



Исследование алгоритма автоматического нахождения и измерения связующих точек AKAZE на снимках ледника, полученных с беспилотного воздушного судна

О.А. Нефедова¹✉

¹ Московский государственный университет геодезии и картографии,
Москва, Россия

✉ o.nefedova2011@yandex.ru

ЦИТИРОВАНИЕ Нефедова О.А. Исследование алгоритма автоматического нахождения и измерения связующих точек AKAZE на снимках ледника, полученных с беспилотного воздушного судна // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2025. Т. 69, № 5. С. 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-036.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА беспилотная аэросъемка, аэроснимки ледника, связующие точки, детектор, дескриптор, фототриангуляция, цифровая модель рельефа

АННОТАЦИЯ Данная работа направлена на исследование эффективности алгоритма AKAZE, адаптированного для обработки имеющих слабо выраженную текстуру изображений поверхности ледников. Ледниковые поверхности представляют собой вызов для традиционных методов обработки снимков, поскольку поиск связующих точек в данном случае отличается большой сложностью. В исследовании была проведена предварительная обработка изображений, что позволило повысить точность нахождения связующих точек, необходимых для уравнивания блока снимков. С использованием языка программирования Python был реализован алгоритм AKAZE для поиска и измерения связующих точек на снимках с беспилотных воздушных судов. Затем изображения были переданы в программный комплекс PHOTOMOD 7 для уравнивания блока и создания цифровой модели рельефа. Был также выполнен полный цикл обработки этого же блока в программном комплексе PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape для нахождения оптимального решения. Сравнительный анализ полученных матриц высот продемонстрировал эффективность алгоритма AKAZE в обработке сложных ледниковых поверхностей.

1 Введение

Аэрофотосъемка ледников с использованием беспилотных воздушных судов (БВС) становится все более актуальным и востребованным инструментом для изучения изменений окружающей среды [1–3]. В последние десятилетия такие методы наблюдения приобрели особую популярность, поскольку они позволяют получать высококачественные и детализированные изображения, охватывающие обширные площади за короткие промежутки времени, и выводить гляциологические исследования на совершенно новый уровень [4–5]. При этом важно понимать, что с возрастанием объема собранных данных эффективная обработка и анализ аэрофотоснимков требуют использования продуманных алгоритмов компьютерного зрения. Это стало основным направлением современных исследований.

Ледниковые поверхности на аэрофотоснимках характеризуются выраженной однородностью, что создает определенные сложности при обработке данных. Существенное влияние на качество получаемых изображений оказывает фактор освещения: в пасмурную погоду контрастность теряется практически полностью, что делает поверхность ледника однородной и лишенной каких-либо контуров.

В работе [6] внимание сосредоточено на методах автоматического нахождения и измерения связующих точек на примере пяти отдельных стереопар аэрофотоснимков, полученных с БВС. Это исследование позволило выявить критически важные проблемы, такие как неравномерное освещение, сложный рельеф и однородность поверхности ледников, и определить наиболее подходящие алгоритмы нахождения связующих точек для таких снимков.

Настоящая статья является логическим продолжением предыдущего исследования и посвящена более сложной задаче — обработке и анализу целого блока изображений, полученных в ходе одной сессии съемки. Этот переход к обработке больших групп изображений представляет собой значительное расширение нашего первоначального подхода и предполагает более сложные требования к алгоритмам обработки. Основное внимание в настоящей работе уделено алгоритму AKAZE (*англ.* Accelerated-KAZE) [7] с адаптированными параметрами, который зарекомендовал себя как эффективное средство в обнаружении и сопоставлении соответственных точек в условиях, характерных для съемки ледников.

2 Материалы и методы

Алгоритм AKAZE представляет собой мощный инструмент для обнаружения и описания характерных точек на изображениях, который стал широко применяться в области компьютерного зрения. Авторами данного метода являются П.Ф. Алькантарилья (P.F. Alcantarilla), Х. Нуэво (J. Nuevo), А. Бартоли (A. Bartoli) [7]. Его специфика заключается в эффективной работе с изображениями, имеющими различную текстуру и освещение, что делает его особенно подходящим для анализа аэроснимков ледников. Алгоритм AKAZE инвариантен к масштабу, повороту и аффинным преобразованиям.

