

УДК 528.7

ПОСТРОЕНИЕ СЕТЕЙ ФОТОТРИАНГУЛЯЦИИ В ПРОГРАММЕ AGISOFT PHOTOSCAN

*канд. техн. наук, доц. А.А. МИХЕЕВА, канд. техн. наук, доц. В.В. ЯЛТЫХОВ,
П.Ф. ПАРАДНЯ
(Полоцкий государственный университет)*

В работе рассмотрены все этапы построения и уравнивания сетей фототриангуляции в программе Agisoft Photoscan, которые включают такие процедуры, как «выравнивание фотографий», «геопривязка» и «оптимизация». Эти термины введены разработчиками программы и совсем не используются в фотограмметрии. Если так называемая калибровка камер разработчиками рассмотрена подробно, то для перечисленных выше процедур не уточняется, каким способом и по каким формулам они выполняются, хотя пользователи программного обеспечения вправе знать, каков алгоритм решения задачи и какие методы используются при выполнении той или иной операции.

В нашей работе было выполнено построение сетей фототриангуляции без опорных точек, на основании только координат центров фотографирования (КЦФ), полученных по данным GPS и при разном числе опорных точек. Так как данные GPS были низкой точности, то и точность полученных результатов в сетях без опорных точек оказалась такого же порядка. С нашей точки зрения менее пяти опорных точек в сети быть не должно.

После оценки точности полученных результатов определены масштабы и высота сечения рельефа создаваемых планов.

Введение. Для сокращения временных и финансовых затрат на выполнение топографо-геодезических работ в производство активно внедряются новые приборы и технологии. Одним из наиболее перспективных и быстро развивающихся направлений является аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Однако отсутствие на данный момент актуальной нормативно-технической документации в части терминологии, применения современных средств съемки, технологий обработки цифровых данных, как и отсутствие рекомендаций к выбору БПЛА, его съемочной аппаратуры, алгоритмов фотограмметрической обработки и требований к конечным продуктам может негативно сказываться на качестве конечной продукции.

Основная часть. Цель данной работы – проанализировать технологии и точность построения сетей фототриангуляции при обработке цифровых снимков, полученных с БПЛА, выявить характерные особенности данных технологий и возможность их использования при выполнении инженерно-геодезических изысканий.

Обработка снимков на цифровых фотограмметрических станциях, например, Photomod [1–3], начинается с загрузки снимков в компьютер, затем наблюдают и измеряют координаты точек на цифровых изображениях. После учета систематических искажений фотоизображений строят сети фототриангуляции либо по способу моделей, как в программе Photomod, либо по способу связей, как в программе ORIMA [4]. В случае, если сети фототриангуляции строят по способу моделей, то выполняют следующие процедуры [1–3]: взаимное ориентирование снимков, в ходе которого получают модель; определение координат точек в моделях; создание модели маршрута; объединение построенных маршрутов в блок; внешнее ориентирование и устранение деформаций в построенных сетях фототриангуляции. При построении сетей фототриангуляции по способу связей сети строят сразу на весь блок.

После построения сетей фототриангуляции создают цифровую модель рельефа (ЦМР), строят горизонтали, затем выполняют ортофототрансформирование и создание ортофотопланов, которые векторизируют [1–3].

В программе Photomod для ускорения процесса предусмотрена возможность построения свободных сетей (без опорных точек). После получения опорных точек блок переуравнивают в выбранной системе координат. Выполненные ранее работы по данным уравнивания трансформируют в заданную систему координат [3].

Как отмечают авторы руководства [5], программа Agisoft Photoscan Pro предназначена для обработки материалов аэрофотосъемки и получения ортофотопланов и цифровых моделей местности. Agisoft Photoscan Pro отличается высокой степенью автоматизации выполняемых операций и не требует специальной подготовки для работы с ней.

Для работы необходимо иметь [5]:

- аэрофотоснимки;
- данные для привязки аэроснимков – координаты центров фотографирования;
- координаты опорных точек с атласом или описанием знаков.

Основные этапы обработки [5] – выравнивание фотографий; привязка моделей в требуемой системе координат; оптимизация.

Выравнивание фотографий включает [5]:

- поиск общих точек на снимках;
- определение элементов взаимного ориентирования снимков;
- формирование первичной модели, состоящей из общих точек (разреженного облака точек).

Как видим, сети строят по способу моделей.

