

Научная статья

УДК 004.94

URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176860>

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ УГЛА НАКЛОНА НЕОБОРУДОВАННОЙ ПОСАДОЧНОЙ ПЛОЩАДКИ БЕСПИЛОТНОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ВЕРТОЛЕТНОГО ТИПА НА ОСНОВЕ ИНФОРМАЦИИ ЦИФРОВОЙ КАРТЫ МЕСТНОСТИ**

**Павел Григорьевич Ермаков<sup>1</sup>✉, Вениамин Николаевич Евдокименков<sup>2</sup>,  
Александр Андреевич Гоголев<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Россия

<sup>3</sup>Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, ГосНИИАС, Москва, Россия

<sup>1</sup>[pavel-ermakov-1998@mail.ru](mailto:pavel-ermakov-1998@mail.ru)✉

<sup>2</sup>[vnevdokimenzov@gmail.com](mailto:vnevdokimenzov@gmail.com)

<sup>3</sup>[kirbizz8@yandex.ru](mailto:kirbizz8@yandex.ru)

*Аннотация.* В текущей работе рассматривается определение угла наклона необорудованного вертодрома для определения возможности осуществления посадки беспилотного воздушного судна (БВС) вертолетного типа на него. Для решения данной задачи предполагается использовать цифровую карту местности (ЦКМ) района

выполнения целевой задачи БВС вертолетного типа. В данной статье представлено описание разработанной методики и оптимального алгоритма вычисления угла наклона необорудованного вертодрома с помощью статистической обработки информации ЦКМ. Была проведена верификация предложенного оптимального алгоритма определения угла наклона вертодрома с помощью использования данных о рельефе земной поверхности предполагаемых мест посадки воздушного судна на территории Российской Федерации.

**Ключевые слова:** необорудованный вертодром, цифровая карта местности, метод наименьших квадратов, метод Монте-Карло

**Для цитирования:** Ермаков П.Г., Евдокименков В.Н., Гоголев А.А. Определение угла наклона необорудованной посадочной площадки беспилотного воздушного судна вертолетного типа на основе информации цифровой карты местности // Труды МАИ. 2023. № 132. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=176860>

Original article

## **DETERMINATION OF THE INCLINATION ANGLE OF UNPREPARED LANDING PAD OF UNMANNED AERIAL VEHICLE HELICOPTER WITH A DIGITAL ELEVATION MAP INFORMATION**

**Pavel G. Ermakov<sup>1✉</sup>, Veniamin N. Evdokimenkov<sup>2</sup>, Alexander A. Gogolev<sup>3</sup>**

<sup>1,2,3</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>3</sup>State Institute of Aviation Systems, Moscow, Russia

<sup>1</sup>[pavel-ermakov-1998@mail.ru](mailto:pavel-ermakov-1998@mail.ru)✉

<sup>2</sup>[vnevdokimenkov@gmail.com](mailto:vnevdokimenkov@gmail.com)

<sup>3</sup>[kirbizz8@yandex.ru](mailto:kirbizz8@yandex.ru)

**Abstract.** In the process of the target mission an emergency may occur on the helicopter type unmanned aerial vehicle (UAV) board. So, the problem of an emergency landing of the helicopter type UAV on an unprepared landing pad arises. One of the requirements for an unprepared landing pad is the requirement for a limit value of the inclination angle of a landing pad. The inclination angle of an unprepared landing pad should be no more than  $10^\circ$  based on this requirement. This article describes the problem of a determination of the inclination angle of an unprepared landing pad of the helicopter type UAV with a priori digital elevation map information (DEM). A DEM has such information as: geographic latitude and longitude coordinates of the Earth's surface point, a height of the point of interest and a type of the Earth's surface point. Also, a DEM contains random errors, so a determination of the inclination angle is a statistical problem. The description of the developed technique and the proposed optimal algorithm of a determination of the inclination angle with a priori digital elevation map is given. To test the performance of the developed technique of a determination of the inclination angle with a DEM the special software is constructed. The results of a simulation modelling of the proposed optimal algorithm of determination of the inclination angle of an unprepared landing pad such as: the statistical characteristics of the inclination angle's estimation of an unprepared landing pad and the estimation of a time complexity of the proposed optimal algorithm of determination of the inclination angle are presented. The verification of the developed optimal algorithm of determination of the inclination angle of an unprepared landing pad with the

SRTM – open-source digital elevation map and the OpenStreetMap – web mapping service is completed.

