

УДК 528.7:528.8:004.94

ОЦЕНКА ПРИМЕНИМОСТИ АФС В ГОРНОЙ МЕСТНОСТИ ДЛЯ СОЗДАНИЯ ЦМР БЕЗ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОПОЗНАКОВ

Мороз Е. А., студент гр. ГМс-221, IV курс

Научный руководитель: Потапов М. А., старший преподаватель
Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

В настоящее время широкое распространение при выполнении геодезических и маркшейдерских съёмочных работ получили аэрофотосъёмка (АФС) и воздушное лазерное сканирование (ВЛС). При АФС происходит фотографирование поверхности с летательного аппарата, после чего в процессе камеральной фотограмметрической обработки, зная положение камеры в момент фотографирования, получают цифровую модель местности в цифровую модель рельефа (ЦМР). При ВЛС лазерный сканер, установленный на летательный аппарат, отправляет лазерный луч на поверхность, который отражается и возвращается обратно. Зная положение сканера, расстояние и угол наклона луча, вычисляют координаты каждой точки, получая облако точек лазерных отражений (ТЛО), которое будет совпадать со сканируемой поверхностью. Целью данной работы является сравнение и оценка точности определения качества и точности получаемой ЦМР при съёмке гористой лесистой местности с помощью ВЛС и АФС.

Участок работ расположен в Гафурийском районе республики Башкортостан. Площадь составляет около 20,6 км², снежного покрова в момент залетов не было. Для выполнения топографо-геодезических работ были использованы следующие пункты ГГС, координаты которых получены в Федеральном фонде пространственных данных: Сергеевка (3 кл.), Карагаево (3 кл.), Красноусольский (2 кл.), Ташла (2 кл.), Казанка (2 кл.) и Макарово (3 кл.).

ВЛС выполнена 01.12.2025 в бесснежный период сканером *Riegel VG-580*, установленном на самолёте АН-2. На земле полёт сопровождался работой ГНСС-антенной *PrinCe i80* с частотой записи 1 Гц. Координаты базы были получены от пунктов ГГС в ГСК-2011 в Балтийской системе высот 1977 года. На участке сравнения было 6 опознаков, определённых от базы, от которой выполнено в т.ч. сопровождение полёта. После этого выполнена камеральная обработка кинематических ГНСС наблюдений с борта воздушного судна, для получения координат траектории полёта, приведенных к центру испускания лазерного луча сканера. Получив координаты траектории в ПО *Terrasolid*, получены облака ТЛО, выполнена их сшивка, очистка от грубых шумов и вылетов, выравнивание и классификация. Затем в ПО *Photomod* построена ЦМР в виде регулярной матрицы высот *DEM*.

АФС выполнена с борта БВС самолётного типа Геоскан 201 при помощи камеры *Sony RX-1* в начале ноября 2025 года. Опознаков не было заложено, полет сопровождался только работой наземной ГНСС-антенны *Stonex S10*, частота записи 1 Гц. Планово-высотная подготовка АФС в виде опознаков не была выполнена, опознаки не были замаркированы перед выполнением полета. Впоследствии на местности опознаки также не были намечены и закоординированы. Координаты полетной базы АФС получена от сети постоянно действующих базовых станций системы *EFT-CORS* в МСК-02 зона 2, а затем пересчитана в ГСК-2011 по ГОСТ 32453-2017 в *Photomod Geocalculator*. Координаты центров фотографирования получены в ПО *Topcon tools* путем совместной обработки данных с бортовой и наземной ГНСС-антенн. Обработка снимков проведена в ПО *Metashape*, где была также получена матрица высот DEM.