В этой части работы детально рассмотрены принципы действия алгоритма AKAZE, а также изменения, которые были внесены в его параметры для повышения качества обработки изображений ледников.

Алгоритм построен на основе математической структуры FED (*англ.* Fast Explicit Diffusion) [8]. Она предназначена для выявления характерных точек на изображениях — важного этапа в компьютерном зрении и обработке изображений. FED интегрирована в пирамидальную систему, что позволяет эффективно обрабатывать данные на различных уровнях масштабирования. Благодаря этому подходу значительно ускоряются нелинейные пространственные вычисления. Это особенно важно при работе с большими изображениями или набором данных.

Кроме того, для описания найденных характерных точек применяют модифицированный локально-разностный двоичный дескриптор (англ. Modified-Local Difference Binary, M-LDB). Этот дескриптор извлекает информацию об изменениях градиента и учитывает особенности нелинейного масштабирования. Использование M-LDB позволяет создать более устойчивое представление характерных точек, что, в свою очередь, улучшает качество сопоставления и анализа изображений, особенно в сложных условиях.

Одним из ключевых изменений, которое было предложено для адаптации алгоритма AKAZE к малококонтрастным изображениям, является снижение порога чувствительности при обнаружении характерных точек. В стандартных настройках алгоритма может происходить отсеивание значительного числа потенциально полезных точек из-за слишком строгих требований к их качеству. Понижение этого порога позволяет увеличить число обнаруженных характерных точек.

Кроме того, было изменено количество уровней пирамид, используемых в алгоритме. Пирамидальная структура подразумевает создание множества копий изображения, каждая из которых представлена в уменьшенном размере [9]. Пирамида изображений является системой изображений (рис. 1)¹, формирующейся поэтапно из исходного изображения. На каждом этапе происходит преобразование, в результате которого уменьшается количество строк и столбцов, что позволяет создать последовательные версии с меньшим разрешением¹. Увеличение числа уровней пирамиды приводит к исчезновению мелких деталей изображения ледника, поэтому следует уменьшить число уровней пирамиды.

Для достижения высокой эффективности работы алгоритма AKAZE необходима предварительная обработка изображений. Этот этап направлен на улучшение общего качества входных данных, что существенно влияет на точность последующего анализа и обнаружения связующих точек. В исследовании используются методы, направленные на улучшение четкости и контрастности изображений.

Первым шагом в процессе предварительной обработки является коррекция контрастности, которую следует повысить. Следующий важный этап — это повышение резкости изображений. Ледниковые фотографии нередко содержат тонкие детали, которые могут затусhevываться из-за недостаточной контрастности. Совокупность данных методов предварительной обработки существенно улучшает качество изображений, что, в свою очередь, способствует повышению надежности и точности обнаружения связующих точек.

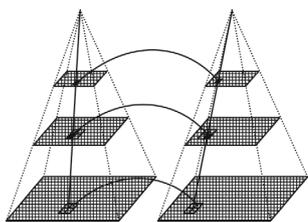
При оценке эффективности предложенного метода особое значение приобретает анализ цифровой модели рельефа (ЦМР), которая служит индикатором качества выполненных измерений и является целью фотограмметрической обработки снимков. Следует отметить, что точность получаемых результатов в значительной степени определяется распределением связующих точек на исследуемой территории. Их оптимальное распределение позволяет существенно повысить достоверность вычисления элементов внешнего ориентирования (ЭВО), что отражается на общей точности создаваемой модели.

В исследовании приводятся результаты уравнивания блока снимков ледника и построения ЦМР, выполненных на основе нахождения связующих точек с помощью алгоритма AKAZE и фотограмметрических систем PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape.