В руководстве [6] о построении сетей фототриангуляции сказано, что на стадии «определения параметров внешнего и внутреннего ориентирования камер» находят общие точки снимков и по ним определяют все параметры камер: положение, ориентацию, внутреннюю геометрию (фокусное расстояние, параметры дисторсии и т.п.). Результатами этого процесса являются разреженное облако общих точек модели и данные о положении и ориентации камер. Далее отмечается, что «во время процесса выравнивания снимков Photoscan оценивает значения параметров внутреннего и внешнего ориентирования камер, в том числе нелинейных радиальных дисторсий» [6]. По общим точкам смежных снимков элементы внутреннего и тем более внешнего ориентирования определить нельзя.

В другом месте руководства [6] авторы пишут, что разреженное облако точек используется для построения модели и служит для визуальной оценки качества выравнивания фотографий. Визуальная оценка и определение параметров ориентирования – разные вещи.

Таких несоответствий в руководстве [6] достаточно. Например: «На этапе выравнивания фотографий Photoscan рассчитывает параметры внутреннего и внешнего ориентирования камер. Эта процедура основана только на данных, содержащихся в изображениях, что может привести к некоторым погрешностям в полученных оценках параметров. Точность окончательных оценок зависит от ряда факторов. Эти ошибки могут привести к нелинейным деформациям итоговой модели». Вне всякого сомнения, без опорных точек сети будут деформированы.

В отличие от программы Photomod и других, где для определения элементов взаимного ориентирования точки выбирают в зонах тройных продольных перекрытий и число их составляет 12–18 на стереопаре [3], при обработке учебно-лабораторного корпуса № 3 Полоцкого государственного университета (ПГУ) в программе Agisoft Photoscan автоматически было набрано значительно большее число точек (более 2000 точек на стереопару [7]) и располагались они на всей площади стереопары, что привело к увеличению времени обработки, хотя в руководстве [6] говорится, что можно уменьшить число точек в облаке путем задания предела связующих точек, но только для разреженного облака.

Нами были выполнены вычисления при разном числе точек на стереопару в разреженном облаке. Время расчета на объект размером 200×45 метров при разном числе точек на стереопару приведено в таблице 1.

Таблица 1. – Время на построение сетей фототриангуляции

Число точек на стереопару	350	1000	2000
Время расчета	6 мин 17 сек	7 мин 22 сек	8 мин 15 сек

Как видим, время вычислений увеличилось незначительно и нет смысла ограничивать число точек в облаке.

Результаты уравнивания при 350 и 1000 точек на стереопару в облаке приведены в таблицах 2–5.

Таблица 2. – Средние квадратические ошибки (СКО) по опорным точкам при 350 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
5	2,29	3,29	0,43	4,01	4,03

Таблица 3. – Средние квадратические ошибки по контрольным точкам при 350 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
21	4,12	11,98	78,49	12,67	79,51

Таблица 4. – Средние квадратические ошибки по опорным точкам при 1000 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
5	3,56	6,44	0,97	7,36	7,42

Таблица 5. – Средние квадратические ошибки по контрольным точкам при 1000 точках на стереопару в облаке

Число точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, Y, см	СКО общая, см
21	3,79	10,09	39,20	10,77	40,65

Как видим, получили грубые результаты. Однако с увеличением числа точек в облаке точность определения координат точек возрастает. В большей степени число точек влияет на точность определения высот.

После выполнения так называемого «выравнивания фотографий» в руководстве [5] рекомендуют сделать «привязку» модели в требуемой системе координат, которая может выполняться по КЦФ, по координатам опорных точек или по тем и другим.

В руководстве [6] говорится, что при использовании данных GPS о положении камер задание опорных точек не требуется, но отмечают, что опознаки дают более точную привязку. Необходимо минимум три точки [6]. А в другом месте руководства [6] отмечается, что необходимо не менее 10 наземных опорных точек.

Автор работы [8] пишет, что в случае когда нет точных координат центров проекций, необходимы дополнительные опорные точки, и отмечает, что одна точка должна быть на 6–10 базисов съемки.

При съемке корпуса № 3 ПГУ средняя ошибка данных GPS составила 6,3 м [7]. А в работе [8] говорится, что ошибки в определении КЦФ могут достигать 20–30 м. Если бы координаты центров проекций определялись до сантиметров, а углы крена, тангажа и рысканья – с точностью до 0,005° [8], то без опорных точек можно было бы обойтись. Но при использовании оборудования, установленного на беспилотном летательном аппарате MAVIC PRO, без опорных точек получим грубые результаты.

Нами была выполнена обработка результатов съемки корпуса № 3 только по координатам центров фотографирования и при наличии только одной опорной точки кроме КЦФ. Результаты расчетов приведены в таблицах 6 и 7, где указаны средние квадратические ошибки, полученные по контрольным точкам.