**Keywords:** unprepared landing pad, digital elevation map, least squares method, Monte-Carlo method

**For citation:** Ermakov P.G., Evdokimenkov V.N., Gogolev A.A. Determination of the inclination angle of unprepared landing pad of unmanned aerial vehicle helicopter with a digital elevation map information. *Trudy MAI*, 2023, no. 132. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=176860>

## Введение

Сегодня в связи с бурным развитием беспилотной авиации возникает так или иначе ряд проблем при эксплуатации беспилотного воздушного судна вертолетного типа. Не исключены случаи, когда на борту БВС при выполнении некоторой целевой задачи происходит аварийная ситуация, следовательно, возникает задача осуществления экстренной посадки ЛА на необорудованный вертодром с целью повышения его живучести. Одним из требований к необорудованному вертодрому на основе анализа [1 – 3] является требование по предельному значению угла его наклона: “Угол наклона необорудованного вертодрома в любом направлении к горизонту должен быть не более 10°”.

В настоящей статье рассмотрим задачу вычисления угла наклона необорудованного вертодрома на основе использования априорных данных о районе полета БВС вертолетного типа в виде ЦКМ. Под ЦКМ представляем описание земной поверхности района функционирования БВС в виде квадратной сетки с узлами, которые несут следующую информацию об объекте земной поверхности: высота объекта земной поверхности  $h_{\text{ЦКМ}}$ ; географические координаты объекта земной поверхности  $\varphi_{\text{ЦКМ}}$ ,  $\lambda_{\text{ЦКМ}}$ ; тип объекта земной поверхности (лесная, болотистая, равнинная, холмистая местность, реки, водоемы, гражданская инфраструктура, городская застройка и т.д.).

В качестве общедоступной системы рассматривается цифровой картографический веб-сервис OpenStreetMap, созданный на основе использования спутниковых снимков земной поверхности, аэрофотографий части земной местности и изображений объектов земной поверхности (улицы, дома, водоемы, лесные массивы, болотистые местности и т.д.) [4]. Несмотря на доступность информации сервисов такого типа важно отметить, что при использовании информации стоит учитывать ограничения разрешающей способности карты и наличие позиционных ошибок информации как аддитивного типа (сдвиг координатной сетки в местах ограниченного доступа – военные объекты), так и случайных. В исследовании [5] приводится оценка точностных характеристик позиционной информации OpenStreetMap, в частности: СКО ошибки позиционной информации не превышает 2 м, разрешающая способность карты – 20 м. Для получения информации о некотором районе земной поверхности можно, например, написать следующий запрос OverpassQL (Рисунок 1):

```
[out:json][timeout:25];
(
  way["landuse"="meadow"](55.1,44.1,55.9,44.9);
);
out body;
>;
out skel qt;
```

Рисунок 1 – Пример запроса OverpassQL

Ключом для описания типа объекта земной поверхности является “landuse”. Значениями этого ключа могут быть: “meadow” – луг; “forest” – лесной массив; “commercial” – коммерческие зоны, бизнес районы; “education” – объекты образовательной сферы; “port” – портовая зона и т.д. Одним из результатов данного запроса будет являться упорядоченный список nodes, включающий в себя программные объекты типа Node. Каждый объект Node содержит такую информацию о некоторой точке земной поверхности как: id Node, lat (географическая широта), lon (географическая долгота).

Помимо информации о поверхности общедоступной является и цифровая модель рельефа Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) [6] высокой разрешающей способности. Цифровая модель земного рельефа заключена в ограниченную область ( $1^\circ$  с/ю ш. x  $1^\circ$  в/з д.), разрешение которой составляет 30 м. Исследователями в [7] была проведена оценка точности высотной информации цифровой модели рельефа SRTM: СКО систематической ошибки высоты рельефа земной поверхности не превышает 2 м. для пересеченного рельефа и 1,5 м. для плоскоравнинного; СКО случайной ошибки высоты рельефа земной поверхности не превышает 1,5 м. для пересеченного рельефа и

1 м. для плоскоравнинного. В [8 – 12] отмечается, что причинами данных ошибок могут являться следующие факторы:

- 1) Старение данных ЦКМ, недостаточная плотность измерений (отбора информации) данных ЦКМ;
- 2) Неточное рассмотрение или неправильная регистрация высоты земной поверхности;
- 3) Формат представления чисел в ЭВМ, вычислительные ошибки, связанные с интерполяцией/экстраполяцией данных ЦКМ.

Таким образом, учитывая вышесказанное, имеем задачу статистической обработки высотной информации рельефа земной поверхности района полета БВС вертолетного типа для вычисления угла наклона необорудованного вертодрома.