Для исследования был использован блок из 457 снимков на территорию ледника. Они были получены на территорию холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в районе трех полярных станций: «Бхарати» (Индия), «Прогресс» (Россия), «Чжуншань» (Китай). Снимки были получены в рамках 62-й Российской арктической экспедиции с использованием беспилотного летательного аппарата «Геоскан 201» с камерой Sony DSC-RX1R (фокусное расстояние 35 мм, GSD = 0,057 м). На борту был установлен ГНСС-приемник геодезического класса.

Рис. 1 
Пирамида изображений

Fig. 1
Pyramid of images



¹ Чибуничев А.Г. Фотограмметрия: учебник для вузов. М.: Изд-во МИИГАиК, 2022. 328 с.

3 Результаты и обсуждение

На первом этапе была выполнена предварительная обработка всего блока исходных снимков в программном комплексе Adobe Photoshop CC 2014. Были увеличены параметры контрастности и резкости на 25 %. На следующем этапе работы для нахождения связующих точек использовался адаптированный алгоритм AKAZE, написанный на языке Python с установленной библиотекой OpenCV. В данном алгоритме пороговое значение чувствительности при нахождении характерных точек по умолчанию составляет 0,02. Однако в рамках эксперимента это значение было снижено до 0,001. По умолчанию в алгоритме AKAZE количество уровней пирамид составляет 4. В рамках эксперимента значение было уменьшено вдвое для нахождения большего числа связующих точек. После автоматического нахождения и измерения связующих точек они были экспортированы в программный комплекс PHOTOMOD 7.

Дальнейшая обработка изображений выполнялась в программном комплексе PHOTOMOD 7 с целью построения ЦМР. На рис. 2 представлена схема блока с перекрытиями между снимками.

Сначала было проведено уравнивание блока снимков с использованием координат центров проекции. Расхождения по связующим точкам между моделями представлены в табл. 1.

Затем методом SGM (*англ.* Semi-Global Matching) была построена плотная ЦМР с разрешением 24,2 см/пикс. На рис. 3 представлена полученная ЦМР. Как видно, наибольшее значение высоты – 112,59 м, а наименьшее составило –6,85 м.

Таким образом, в ходе первого эксперимента были выполнены идентификация связующих точек посредством модифицированного алгоритма AKAZE и последующий экспорт выявленных точек в программный комплекс PHOTOMOD 7, где осуществлялась дальнейшая обработка блока изображений.

В целях сравнительного анализа была проведена альтернативная обработка того же блока изображений исключительно в среде PHOTOMOD 7, при этом связующие точки определялись с применением встроенных алгоритмов программного комплекса. Расхождения по связующим точкам (между стереопарами) представлены в табл. 2.

Далее также была построена ЦМР (рис. 4), как и в первом случае, методом SGM с разрешением 24,2 см/пикс.

Рис. 2 
 Схема блока
Fig. 2
 Block diagram

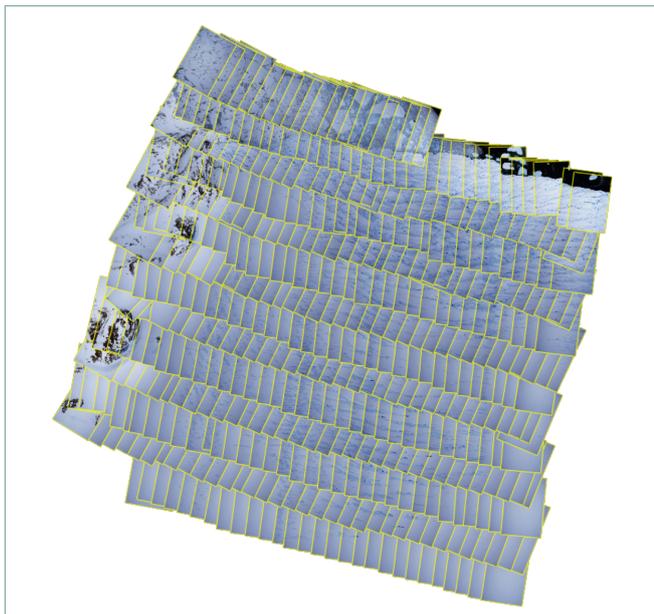


Таблица 1 
 Расхождения по связующим точкам согласно алгоритму AKAZE

Table 1
 Discrepancies in connecting points according to the AKAZE algorithm

	Среднеквадратичное отклонение	Средняя ошибка по модулю
m_{xy} м	0,08	0,03
m_y м	0,11	0,05
m_z м	0,50	0,23
E_{xy} м	0,14	0,07