Таблица 6. – Результаты построения сетей фототриангуляции без опорных точек

Число точек	СКО X, м	СКО Y, м	СКО Z, м	СКО планового положения, м	Общая СКО, м
26	5,26	6,34	2,59	8,24	8,64

Таблица 7. – Результаты построения сетей фототриангуляции при одной опорной точке

Число точек	СКО X, м	СКО Y, м	СКО Z, м	СКО планового положения, м	Общая ошибка, м
25	0,80	0,86	2,99	1,17	3,22

Как видим, при построении сетей фототриангуляции без опорных точек получили очень низкую точность, а при использовании одной опорной точки, точность планового положения повысилась, но этой точности недостаточно для создания топографических карт и планов. Ошибки определения высотного положения очень велики в обоих случаях, т.е. строить сети фототриангуляции и создавать карты и планы при такой низкой точности нельзя.

GPS-приемник, установленный на дроне MAVIC PRO, имеет низкую точность. Круговая ошибка показаний такого GPS-приемника в плане составляет CE50, два метра при статическом режиме работы, т.е. вероятность точности такого определения координат составляет 50% [9], в то время как в США, где используют круговую ошибку, стандартом точности определения пространственных данных является CE95, т.е. данные определяются с вероятностью 95% [10].

При динамическом режиме работы, что имеет место при съемке с летательных аппаратов, ошибка будет значительно больше.

Если привязка выполняется по КЦФ и по координатам опорных точек, то необходимо учитывать веса измерений. Учитываются ли в программе Agisoft Photoscan веса измерений на этом этапе – неизвестно. Во всяком случае, упоминаний об этом в руководствах [5] и [6] нет. Однако программа по умолчанию задает точность КЦФ – 10 м, точность определения углов – 10°, точность определения опорных точек – 5 мм. В руководстве [6] упоминается о весовых коэффициентах на завершающем этапе работы в процедуре «оптимизация».

Как правило, КЦФ загружаются вместе со снимками и используются на этапе выравнивания, а координаты опорных точек загружаются после формирования первичной модели и по ним производится точная привязка [5].

На этапе «геопривязки» модель подвергается линейным преобразованиям с использованием семи параметров преобразования (трех параметров трансляции, трех параметров вращения и одного параметра растяжения/сжатия) [5].

Термин «трансляция» в основном относится к теле- и радиопередачам [11]. Но есть и другая его трактовка [11]: «перенос объекта в пространстве на некоторое расстояние параллельно самому себе вдоль прямой». Термин «трансляция» совсем не используется в фотограмметрии.

Три параметра вращения следовало бы назвать наклоном и поворотом модели по отношению к принятой системе координат.

Похоже, под растяжением и сжатием подразумевают изменение масштаба построенной модели и отмечают, что такие преобразования могут компенсировать только линейные искажения модели [5]. Результат нелинейных искажений не может быть устранен в рамках такого подхода. Как правило, это является основной причиной возникновения ошибок при выполнении геопривязки модели [5].

В фотограмметрии вместо термина «геопривязка» используется «внешнее ориентирование сети фототриангуляции». Так называемую геопривязку модели иллюстрирует рисунок.

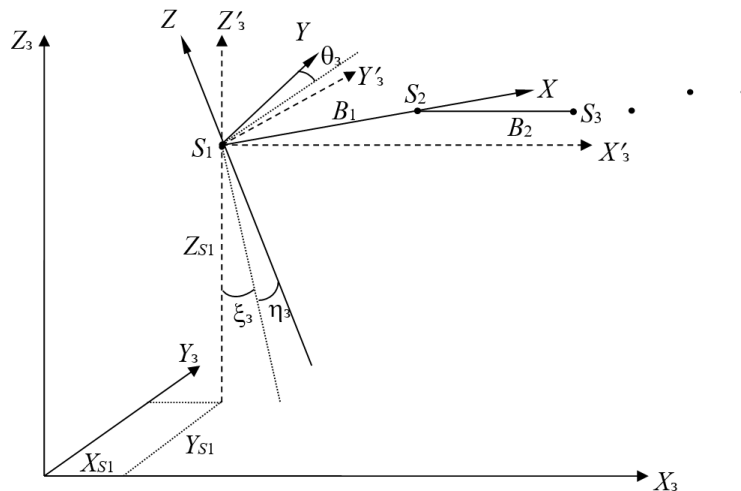


Рисунок. – Внешнее ориентирование сети фототриангуляции

На приведенном рисунке:

- X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1} – координаты начала фотограмметрической системы координат;
- X'_3, Y'_3, Z'_3 – оси вспомогательной системы координат, параллельны осям заданной системы координат X_3, Y_3, Z_3 ;
- ξ_3 – продольный угол наклона построенной модели сети; составлен проекцией оси Z на плоскость $X'_3Z'_3$ с осью Z'_3 ;
- η_3 – поперечный угол наклона сети составленный осью Z и ее проекцией на плоскость $X'_3Z'_3$;
- θ_3 – угол поворота модели (угол между осью Y и следом плоскости $Z'_3Y'_3$ на плоскость XY);
- t_3 – масштабный коэффициент.