**Решение задачи вычисления угла наклона необорудованного вертодрома с помощью использования высотной информации цифровой карты местности**

## **1. Сортировка потенциальных необорудованных вертодромов на основе данных ЦКМ**

Прежде чем осуществлять непосредственное вычисление угла наклона необорудованного вертодрома необходимо его найти на ЦКМ с учетом перечисленных выше трех требований. Количество ячеек ЦКМ, занимаемых необорудованным вертодромом, будем вычислять на основе  $sz = \lceil 1,5D / dscr \rceil$ ,  $dscr$  – дискретность используемой ЦКМ. Процесс сортировки ЦКМ необорудованного вертодрома на ЦКМ определим как:

- 1) Определим область ЦКМ, в которой может находиться необорудованный вертодром, как область размера  $sz \dots N - sz \times sz \dots N - sz$ ,  $N$  – общее количество ячеек ЦКМ;
- 2) Рассмотрение некоторой начальной области  $\Omega_0$  необорудованного вертодрома и области до  $1,5D$  за его пределами на ЦКМ. Координаты данной области на ЦКМ:  $[i_{min\Omega} \dots i_{max\Omega}, j_{min\Omega} \dots j_{max\Omega}]$ ,  $i_{min\Omega} = j_{min\Omega} = 1$ ,  $i_{max\Omega} = j_{max\Omega} = 3sz - 2$ .  
Координаты начального вертодрома на ЦКМ:  $[i_{minH} \dots i_{maxH}, j_{minH} \dots j_{maxH}]$ ,  
 $i_{minH} = j_{minH} = sz$ ,  $i_{maxH} = j_{maxH} = 2sz - 1$ ;
- 3) Проверка в области  $[i_{min\Omega} \dots i_{max\Omega}, j_{min\Omega} \dots j_{max\Omega}]$  следующего условия:  
 $node[i, j].type \neq ProhibType, \forall i, j \in [i_{min\Omega} \dots i_{max\Omega}, j_{min\Omega} \dots j_{max\Omega}]$   
 $node$  – текущий узел ЦКМ;  
 $type$  – тип объекта земной поверхности текущего узла ЦКМ;  
 $ProhibType$  – список запрещенных типов объектов земной поверхности для совершения посадки воздушного судна;
- 4) В случае выполнения условия в п.3 происходит запоминание координат текущего вертодрома на ЦКМ:  $i_{minH}, i_{maxH}, j_{minH}, j_{maxH}$ . Инкремент  $j_{minH}, j_{maxH}, j_{min\Omega}, j_{max\Omega}$ .
- 5) В противном случае рассматривается следующая область  $\Omega_{next}$  на ЦКМ  $[i_{min\Omega} \dots i_{max\Omega}, j_{min\Omega} \dots j_{max\Omega}]$ ,  $j_{min\Omega} = ind_{proh} + 1$ ,  $j_{max\Omega} = j_{max\Omega} + ind_{proh}$  и необорудованный вертодром  $[i_{minH} \dots i_{maxH}, j_{minH} \dots j_{maxH}]$ ,  $j_{minH} = j_{min\Omega} + sz - 1$ ,



$j_{maxH} = j_{minH} + sz - 1$ ,  $ind_{proh}$  – индекс узла ЦКМ с запрещенным типом объекта земной поверхности, находящийся в предыдущей рассмотренной области  $\Omega_{prev}$ ;

- 6) Повтор п. 3 – 5 до достижения  $j_{max} = N - size$ . После достижения крайних правых узлов ЦКМ следует рассмотрение области  $\Omega$  на ЦКМ  $[i_{min\Omega} \dots i_{max\Omega}, j_{min\Omega} \dots j_{max\Omega}]$ ,  $i_{min\Omega} = i_{min\Omega} + 3sz - 2$ ,  $i_{max\Omega} = i_{max\Omega} + 3sz - 2$ ,  $j_{min} = 1$ ,  $j_{max} = 3sz - 2$  и вертодрома  $[i_{minH} \dots i_{maxH}, j_{minH} \dots j_{maxH}]$ ,  $i_{minH} = i_{minH} + 3sz - 2$ ,  $i_{maxH} = i_{maxH} + 4sz - 3$ ,  $j_{minH} = sz$ ,  $j_{maxH} = 2sz - 1$ ;
- 7) Повтор п. 3 – 6 до достижения  $i_{max} = N - sz$  и  $j_{max} = N - sz$ . После достижения крайних правых нижних узлов ЦКМ будет сформирован набор разрешенных необорудованных вертодромов для совершения посадки БВС вертолетного типа.