Таблица 2 
 Расхождения по связующим точкам согласно алгоритму PHOTOMOD 7

Table 2
 Discrepancies in connecting points according to the PHOTOMOD 7 algorithm

	Среднеквадратичное отклонение	Средняя ошибка по модулю
m_{xy} м	0,15	0,14
m_y м	0,18	0,15
m_z м	0,49	0,31
E_{xy} м	0,20	0,17

Рис. 3 
Плотная ЦМР (эксперимент 1)
Fig. 3
Dense DEM (the 1th experiment)

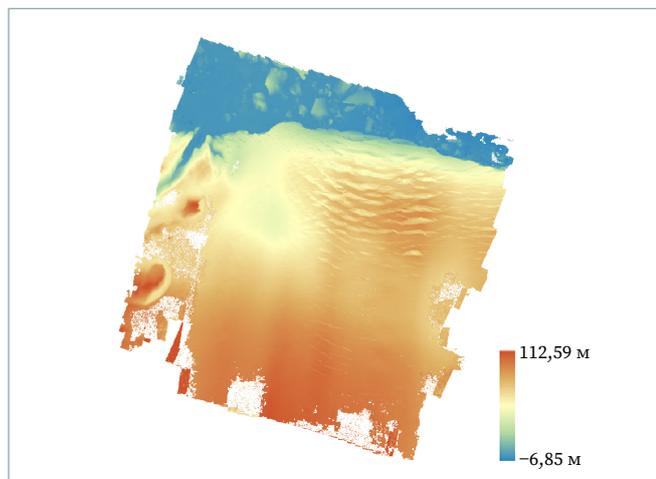


Рис. 4 
Плотная ЦМР (эксперимент 2)
Fig. 4
Dense DEM (the 2nd experiment)

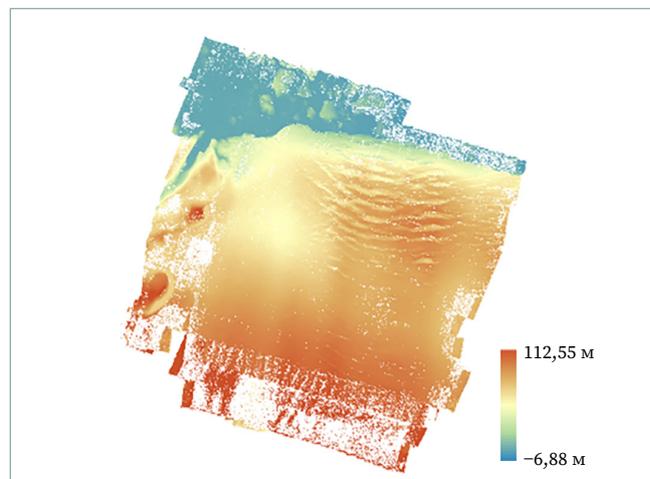
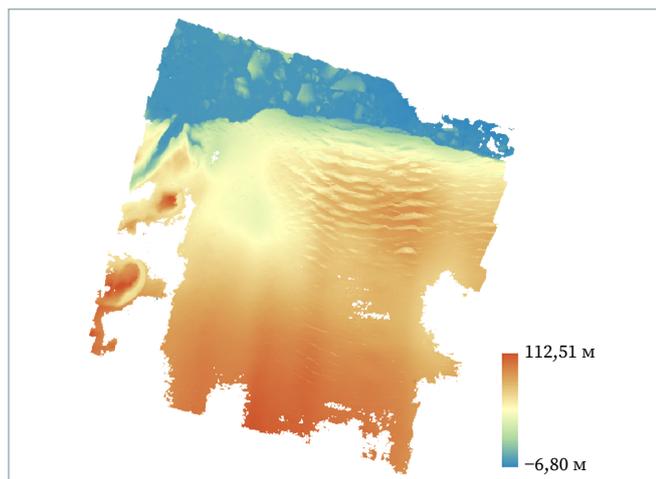