Внешнее ориентирование определяется семью элементами: $X_{S1}, Y_{S1}, Z_{S1}, \xi_3, \eta_3, \theta_3, t_3$. Для их определения составляют уравнения связи координат [12]:

$$\begin{pmatrix} X_3 \\ Y_3 \\ Z_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} X_{S1} \\ Y_{S1} \\ Z_{S1} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{pmatrix} t_3, \quad (1)$$

где a_i, b_i, c_i – направляющие косинусы, вычисляемые через углы ξ_3, η_3, θ_3 .

Уравнения поправок составляют на основе формулы (1) и они имеют вид [12]

$$a_x \delta X_{S_2} + d_x \delta \xi + e_x \delta \eta + f_x \delta \theta + g_x \delta t + l_x = v_x, \quad (2)$$

$$b_y \delta Y_{S_2} + d_y \delta \xi + e_y \delta \eta + f_y \delta \theta + g_y \delta t + l_y = v_y, \quad (3)$$

$$c_z \delta Z_{S_2} + d_z \delta \xi + e_z \delta \eta + f_z \delta \theta + g_z \delta t + l_z = v_z, \quad (4)$$

где a, b, c, \dots , коэффициенты, которые получают решая формулы частных производных уравнений (1) по соответствующим параметрам;

δ – поправки к величинам, полученным в ходе построения сетей фототриангуляции.

Для определения неизвестных элементов ориентирования $X_{SI}, Y_{SI}, Z_{SI}, \xi_3, \eta_3, \theta_3, t_3$ необходимы опорные точки. Так как число неизвестных семь, а каждая опорная точка позволяет составить три уравнения вида (2), (3) и (4), то для решения задачи требуется не менее трех опорных точек.

При использовании трех опорных точек будем иметь девять координат, в формулах (2–4) семь неизвестных, поэтому после внешнего ориентирования на опорных точках тоже могут быть расхождения, которые в дальнейшем должны быть устранены. Нелинейные искажения проявляются при числе опорных точек более трех.

Авторы руководства [5] отмечают, что результат нелинейных искажений является основной причиной возникновения ошибок при выполнении геопривязки модели. Дело здесь не в геопривязке, а в деформации сетей фототриангуляции.

Сколько бы точек не было задано, задача решается по способу наименьших квадратов. Т.е. на основе системы уравнений вида (2–4) составляют нормальные уравнения, в ходе решения которых получают поправки к приближенным значениям элементов внешнего ориентирования, прибавив которые к приближенным величинам, получают элементы внешнего ориентирования относительно заданной системы координат. Полученные элементы внешнего ориентирования используют для вычисления координат всех точек блока в заданной системе координат. А как решается задача в программе Agisoft Photoscan – трудно сказать.

Ход решения задачи при взаимном ориентировании аналогичен изложенному решению. Какая система элементов взаимного ориентирования принята в программе Agisoft Photoscan, описанной в руководствах пользователей [5; 6], неизвестно.

При взаимном ориентировании тысячи точек, тысячи уравнений поправок (только на одной стереопаре 2000 точек) поиск обратных матриц – задача сложная.

При съемке корпуса ПГУ продольное перекрытие составило 62,7–92,9%, а поперечное перекрытие – 43,2%, т.е. проценты продольного и поперечного перекрытий велики. Следовательно, одноименные точки на смежных снимках находились в разных их частях. Кроме того, число точек, приходящееся на стереопару, – более 2000, и разработчики программы Agisoft Photoscan, вероятно, посчитали, что перечисленных точек достаточно, чтобы выявить все ошибки, исправить измеренные координаты точек, чтобы сеть не была деформирована. Действительно, систематические искажения оказывают разное влияние в зависимости от положения точек, да и точки попадают более чем в двойное перекрытие. Возможно, проанализировав эти искажения и можно определить систематические искажения, обусловленные разными факторами. Так что в руководствах [5; 6] правильнее было бы написать не «калибровка камер», а «определение систематических ошибок фотоизображений, обусловленных разными факторами», как и названы такие систематические ошибки в работе [13].