Для визуализации полученные поверхности построены также в ПО *Surfer* с использованием *Gridding Method: Triangulation with Linear Interpolation*:

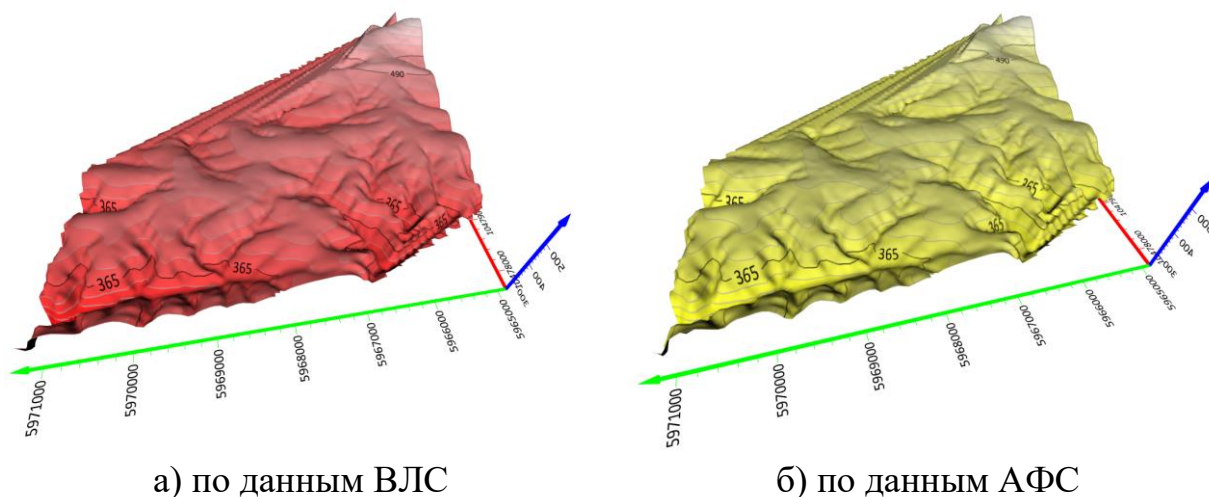


Рисунок 1 – Полученные поверхности

Для сравнения двух поверхностей выбраны 260 точек с одинаковыми плановыми координатами на обеих поверхностях, их высотные отметки занесены в *Excel*. Средняя квадратическая погрешность $m = \pm 8,3$ м. Для определения, относится ли данная погрешность к случайным или нет, принято решение проверить выполнение четырех свойств случайных погрешностей [1]:

- 1) с уменьшением абсолютного значения погрешностей возрастает частота их появления;
- 2) абсолютные значения погрешностей, возрастая, достигают некоторого предела, за которым вероятность их появления становится практически равным нулю;
- 3) появление одинаковых по абсолютному значению и противоположных по знаку величин погрешностей равновероятно;

4) среднее арифметическое значение совокупности случайных погрешностей стремится к нулю при неограниченной возрастании их числа.

Проверка первого свойства занесена в таблицу 1.

Таблица 1 – Проверка первого свойства случайных погрешностей

Интервал m	Число невязок n_i	Доля невязок, попадающих в интервал, от общего их числа, %
(0; 8,3]	178	68
(8,3; 16,6]	76	29
(16,6; 24,9]	6	2
(24,9; ∞)	0	0
Сумма	260	100

Доля невязок равномерно уменьшается отдалении интервала от нуля, следовательно первое свойство выполняется.

Для проверки второго свойства определена максимальное абсолютное значение разницы высотных отметок $|\Delta_{\max}|=17,373$ м. Это меньше утроенного значения СКП, $3m = 25$ м. Следовательно, второе свойство выполняется.

Проверка третьего свойства осуществляется по формуле [1]:

$$|N^{\pm} - N/2| \leq 2\sqrt{qpN},$$

где $q = p = 0,5$ – вероятность появления погрешностей со знаком «плюс» и «минус»;

$N^{\pm}$, N – число невязок соответственно со знаком «плюс» либо «минус» и общее их число.

Проверка третьего свойства занесена в таблицу 2.

Таблица 2 – Проверка третьего свойства случайных погрешностей

Для $N^{\pm}$	Количество N	$ N^{\pm} - N/2 $	$2\sqrt{qpN}$
Для N^{+}	6	124	16
Для N^{-}	254	124	
Сумма	260		

Результат в таблице 2 показывает, что третье свойство не выполняется.