Рис. 5 
Плотная ЦМР (эксперимент 3)
Fig. 5
Dense DEM (the 3rd experiment)



Как видно по рис. 4, наибольшее значение высоты — 112,55 м, а наименьшее составило –6,88 м. На матрице высот большое количество дыр. Это происходит из-за наличия фотограмметрических разрывов (отсутствия ЭВО некоторых снимков), вызванных отсутствием связующих точек или их малым количеством на некоторых снимках [10].

Сравним методы по числу найденных связующих точек и обработанных стереопар. Результаты представлены в табл. 3.

Сравнение двух методов показало, что алгоритм PHOTOMOD 7 обнаружил на 6591 связующую точку больше по сравнению с алгоритмом AKAZE. Однако алгоритм AKAZE не сумел выявить связующие точки на трех изображениях, в то время как алгоритм PHOTOMOD 7 не смог найти связующие точки на 37 изображениях.

Дополнительно (для сравнения) в программном комплексе Agisoft Metashape была проведена обработка блока изображения с построением ЦМР (рис. 5)

с разрешением 24,2 см/пикс. Получены следующие результаты обработки: было обнаружено 704 967 связующих точек, ошибка репроецирования составила 0,61 м.

Таблица 3 
Сравнение количества связующих точек и обработанных изображений

Table 3
Comparison of the number of tie points and processed images

Маршрут	AKAZE		PHOTOMOD 7	
	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте
1	1955	27 / 27	1163	22 / 27
2	3385	31 / 33	2609	28 / 33
3	2359	33 / 34	3040	30 / 34
4	3024	33 / 33	3516	32 / 33
5	2723	33 / 33	3994	30 / 33
6	2367	33 / 33	3224	29 / 33
7	2183	33 / 33	3143	33 / 33
8	2280	33 / 33	3706	33 / 33

Маршрут	АКАZE		PHOTOMOD 7	
	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте	Количество связующих точек	Обработано снимков / всего в маршруте
9	2933	33 / 33	3216	33 / 33
10	3304	33 / 33	4192	32 / 33
11	3404	33 / 33	5586	28 / 33
12	4303	33 / 33	3402	29 / 33
13	4222	33 / 33	3520	30 / 33
14	3969	33 / 33	4691	31 / 33
Всего	42 411	454 / 457	49 002	420 / 457

На рис. 6 представлен пример распределения связующих точек по полю изображения после нахождения и измерения связующих точек разными алгоритмами. Как видно, наилучшее распределение точек по полю снимка у алгоритма АКАZE.

При анализе количества связующих точек наилучшие показатели продемонстрировал алгоритм, реализованный в программном комплексе Agisoft Metashape. При этом статистический анализ распределения связующих точек показал, что большинство точек, идентифицированных алгоритмом Agisoft Metashape, концентрируется вокруг какого-либо контура, а не равномерно по снимку.

Поскольку распределение связующих точек влияет в первую очередь на вычисление ЭВО снимков, было выполнено сравнение ЭВО, полученных в результате уравнивания сети точек, измеренных с помощью алгоритма АКАZE, алгоритмами PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape. В табл. 4 и 5 представлены минимальные и максимальные значения по всем шести элементам разности, а также среднее квадратичное отклонение и среднее значение.