Задача строгого уравнивания блочной фототриангуляции сводится к решению больших систем нелинейных уравнений. Системы уравнений можно решать либо прямыми, либо итеративными методами. Прямые методы имеют следующие преимущества по сравнению с итеративными методами [14]:

- 1) возможность обоснованной оценки точности построений параллельно с решением основной задачи – уравниванием сети;
- 2) значительно меньший объем вычислительных операций, не зависящий от степени обусловленности системы.

Итеративный метод (например, способ сопряженных градиентов), также позволяет оценить точность окончательных результатов. Итеративные методы позволяют использовать исходную матрицу частных производных, не преобразуя ее в процессе решения [15]. Основная операция в итеративных методах – умножение матрицы на вектор.

Какой способ уравнивания использовали разработчики программы Agisoft Photoscan тоже неизвестно.

Разработчики программы вводят незнакомый для фотограмметристов термин «оптимизация» и поясняют [5; 6], что, по сути, «оптимизация» является строгим уравниванием параметров ориентирования снимков. Почему тогда не назвали эту процедуру «уравнивание сетей фототриангуляции»? Авторы руководства [5; 6] рекомендуют для достижения более качественных результатов оптимизации отредактировать разреженное облако точек, заранее удалив неверные точки. Однако выполнить ручное редактирование при наличии на каждой стереопаре более 2000 точек весьма проблематично.

Как отмечено в руководстве [6], возможные нелинейные искажения, возникающие на этапе выравнивания, можно устранить, оптимизировав разреженное облако точек и параметры калибровки камеры на основе известных значений опорных координат. В процессе оптимизации Photoscan пересчитывает координаты точек и параметры камер, минимизируя сумму ошибок проецирования и ошибок выравнивания по опорным координатам (наземных точек опоры и/или координатам камер) [6].

Далее в руководстве [5] отмечают, что оптимизация производится на основе данных о положениях центров фотографирования и наземных опорных знаков. Если точность GPS-данных оказалась низкой, как в нашем случае, то их использование при оптимизации не окажет существенного влияния на конечный результат. Значения точности КЦФ, координат опорных точек, точности связующих точек используются в качестве весовых коэффициентов при уравнивании [5].

Авторы руководства [5] отмечают, что строгое уравнивание в программе Photoscan выполняется при оптимизации. Оптимизация проводится по КЦФ и/или координатам опорных точек.

В качестве параметров оптимизации используются значения точности КЦФ, координат опорных точек, точности связующих точек [5]. Каким образом определяют точность связующих точек – не описывается. Перечисленные значения точности используются в качестве весовых коэффициентов при уравнивании [5].

Грубое уравнивание (используется при обновлении данных привязки) выполняется практически мгновенно. Оптимизация – более ресурсоемкая процедура и занимает заметное время [5]. Однако при вычислениях в программе Agisoft Photoscan время на поиск соответствий составило 8 мин 4 сек, а время на оптимизацию – 2 сек.

В отчете по уравниванию есть пояснение: параметры оптимизации – f, c_x, c_y, k_l-k_3 . Формулы для определения этих параметров приведены в руководстве [6]. Поиск параметров f, c_x, c_y, k_l-k_3 и уравнивание – разные процессы. За 2 с выполнить уравнивание невозможно. Сами авторы руководства [6] отмечают, что уравнивание занимает заметное время. Похоже, программа применила грубое уравнивание.

В случаях, когда точность КЦФ и опорных точек значительно отличается, рекомендуется сначала выполнить оптимизацию по КЦФ, а затем окончательную оптимизацию только по маркерам [5]. Маркеры, надо полагать, – это опорные точки.

Авторы руководства [6] отмечают, что «уравнивание при строгом способе – полиномиальное». Оставшиеся после построения сетей фототриангуляции расхождения координат опорных точек, которые являются следствием возможных деформаций, устраняют при помощи разного рода полиномов, например [12]:

$$\delta X = A_0 + A_1 X + A_2 Y + A_3 XY + A_4 X^2 + A_5 X^3 + \dots, \quad (5)$$

$$\delta Y = B_0 + B_1 X + B_2 Y + B_3 XY + B_4 X^2 + B_5 X^3 + \dots, \quad (6)$$

$$\delta Z = C_0 + C_1 X + C_2 Y + C_3 XY + C_4 X^2 + C_5 X^3 + \dots, \quad (7)$$

где A_i, B_i, C_i – коэффициенты;

X, Y, Z – координаты точек построенной сети фототриангуляции;

$\delta X, \delta Y, \delta Z$ – поправки в координаты точек построенных сетей фототриангуляции.

В уравнениях (5)–(7) три первых члена устраняют ошибки внешнего ориентирования, четвертый и последующие – устраняют деформации построенной модели.