## 2. Алгоритм оптимального оценивания угла наклона необорудованного вертодрома на основе данных ЦКМ

Вычисление угла наклона необорудованного вертодрома происходит на основе итерационного соотношения метода наименьших квадратов [13 – 16]:

$$\hat{\alpha}_{i+1} = \hat{\alpha}_i + (H_i^T K^{-1} H_i)^{-1} H_i^T K^{-1} (Y - F(\hat{\alpha}_i)); \quad (1)$$

где:

$\hat{\alpha}_i$  – оценка угла необорудованного вертодрома на  $i$ -м шаге;

$K$  – ковариационная матрица измерений высот ЦКМ, размерность  $2(sz + 1) \times 2(sz + 1)$ ;

$$K = \text{diag}(\sigma_{\delta h}^2 \sigma_{\delta h}^2 \dots \sigma_{\delta h}^2);$$

$\sigma_{\delta h}$  – СКО случайной аддитивной ошибки ЦКМ в измерении высоты объекта земной поверхности, м;

$F(\hat{\alpha}_i)$  – вектор – столбец опорных измерений высоты объекта земной поверхности относительно горизонтальной поверхности необорудованного вертодрома на  $i$ -м шаге, размерность  $2(sz + 1) \times 1$ ;

$$F(\hat{\alpha}_i) = \begin{pmatrix} 1.5D\sqrt{2}tg\hat{\alpha}_i \\ 1.5D\sqrt{2}tg\hat{\alpha}_i \\ 1.5Dtg\hat{\alpha}_i \\ \dots \\ 1.5Dtg\hat{\alpha}_i \end{pmatrix};$$

$D$  – диаметр несущего винта БВС вертолетного типа, м;

$H_i$  – Якобиан на  $i$ -м шаге, размерность  $2(sz + 1) \times 1$ ;

$$H_i = \begin{pmatrix} \frac{\partial F(D, \hat{\alpha}_i)_1}{\partial \hat{\alpha}_i} \\ \frac{\partial F(D, \hat{\alpha}_i)_2}{\partial \hat{\alpha}_i} \\ \frac{\partial F(D, \hat{\alpha}_i)_3}{\partial \hat{\alpha}_i} \\ \dots \\ \frac{\partial F(D, \hat{\alpha}_i)_{2(sz+1)}}{\partial \hat{\alpha}_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.5D\sqrt{2}/\cos^2\hat{\alpha}_i \\ 1.5D\sqrt{2}/\cos^2\hat{\alpha}_i \\ 1.5D/\cos^2\hat{\alpha}_i \\ \dots \\ 1.5D/\cos^2\hat{\alpha}_i \end{pmatrix};$$

$Y$  – вектор – столбец измерений высоты одного объекта земной поверхности относительно другого на основе ЦКМ, размерность  $2(sz + 1) \times 1$ ;

$$Y = \begin{pmatrix} |h_{A_1} - h_{D_1}| \\ |h_{B_1} - h_{C_1}| \\ |h_{A_2} - h_{D_{sz-1}}| \\ \dots \\ |h_{A_{sz-1}} - h_{D_2}| \\ |h_{B_2} - h_{C_{sz-1}}| \\ \dots \\ |h_{B_{sz-1}} - h_{C_2}| \end{pmatrix}.$$

$A_1, A_2, \dots, A_{sz-1}, B_1, B_2, \dots, B_{sz-1}, C_1, C_2, \dots, C_{sz-1}, D_1, D_2, \dots, D_{sz-1}$  – условное

наименование объектов земной поверхности, расположенных на поверхности необорудованного вертодрома.

По окончании процесса получения оценки угла наклона необорудованного вертодрома необходимо показать меру насколько данный вертодром подходит по его предельному значению угла наклона к горизонту. С учетом того факта, что оценка угла наклона необорудованного вертодрома является случайной величиной, следовательно, определение данной меры возможно с некоторой вероятностью. В текущей работе вычисление вероятности происходит на основе анализа гистограммы оценки угла наклона необорудованного вертодрома, полученной с помощью метода Монте-Карло [17 – 19]:

$$p_1 = P(0^\circ \leq \alpha \leq 10^\circ) = \sum_{i=1}^N \frac{n_i}{R} \quad (2)$$

где:

$n_i$  – количество реализаций угла наклона вертодрома, попавших в  $i$ -ый интервал гистограммы;

$R$  – общее количество реализаций угла наклона вертодрома;

$N$  – количество столбиков гистограммы ( $N$ ), попавших в диапазон  $[0^\circ, 10^\circ]$ .

Методика определения угла наклона необорудованного вертодрома на основе ЦКМ запишется как:

- 1) Осуществление сортировки потенциальных необорудованных вертодромов на основе данных ЦКМ;
- 2) Применение разработанного оптимального алгоритма оценивания угла наклона поверхности необорудованного вертодрома;

3) Определение вероятности пригодности необорудованного вертодрома для осуществления посадки БВС вертолетного типа.