Рис. 6  Распределение связующих точек по полю снимка

Fig. 6 Distribution of tie points across the image field



Таблица 4  Величина расхождений в ЭВО АКАZE – PHOTOMOD 7

Table 4 The amount of discrepancies in the EOP АКАZE – PHOTOMOD 7

Параметр	Элемент					
	X, м	Y, м	Z, м	roll, град	pitch, град	yaw, град
min	0,07	0,03	-0,02	0	0	0,01
max	3,21	1,88	7,09	0,35	0,12	0,32
Среднее (по модулю)	0,81	0,49	0,45	0,08	0,04	0,11
Среднеквадратичное отклонение	0,90	0,57	0,58	0,11	0,05	0,14

Таблица 5  Величина расхождений в ЭВО АКАZE – Agisoft Metashape

Table 5 The amount of discrepancies in the EOP АКАZE – Agisoft Metashape

Параметр	Элемент					
	X, м	Y, м	Z, м	roll, град	pitch, град	yaw, град
min	0,09	-0,1	-0,11	0	0	0,01
max	2,22	1,67	3,08	0,44	0,14	0,18
Среднее (по модулю)	0,70	0,33	0,39	0,10	0,03	0,10
Среднеквадратичное отклонение	0,79	0,45	0,54	0,14	0,05	0,12

Рис. 7 
Значения величин
среднеквадратичного
отклонения по шести
элементам

Fig. 7
The average standard deviation
of values for six elements

Условные обозначения
 AKAZE – Agisoft Metashape
 AKAZE – PHOTOMOD 7

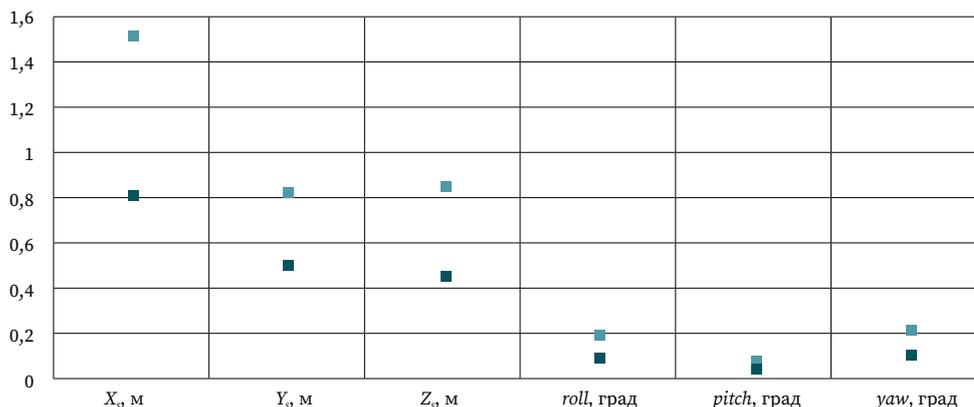


Рис. 8 
Разность матриц высот AKAZE – PHOTOMOD 7

Fig. 8
AKAZE – PHOTOMOD 7 height matrix difference

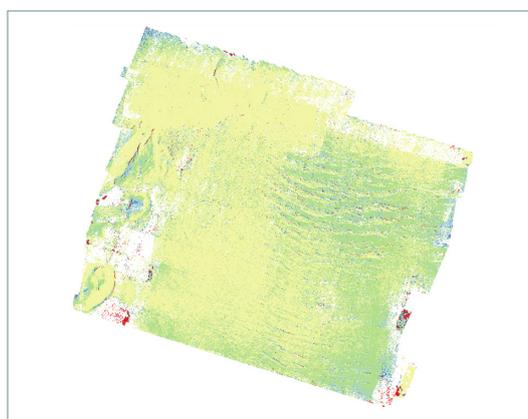
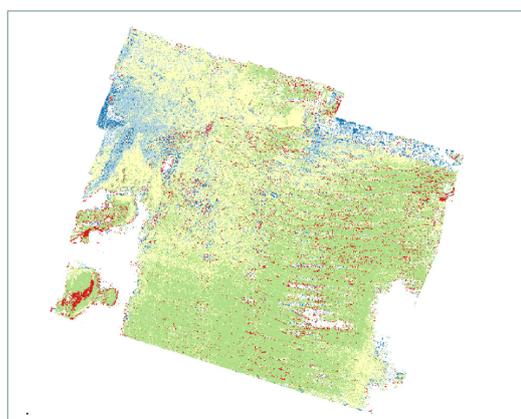


