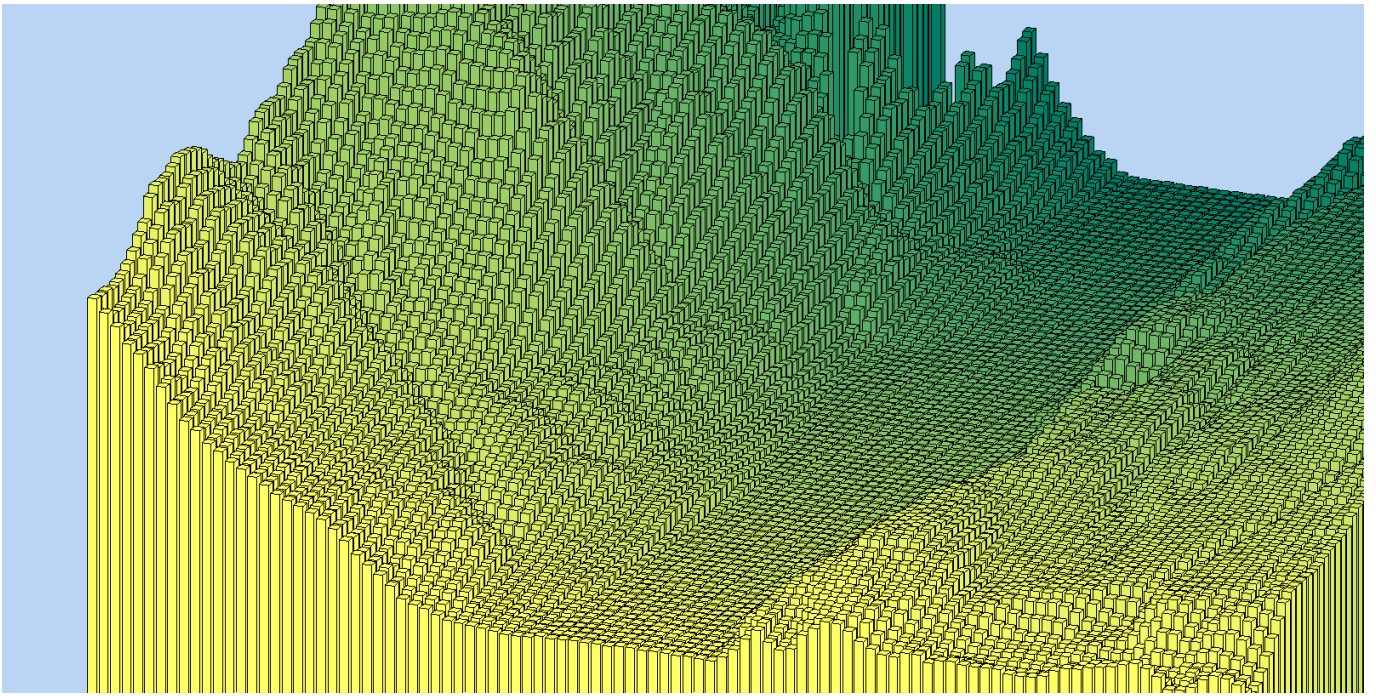


Рисунок 8 – Результат работы прототипа ССВ.

Результаты тестирования прототипа ССВ показали его адекватность и применимость при решении задачи повышения ситуационной осведомлённости экипажа в зоне посадки.

## **Заключение**

В статье предложено программно-алгоритмическое обеспечение прототипа ССВ для перспективных гражданских самолётов транспортной категории, способных под управлением экипажей различной квалификации осуществлять посадку ЛА в сложных метеоусловиях.

Модифицированный алгоритм обеспечивает восстановление 3D-плана ландшафта наблюдаемой подстилающей поверхности на пилотажном информационном кадре из хранящейся в БД СРППЗ информации.

Проведённое моделирование подтвердило работоспособность алгоритма и адекватность полученных решений как на простых примерах, так и на реальных данных из БД СРППЗ. Предложенный подход применим для повышения ситуационной осведомлённости экипажа при заходе на посадку в условиях частичного или полного отсутствия видимости для самолётов транспортной категории.

### **Список использованных источников**

1. Лунев Е.М. Программно-алгоритмическое обеспечение измерительной части системы автоматической посадки БПЛА // Сборник тезисов и докладов научно-практической конференции студентов и молодых учёных МАИ «Инновации в авиации и космонавтике – 2010» 26-30 апреля 2010 года, Москва. С. 51-52.



2. Алгоритм, использующий  $z$ -буфер [Электронный ресурс]. URL: <http://compgraph.tpu.ru/zbuffer.htm> (дата обращения: 07.12.2015).
3. Визильтер Ю.В. Enhanced and synthetic vision system implementation based on IMA platform // Международная научно-практическая конференция «Состояние и перспективы развития интегрированной модульной авионики». 2012. 51 с.
4. Дятлова О.С. К вопросу информационного обеспечения экипажа воздушного судна // Обработка информации и управление. 2011. № 4. С. 24 – 29.
5. Евгенов А.В. Направления развития интегрированных комплексов бортового оборудования самолетов гражданской авиации // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 3. С. 48 – 53.
6. Основные алгоритмы компьютерной графики. URL: <http://bourabai.ru/graphics/02.htm> (дата обращения: 07.12.2015).
7. Роджерс Д. Алгоритмические основы машинной графики: Пер. с англ. / Дж. Адамс. – М.: Мир, 1989. 512 с.
8. Система синтетического видения для пилотов. URL: <http://www.ato.ru/content/sistema-sinteticheskogo-videniya-dlya-pilotov> (дата обращения: 07.12.2015).
9. Шапиро Л. Компьютерное зрение: Пер. с англ. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2013. - 752 с.
10. McKenna E. Synthetic Vision Systems // Avionics Magazine. 2012. no 5. 58 p.

11. Pro Line 21™ Synthetic Vision System (SVS) | Rockwell Collins. – U. S.: Rockwell Collins, Inc. 2011. 2 p.

12. Statistical Summary of Commercial Jet Airplane Accidents | 1959 – 2014. – U. S.A.: Boeing Commercial Airplanes. 2015. 24 p.