### **3. Имитационное моделирование алгоритма оптимального оценивания угла наклона необорудованного вертодрома с использованием высотной информации ЦКМ**

Точностные параметры математической модели ЦКМ и алгоритма оптимального оценивания угла наклона необорудованного вертодрома при проведении имитационного моделирования были приняты следующими:

- ✓  $\sigma_{\delta h} = 1$  [м] – СКО случайной аддитивной ошибки высоты земной поверхности ЦКМ;
- ✓  $N = 8, 14, 18, 20, 22$  [шт] – количество отрезков, разбивающих необорудованную посадочную площадку;
- ✓  $\varepsilon = 10^{-3}, 10^{-8}, 10^{-12}, 10^{-32}$  [ед] – априорная точность алгоритма оценивания угла наклона необорудованной посадочной площадки;
- ✓  $dscr = 1$  [м] – дискретность используемой ЦКМ.

Имитационное моделирование разработанного алгоритма проводилось на персональном компьютере со следующими характеристиками:

- ✓ Операционная система: *Windows 11 Pro, x64*;
- ✓ Оперативная память: 16Gb LPDD3 2133 MHz;
- ✓ Центральный процессор: Intel® Core™ i7-8565U CPU@1.80GHz 1.99GHz.

Получение точностных характеристик оценки угла наклона неподготовленной площадки и вычислительных затрат разработанного алгоритма было произведено путем массированного имитационного моделирования функционирования алгоритма оценивания угла наклона вертодрома при разных значениях  $N$  и  $\varepsilon$  (Рисунок 2).

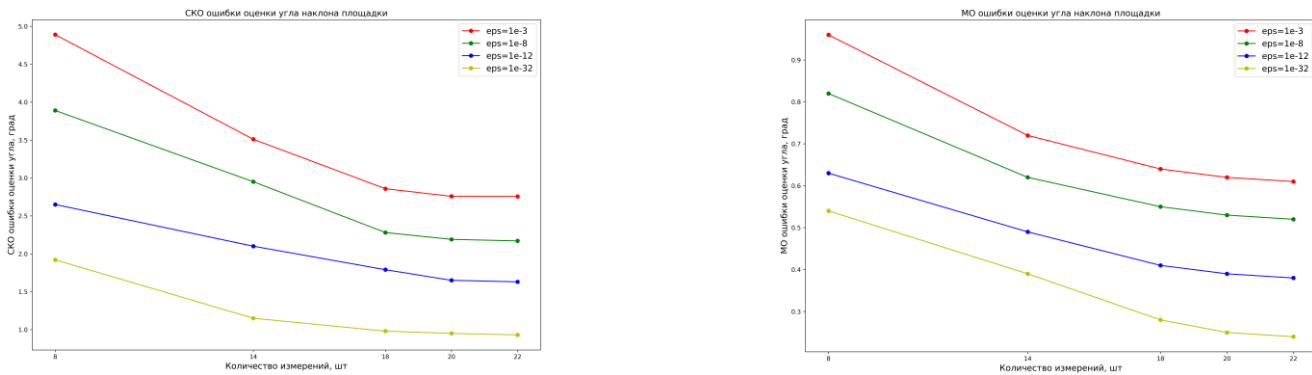


Рисунок 2 – Точностные характеристики оценки угла наклона необорудованного вертодрома  
 Далее приведена оценка временных затрат разработанного алгоритма (Рисунок 3).

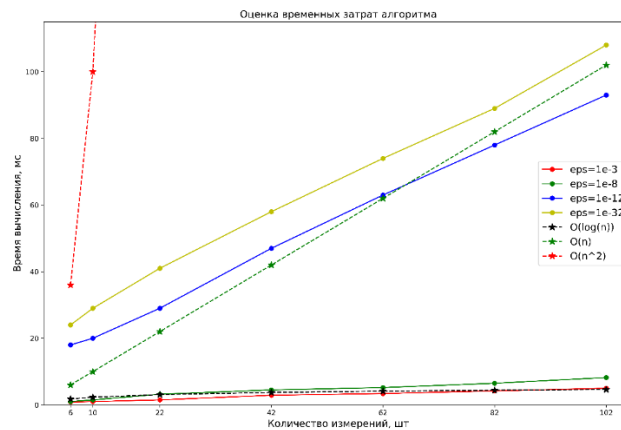


Рисунок 3 – Оценка временных затрат алгоритма оценивания угла наклона необорудованного вертодрома  
 На основе полученных результатов можно сделать следующие выводы:

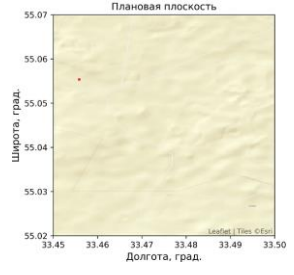
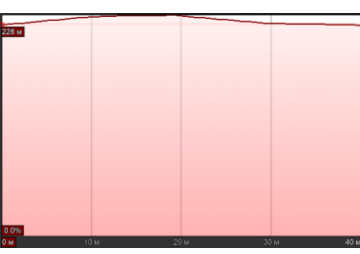
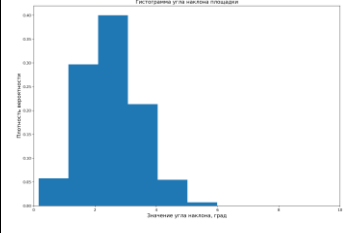
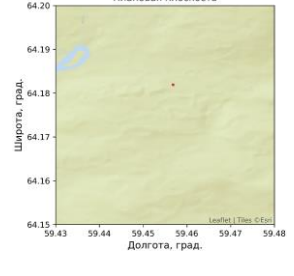
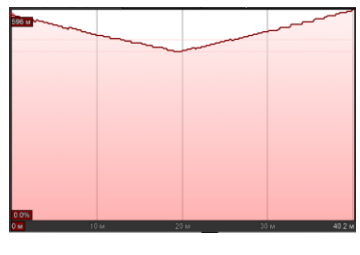
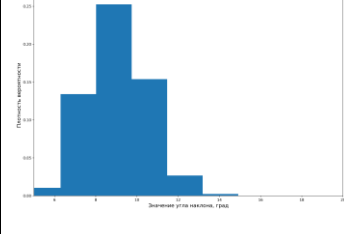
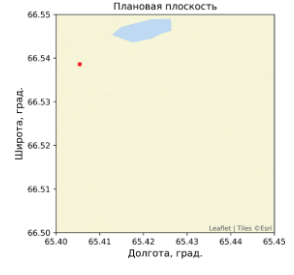
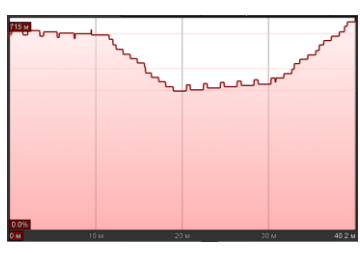
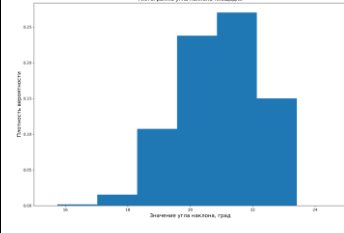
- ✓ Для оптимизации вычислительных ресурсов алгоритма оценивания угла наклона неподготовленного вертодрома в принципе можно ограничиться использованием некоторым граничным числом  $N_{гр}$  отрезков, разбивающих необорудованный

вертодром, так как СКО и МО ошибки оценки угла наклона вертодрома с последующим ростом количества отрезков уменьшаются на сотые доли градуса;

- ✓ Вычислительная сложность разработанного алгоритма оценки угла наклона вертодрома для значений априорной точности  $\varepsilon$ :  $10^{-3} - 10^{-8}$  относится к сложности  $O(\log(N))$ , а для  $\varepsilon$ :  $10^{-12} - 10^{-32}$  соответствует сложности  $O(N)$ .

Верификация разработанной методики определения угла наклона неподготовленного вертодрома была произведена с использованием данных SRTM и OpenStreetMap. Так, предполагаемые необорудованные вертодромы были взяты на равнинной, предгорной и гористой местностях Российской Федерации. Ниже представлен результат работы разработанного алгоритма определения угла наклона вертодрома на выбранных местностях (Таблица 1).

Таблица 1 – Результат верификации разработанного оптимального алгоритма определения угла наклона вертодрома

Предполагаемое место вертодрома	Плановая плоскость	Рельеф земной поверхности	Гистограмма оценки угла наклона	Значение $p_1$
Равнинная местность –55°05'36.48'' ш., 33°45'28.46'' в.д., Российская Федерация, Смоленская область, Сафоновский район				1
Предгорная местность –64°18'17.50'' ш., 59°45'35.69'' в.д., Российская Федерация, Республика Коми, городской округ Вуктыл				0,56
Гористая местность –66°53'57.33'' ш., 65°40'34.28'' в.д., Российская Федерация, Импло-Ненецкий автономный округ, поселок городского типа Харп				0

### Закключение

Таким образом, на основе представленного выше материала текущей статьи можно сделать следующие выводы:

1. Предложена методика определения угла наклона необорудованного вертодрома с помощью высотной информации цифровой карты местности;
2. Создано специальное программно-математическое обеспечение, которое моделирует функционирование методики определения угла наклона необорудованного вертодрома на основе статистической обработки информации цифровой карты местности;
3. Проведенная верификация изложенной методики определения угла наклона необорудованного вертодрома не противоречит теоретическим знаниям о величинах уклонов разных типов земной поверхности [20].