Для решения задачи по опорным точкам находят расхождения координат опорных точек, определенных в поле и полученных после внешнего ориентирования $\delta X, \delta Y$ и δZ , составляют уравнения вида (5)–(7), в которых неизвестными будут коэффициенты A_i, B_i, C_i , затем – нормальные уравнения, в ходе решения которых будут получены искомые коэффициенты. Эти коэффициенты используют для исправления координат всех точек сети по формулам (5)–(7).

При использовании трех опорных точек можно задействовать только первые три члена формул (5)–(7) и т.д. Чем больше опорных точек, тем большая длина полинома может быть использована.

Уравнивание сетей фототриангуляции выполнялось нами в программе Agisoft Photoscan при разном числе опорных точек. Масштаб снимков 1 : m составил 1:11000. Высота полета $H = 52$ м. Сделано четыре маршрута съемки. Минимальное продольное перекрытие 62,7%, максимальное – 92,9%. Минимальное поперечное перекрытие 43,2%, максимальное – 72,8%.

Результаты уравнивания по опорным точкам приведены в таблице 8.

Таблица 8. – Оценка точности сетей фототриангуляции по опорным точкам в программе Agisoft Photoscan

Число опорных точек	СКО X , см	СКО Y , см	СКО Z , см	СКО планового положения, см	Число контрольных точек
3	0,77	0,32	0,08	1,08	23
4	1,68	1,43	0,12	2,21	22
5	7,78	16,43	2,86	18,18	21

Как видим, на опорных точках получили ошибки, отличные от нуля.

Если длину полинома задать в зависимости от числа опорных точек, то после использования полиномов на опорных точках могут быть небольшие ошибки, обусловленные погрешностями округлений (например, в миллиметрах), особенно если применялся итеративный метод вычислений, или в случае, если

есть избыточные опорные точки (но в нашем случае избыточных опорных точек нет, а ошибки значительные). И, как видим, чем больше опорных точек в сети, тем больше ошибки, чего быть не должно. В идеале на опорных точках вообще не должно быть ошибок, даже если какая-то опорная точка неправильно определена, что следует из анализа формул (5–7). Возможно, разработчики программы Agisoft Photoscan использовали какой-то «модифицированный» полином.

При обработке рассматриваемых снимков того же объекта в программе ContextCapture получили среднюю квадратическую ошибку планового положения $m_d = 1,26$ см, а высотного положения – $m_z = 0,001$ см, т.е. в ContextCapture уравнивание по полиномам выполнялось.

Для контроля точности уравнивания сети используют контрольные точки. Более того, проанализировав расхождения на контрольных точках, можно определить, какая из опорных или контрольных точек была ошибочно определена.

Результаты уравнивания с контрольными точками приведены в таблице 9.

Таблица 9. – Оценка точности сетей фототриангуляции по контрольным точкам в программе Agisoft Photoscan

Число опорных точек	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО планового положения, см	Число контрольных точек
3	5,83	12,77	15,89	14,04	23
4	6,64	12,49	17,90	14,15	22
5	5,00	11,50	10,26	12,54	21

И по контрольным точкам получили значительные ошибки, хотя размеры объекта съемки малые. Как видим, ошибка по высоте при четырех опорных точках составила 18 см. Меньше пяти членов уравнений (5)–(7) задействовать нельзя. В сети должно быть не менее пяти опорных точек в случае, когда координаты центров фотографирования определены грубо.

В работе [16] сети фототриангуляции также строились в программе Agisoft Photoscan. Съемка была выполнена на специальном тщательно подготовленном полигоне с высоты полета $H = 600$ м. Она осуществлялась цифровой камерой One Plase IXU150 с фокусным расстоянием $f = 55$ мм. Масштаб фотографирования 1:11000. Продольное перекрытие $P = 80\%$. Опорных точек было 5, контрольных – 44. Все точки полигона замаркированы. СКО определения этих точек составили два сантиметра по всем трем координатам. Результаты уравнивания сетей фототриангуляции приведены в таблице 10.

Таблица 10. – Результаты уравнивания

СКО на опорных точках			СКО на контрольных точках		
СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см
4,5	4,2	5,7	4,5	4,0	20,4

Как видим, и здесь получили расхождения, как в плановом положении, так и по высоте на опорных и контрольных точках, особенно по высоте.

Ошибки на опорных точках после уравнивания будут тогда, когда опорных точек много, а принятая длина полинома малая, то есть когда есть избыточные измерения. Проанализировав ошибки на контрольных точках, можно выявить, какая из опорных точек ошибочна. Контрольные точки не только показывают, есть ли ошибки на опорных точках, но и контролируют качество построения сетей.