Проверка четвертого свойства осуществляется по формуле [1]:

$$\lim_{N \rightarrow \infty} \frac{\sum \Delta_i}{N} = \frac{m}{10}.$$

По формуле:

$$\frac{-1669}{260} = 6,42 \pm 0,83.$$

Поскольку среднеарифметическое значение всех невязок Δ кратно больше в 10 раз уменьшенного СКП, то сумма фактических невязок не стремится к нулю. Это означает, что и это свойство не выполняется.

В результате проверки условий было определено, что первое и второе свойство выполняются, третье и четвертое – нет. Это означает, что погрешности выполненных измерений не относятся к случайным. Графически это выглядит следующим образом:

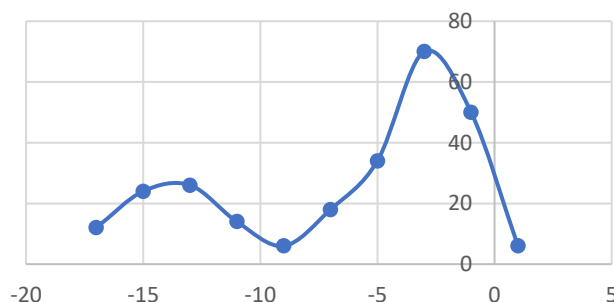
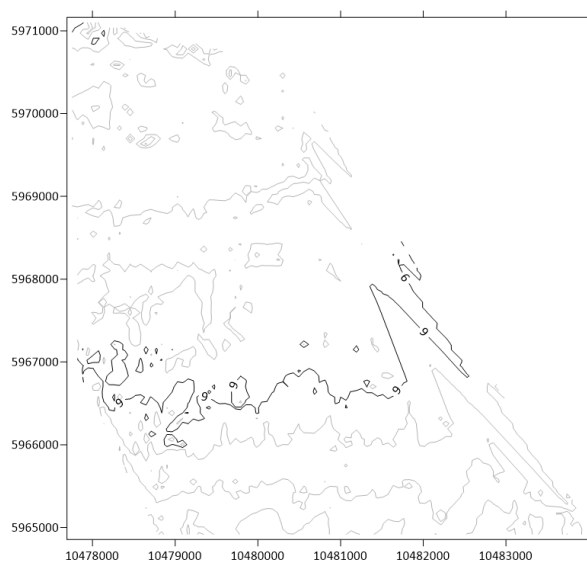


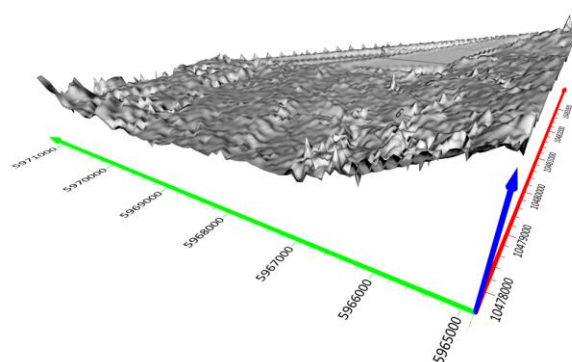
Рисунок 2 – Вероятность распределения ряда случайных погрешностей измерений

На основании графика, изображенному на рисунке 2, можно сделать вывод, что ряд погрешностей измерений не соответствует нормальному закону распределения К. Ф. Гаусса, а значит, погрешности не относятся к случайным.

Для графической визуализации разности между поверхностями по всей площади снимаемого участка использовано более 17 тысяч точек с известными плановыми координатами на обоих моделях. В качестве исходной принята поверхность, полученная с помощью ВЛС (рисунок 1, а). В результате вычитания получается следующая поверхность разностей:



а) на плане

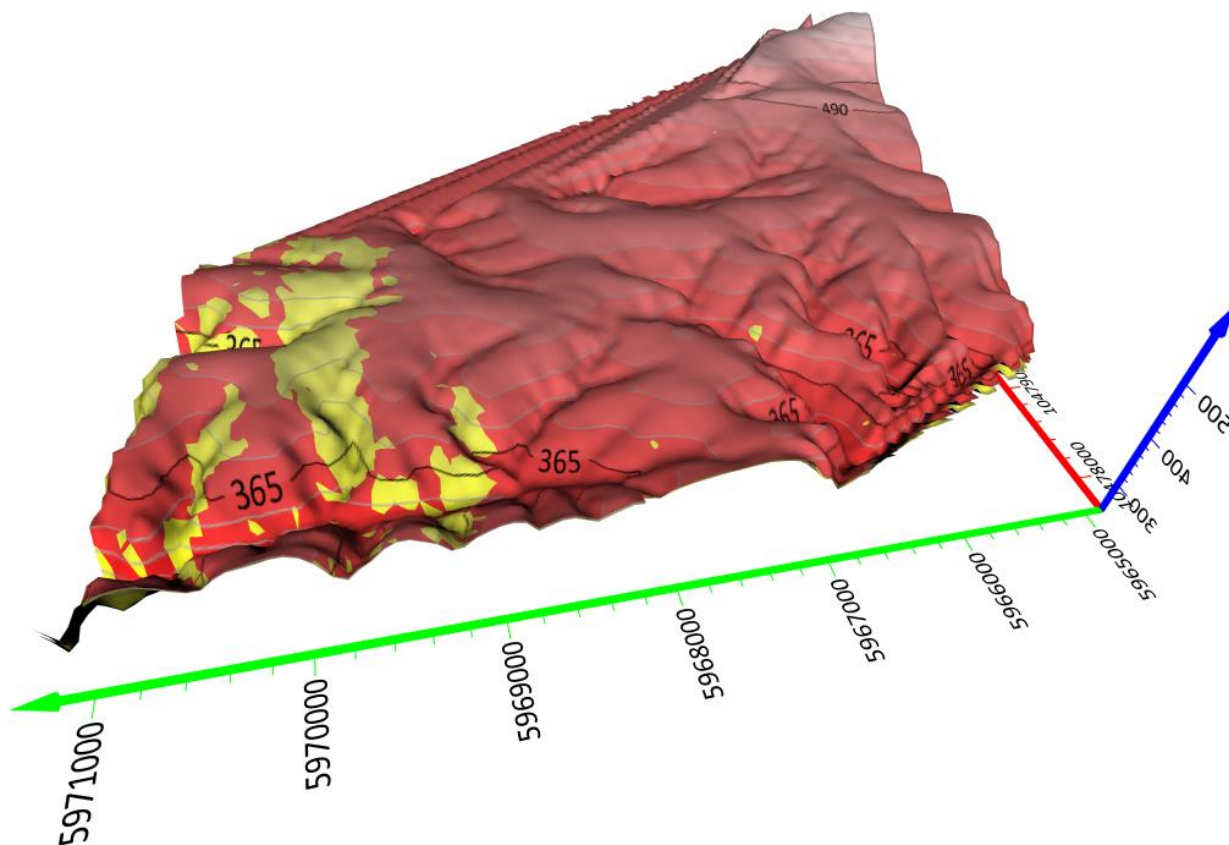


б) в 3D

Рисунок 3 – Поверхность разниц между DEM ВЛС и АФС

На основании рисунка 3.б можно сделать вывод, что наибольшее расхождение находится на юге – юго-западе снимаемого участка местности.

Для определения объемов «насыпи» и «выемки», т.е. насколько м³ матрица АФС отличается от ВЛС, в *Surfer* использовалась команда «*Volume*». В данном случае «насыпь» – поверхность АФС ниже ВЛС, а «выемка» – наоборот. В меню в *Upper surface* задавалась поверхность ВЛС (как исходная), а в *Lower surface* – АФС. В итоге, объем «насыпи» равен 23132180 м³, а «выемки» – 1533696 м³, что в 15 раз меньше. Графически наложенные поверхности выглядят следующим образом:



Список литературы:

1) Гурьев, Д. В. Математическая обработка результатов измерений (в маркшейдерии) : лабораторный практикум / Д. В. Гурьев, С. П. Бахаева; Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева – Кемерово, 2021. – 145 с. – ISBN 978-5-00137-242-4 – Текст : непосредственный.