#### **Список источников**

1. Приложение 14 к Конвенции о международной гражданской авиации. Аэродромы. Том II Вертодромы. Международная организация гражданской авиации. Издание четвертое. Июль 2013. URL: [https://www.airfield-lights.com/docs/files/annex14v2\\_2013.pdf](https://www.airfield-lights.com/docs/files/annex14v2_2013.pdf)
2. Альханов Д.С., Кузурман В.А., Гоголев А.А. Оптическое детектирование перспективных посадочных зон для беспилотного воздушного судна вертолетного типа с помощью самоорганизующихся карт Кохонена // Вестник Московского авиационного института. 2020. Т. 29. № 3. С. 209-221. DOI: [10.34759/vst-2022-3-209-221](https://doi.org/10.34759/vst-2022-3-209-221)
3. Ермаков П.Г. Определение угла наклона необорудованной посадочной площадки беспилотного воздушного судна на основе априорной информации цифровой карты местности // XLIX Международная молодежная научная конференция “Гагаринские чтения”: сборник трудов. Москва, 11-14 апреля 2023 г.



4. OpenStreetMap. URL: <https://www.openstreetmap.org>
5. Khalid L.A. El-Ashamawy. Testing the positional accuracy of OpenStreetmap data for mapping applications // *Geodesy and Cartography*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 25–30. DOI: [10.3846/20296991.2015.1160493](https://doi.org/10.3846/20296991.2015.1160493)
6. Shuttle Radar Topography Mission. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
7. Оньков И.В. Оценка точности высот SRTM для целей ортотрансформирования космических снимков высокого разрешения // *Геоматика*. 2011. № 3. С. 40-46.
8. Думит Ж.А. К вопросу об ошибках цифрового моделирования рельефа // *Географические исследования Краснодарского края: сборник трудов*. - Краснодар: Кубанский государственный университет, 2007. С. 49-53.
9. M. El Hage, L. Villard, Y. Huang, et al. Multicriteria Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEM) Produced by Airborne P-Band Polarimetric SAR Tomography in Tropical Rainforests // *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 17. DOI: [10.3390/rs14174173](https://doi.org/10.3390/rs14174173)
10. A.J.A.M. Temme, G.B.M. Heuvelink, J.M. Schoorl, L. Claessens. Chapter 5 Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry // *Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, pp. 121-140. DOI: [10.1016/S0166-2481\(08\)000005-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)000005-6)
11. T. Hengl, I.S. Evans. Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface // *Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, pp. 31–63. DOI: [10.1016/S0166-2481\(08\)000002-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)000002-6)
12. M. Borisov, R. Banković, S. Drobnjak. Modelling the Uncertainty of Digital Elevation Models with Geostatistical and Application on Spatially Distribution of Soil Nitrogen //

Scientific Technical Review, 2009, vol. LIX, no. 3-4. URL:  
<http://vti.mod.gov.rs/ntp/rad2009/34-09/8/8.pdf>

13. Мазмишвили А.И. Теория ошибок и метод наименьших квадратов. – М.: Недра, 1978. – 311 с.

14. Зыюнг Д.Х., Фам В.А. Разработка регрессионной модели для расчета площади печатной платы функциональной ячейки // Труды МАИ. 2010. № 41. URL:  
<https://trudymai.ru/published.php?ID=23795>

15. Моунг Хтанг Ом, Чжо Зин Латт, Приходько С.Ю. Разработка алгоритма повышения точности идентификации аэродинамических коэффициентов на основе гармонических входных сигналов // Труды МАИ. 2018. № 99. URL:  
<https://trudymai.ru/published.php?ID=91920>

16. Гончаренко В.И., Кан Ю.С., Травин А.А. Математическое и программное обеспечение анализа рассеивания точек падения фрагментов летательных аппаратов // Труды МАИ. 2012. № 61. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=35615>

17. Ермаков С.М., Михайлов Г.А. Курс статистического моделирования. – М.: Наука, 1976. – 320 с.

18. Соболев И.М. Численные методы Монте-Карло. – М.: Высшая школа, 1985. – 271 с.

19. Зея М., Хлопков А.Ю., Чжо З. Основные подходы к построению методов Монте-Карло в вычислительной аэродинамике // Труды МАИ. 2011. № 42. URL:  
<https://trudymai.ru/published.php?ID=24272>

20. Осипов С.В. Шкалы уклонов земной поверхности и способы их разработки // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: География. Геоэкология. 2016. № 3. С. 45-50.