Определим, каких масштабов и с какой высотой сечения рельефа можно создать планы по результатам съемки корпуса № 3 ПГУ по данным точности, полученной после уравнивания сетей фототриангуляции.

Согласно основным положениям по созданию топографических планов [17], плановое положение капитальных строений должно быть отображено со средней ошибкой 0,4 мм в масштабе плана. Средняя ошибка по высоте равна 1/4 принимаемой высоты сечения рельефа при угле наклона местности до 2° [17]. Следовательно, все промежуточные этапы (фототриангуляция, создание ЦМР, ортотрансформирование, векторизация) должны выполняться точнее. Да и планово-высотные точки тоже содержат ошибки. Примем, что сети фототриангуляции должны строиться в два раза точнее, то есть со средней ошибкой 0,2 мм на плане, что на местности составит $V=0,2M$, где M – знаменатель масштаба создаваемого плана (карты). По высоте среднюю ошибку примем равной 1/8 высоты сечения рельефа.

Формула перехода от средних ошибок V к среднеквадратическим ошибкам m имеет вид [18]

$$m = 1,25V . \quad (8)$$

Для планов разных масштабов будем иметь средние и среднеквадратические ошибки, приведенные в таблице 11.

Таблица 11. – Средние и среднеквадратические ошибки на местности для точек, полученных после фототриангуляции для планов разных масштабов

М	200	500	1000	2000
V_d , см	4	10	20	40
m_d , см	5	12,5	25	50

В ходе уравнивания мы получили среднюю квадратическую ошибку $m_d = 13$ см в плане и примерно 10 см по высоте m_z при пяти опорных точках, т.е. мы сможем создать с требуемой точностью планы масштаба 1:1000 и мельче.

Рассмотрим, какие высоты сечения рельефа h можно задать при создании планов. Примем высоты сечения рельефа $h = 0,25; 0,5; 1,0$ и $2,0$ метра. Мы приняли, что сети фототриангуляции необходимо строить при средней ошибке по высоте $1/8 h$. Результаты расчетов средних и среднеквадратических ошибок для разных высот сечения рельефа приведены в таблице 12.

Таблица 12. – Средние и среднеквадратические ошибки точек в сетях фототриангуляции для разных высот сечения рельефа

h , м	0,25	0,5	1,0	2,0
$V_h=1/8 h$, см	3,12	6,25	12,5	25,0
$m_h=1,25 V_h$, см	3,90	7,81	15,62	31,25

Сопоставим полученные значения с данными таблицы 9, где СКО зависят от числа опорных точек. В случае пяти опорных точек может быть обеспечена точность создания планов с высотой сечения рельефа 1 м, а в остальных случаях – с высотой сечения рельефа 2 м. Впрочем, уверенности в том, что при трех опорных точках были получены качественные результаты, нет. Нельзя выполнять уравнивание сетей фототриангуляции при числе точек менее пяти, если КЦФ определены с низкой точностью.

С учетом того, что последующие работы (создание ЦМР, ортотрансформирование и векторизация) будут тоже содержать ошибки, получим требуемые в работе [17] допуски.

Приведенные в таблице 12 данные показывают, что их возможно использовать для инженерно-геодезических изысканий в масштабах 1:1000 и мельче с высотой сечения рельефа 1 м.

Заключение. Выполнив анализ построенных сетей фототриангуляции, мы пришли к выводу, что две опорные точки грубо определены: одна по высоте, другая – в плановом положении. Поменяв опорные точки и исключив одну плановую опорную точку, грубо определенную из уравнивания, получили СКО, приведенные в таблице 13.

Таблица 13. – Результаты уравнивания

СКО на опорных точках				СКО на контрольных точках			
СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	m_d , см	СКО X, см	СКО Y, см	СКО Z, см	m_d , см
2,5	1,3	1,0	2,8	3,0	3,5	4,1	4,6