## References

1. *Prilozhenie 14 k Konventsii o mezhdunarodnoi grazhdanskoi aviatsii. Aerodromy. T. II Vertodromy. Mezhdunarodnaya organizatsiya grazhdanskoi aviatsii* (Annex 14 to the Convention on International Civil Aviation. Volume II Heliports. International Civil Aviation Organization.), 2013. URL: [https://www.airfield-lights.com/docs/files/annex14v2\\_2013.pdf](https://www.airfield-lights.com/docs/files/annex14v2_2013.pdf)
2. Al'khanov D.S., Kuzurman V.A., Gogolev A.A. *Aerospace MAI Journal*, 2020, vol. 29, no. 3, pp. 209-221. DOI: [10.34759/vst-2022-3-209-221](https://doi.org/10.34759/vst-2022-3-209-221)
3. Ermakov P.G. *XLIX Mezhdunarodnaya molodezhnaya nauchnaya konferentsiya "Gagarinskie chteniya"*: sbornik trudov, Moscow, 11-14 aprelya 2023 g.
4. *OpenStreetMap*. URL: <https://www.openstreetmap.org>
5. Khalid L.A. El-Ashamawy. Testing the positional accuracy of OpenStreetmap data for mapping applications, *Geodesy and Cartography*, 2016, vol. 42, no. 1, pp. 25–30. DOI: [10.3846/20296991.2015.1160493](https://doi.org/10.3846/20296991.2015.1160493)
6. *Shuttle Radar Topography Mission*. URL: <https://www2.jpl.nasa.gov/srtm/>
7. On'kov I.V. *Geomatika*, 2011, no. 3. С. 40-46.
8. Dumit Zh.A. *Geograficheskie issledovaniya Krasnodarskogo kraja*: sbornik trudov. Krasnodar, Kubanskii gosudarstvennyi universitet, 2007, pp. 49-53.

9. M. El Hage, L. Villard, Y. Huang, et al. Multicriteria Accuracy Assessment of Digital Elevation Models (DEM) Produced by Airborne P-Band Polarimetric SAR Tomography in Tropical Rainforests, *Remote Sensing*, 2022, vol. 14, no. 17. DOI: [10.3390/rs14174173](https://doi.org/10.3390/rs14174173)
10. A.J.A.M. Temme, G.B.M. Heuvelink, J.M. Schoorl, L. Claessens. Chapter 5 Geostatistical Simulation and Error Propagation in Geomorphometry, *Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, pp. 121-140. DOI: [10.1016/S0166-2481\(08\)000005-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)000005-6)
11. T. Hengl, I.S. Evans. Chapter 2 Mathematical and Digital Models of the Land Surface, *Developments in Soil Science*, 2009, vol. 33, pp. 31–63. DOI: [10.1016/S0166-2481\(08\)000002-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(08)000002-6)
12. M. Borisov, R. Banković, S. Drobnjak. Modelling the Uncertainty of Digital Elevation Models with Geostatistical and Application on Spatially Distribution of Soil Nitrogen, *Scientific Technical Review*, 2009, vol. LIX, no. 3-4. URL: <http://vti.mod.gov.rs/ntp/rad2009/34-09/8/8.pdf>
13. Mazmishvili A.I. *Teoriya oshibok i metod naimen'shikh kvadratov* (The theory of errors and the method of least squares), Moscow, Nedra, 1978, 311 p.
14. Zyong D.Kh., Fam V.A. *Trudy MAI*, 2010, no. 41. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=23795>
15. Mounk Khtang Om, Chzho Zin Latt, Prihod'ko C.Yu. *Trudy MAI*, 2018, no. 99. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=91920>
16. Goncharenko V.I., Kan Yu.S., Travin A.A. *Trudy MAI*, 2012, no. 61. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=35615>

17. Ermakov S.M., Mikhailov G.A. *Kurs statisticheskogo modelirovaniya* (The statistical modelling course), Moscow, Nauka, 1976, 320 p.
18. Sobol' I.M. *Chislennyye metody Monte-Karlo*, (The numerical Monte-Carlo methods), Moscow, Vysshaya shkola, 1985, 271 p.
19. Zeya M., Khlopkov A.Yu., Chzho Z. *Trudy MAI*, 2011, no. 42. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=24272>
20. Osipov S.V. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geografiya. Geoekologiya*, 2016, no. 3, pp. 45-50.

Статья поступила в редакцию 11.10. 2023

Одобрена после рецензирования 13.10.2023

Принята к публикации 27.10.2023

The article was submitted on 11.10.2023; approved after reviewing on 13.10.2023; accepted for publication on 27.10.2023