Сопоставив данные таблицы 13 с данными таблиц 11 и 12 видим, что можно создать планы масштаба 1 : 200 с высотой сечения рельефа 0,5 м. При этом необходимо тщательно анализировать результаты построения сетей фототриангуляции, чтобы получить более качественные результаты. Для выполнения такого анализа необходимо не только знание фотограмметрии, но и опыт работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Программа «PHOTOMOD AT» : руководство пользователя. – М. : Ракурс, 1999. – 69 с.
2. «PHOTOMOD 3.0» : руководство пользователя. – М. : Ракурс, 1999.
3. «PHOTOMOD 3.5.24» : руководство пользователя. – М. : Ракурс, 2013.
4. ORIMA Software, Rel./1.50. User's Guide. – Leica AG, 1996. – 250 p.
5. Обработка материалов аэросъемки в Agisoft Photoscan Pro. Получение ортофотопланов. Получение матриц высот (DSM) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://download.geoscan.aero/public/Agisoft_PhotoScan_Pro.pdf. – Дата доступа: 10.01.2020.
6. Agisoft Photoscan : руководство пользователя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_2_ru.pdf. – Дата доступа: 10.01.2020.
7. Михеева, А.А. Калибровка снимков в программах Agisoft Photoscan и ContextCapture. / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов, П.Ф. Парадня // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. F, Строительство. Прикладные науки. 2019. – № 8. – С. 121–127.
8. Сечин, А.Ю. Беспилотный летательный аппарат: применение в целях аэросъемки для картографирования (часть 2) [Электронный ресурс] / А.Ю. Сечин, М.А. Дракин, А.С. Киселева. – Режим доступа: <https://russiadrone.ru/publications/bespilotnyy-letatelnyy-apparat-primenenie-v-tselakh-aerosyemki-dlya-kartografirovaniya-chast-2/> – Дата доступа: 10.01.2020.

9. ГЛОНАСС/GPS модуль NEO-M8N/M [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://microem.ru/produkti/besprovodnie-tehnologii/glonass-gps-modul-lea-7n/>. – Дата доступа: 10.01.2020.
10. Титаров, П.С. Характеристики точности координат точек местности – СЕ и LE / П.С. Титаров // Геопрофи. – 2010. – № 1. – С. 52–53.
11. Советский энциклопедический словарь / гл. ред. А.М. Прохоров. – 3-е изд. – М. : Сов. энцикл., 1985. – 1600 с.
12. Михеева, А.А. Фотограмметрия (цифровая фотограмметрия) : учеб.-метод. комплекс для студ. специальности 1-56 02 01 «Геодезия» / А.А. Михеева, В.В. Ялтыхов. – Новополоцк : ПГУ, 2016. – 140 с.
13. Антипов, И.Т. Математические основы пространственной аналитической фототриангуляции / И.Т. Антипов. – М. : «Картгеоцентр» – «Геодезиздат», 2003. – 296 с.
14. Погорелов, В.В. Уравнивание маршрутной фототриангуляции строгим способом : реферат / В.В. Погорелов // Сб. ОНТИ ЦНИИГАиК. – М., 1971. – № 15. – С. 76–84.
15. Красиков, В.А. Применение метода сопряженных градиентов при строгом уравнивании фотограмметрических сетей. Реферат / В.А. Красиков // Сб. ОНТИ ЦНИИГАиК. – М., 1971. – № 15. – С. 84–97.
16. Испытательный полигон МИИГАиК для тестирования, калибровки и сертификации беспилотных летательных систем / А.Г. Чибуничев [и др.] // Геодезия, картография, кадастр, ГИС – проблемы и перспективы развития : материалы междунар. науч.-техн. конф. Ч. 1. – Новополоцк, 2016. – С. 36–47.
17. ГКНП 02-004-2010. Основные положения по созданию топографических планов масштабов 1:5000, 1:2000, 1:1000, 1:500. / Комитет по земельным ресурсам, геодезии и картографии при Совете Министров Республики Беларусь. – Минск : БелНИЦзем, 2010. – 33 с.
18. Большаков, В.Д. Справочник геодезиста : в 2 кн. / В.Д. Большаков [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : «Недра», 1975. – 1056 с.

Поступила 18.09.2020

CREATING PHOTOTRIANGULATION NETWORKS IN AGISOFT PHOTOSCAN

A. MIKHEEVA, V. YALTYKHOV, P. PARADNYA

The paper describes the stages of creation and adjustment of phototriangulation networks in Agisoft Photoscan, which includes “photo alignment”, “georeferencing” and “optimization”. These terms were introduced by the program developers and are not used in photogrammetry at all. So-called camera calibration is considered in detail by developers, but for the procedures listed above it is not specified in what way and by what formulas they are performed, although software users have the right to know what is the algorithm for solving the problem and what methods are used when performing this or that operation.

In our work, we built phototriangulation networks without ground control points, based only on the coordinates of the photographing centers, obtained from GPS data and with a different number of control points. Since the GPS data was of low accuracy, the accuracy of the results obtained in networks without control points was low as well. In our opinion, there should not be less than five control points in the network.

After evaluating the accuracy of the results obtained, the scales and height of the relief section of the created plans were determined.

Keywords: *aerial photograph, phototriangulation, reference points, elements of external orientation, adjustment.*