Рис. 9 
Разность матриц высот AKAZE – Agisoft Metashape

Fig. 9
AKAZE – Agisoft Metashape height matrix difference



Условные обозначения
 Значение разностей, м
 ≤ 0,4
 0,4–0,5
 0,5–0,6
 0,6–0,7
 >0,7

Ошибка в вычислениях ЭВО приводит к неверному моделированию рельефа в целом, что имеет значение при анализе изменений поверхности ледника во времени. На рис. 7 показан график значения величин среднеквадратичного отклонения по всем шести элементам разности.

Для оценки распределения ошибок были построены и визуализированы в геоинформационной системе QGIS матрицы разности двух ЦМР (AKAZE – PHOTOMOD 7, AKAZE – Agisoft Metashape) (рис. 8–9). Значения представлены в метрах. Среднеквадратичное отклонение матрицы разности высот для AKAZE – PHOTOMOD 7 составило 0,43 м, а для AKAZE – Agisoft Metashape – 0,36 м.

Хотя среднеквадратичное отклонение двух разниц сопоставимо, характер распределения ошибок разный. На рис. 6 можно видеть линейные структуры, повторяющие межмаршрутное перекрытие, что является прямым следствием ошибок уравнивания при нехватке связующих точек. На рис. 9 максимальные ошибки распределены по краям трещин, отчасти это связано еще и с разностью алгоритмов построения ЦМР.

Дополнительно для наглядности были построены профили для двух матриц разности высот (рис. 10–11).

При сравнении матриц выявляются систематические ошибки. Во-первых, ЦМР на основе алгоритма AKAZE в целом выше остальных, потому что все расхождения имеют положительное значение. Во-вторых, ЦМР на основе алгоритма PHOTOMOD 7 имеет наклон относительно ЦМР на основе алгоритма AKAZE. Причиной этой ошибки может быть разница не только в ЭВО, но и в параметрах внутреннего ориентирования (дисторсия объектива), которые уточняются в результате фототриангуляции с самокалибровкой [11]. При сравнении ЦМР на основе алгоритмов Agisoft Metashape и AKAZE основные ошибки сосредоточены по краям трещин, что отчасти определяется разностью алгоритмов построения ЦМР в программных комплексах PHOTOMOD 7 и Agisoft Metashape [10].

Рис. 10 ⌵

Профиль матриц разности высот AKAZE – PHOTOMOD 7

Fig. 10

AKAZE – PHOTOMOD 7 difference matrix profile

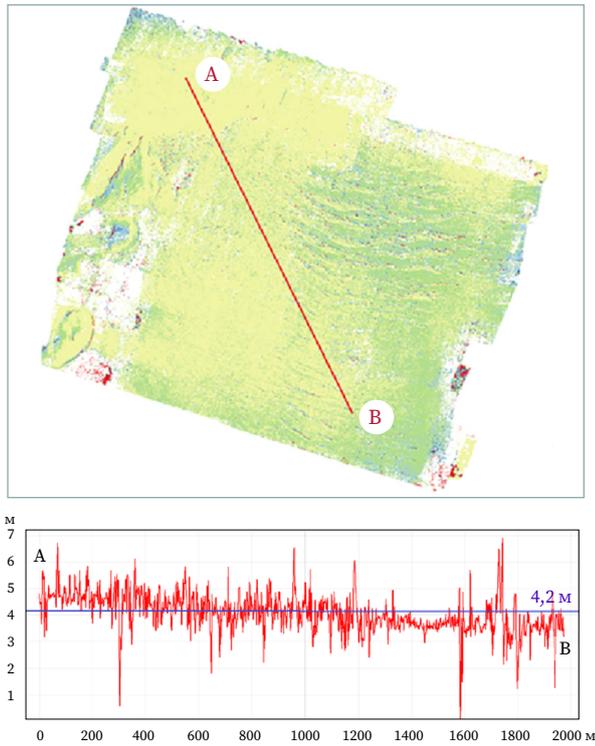
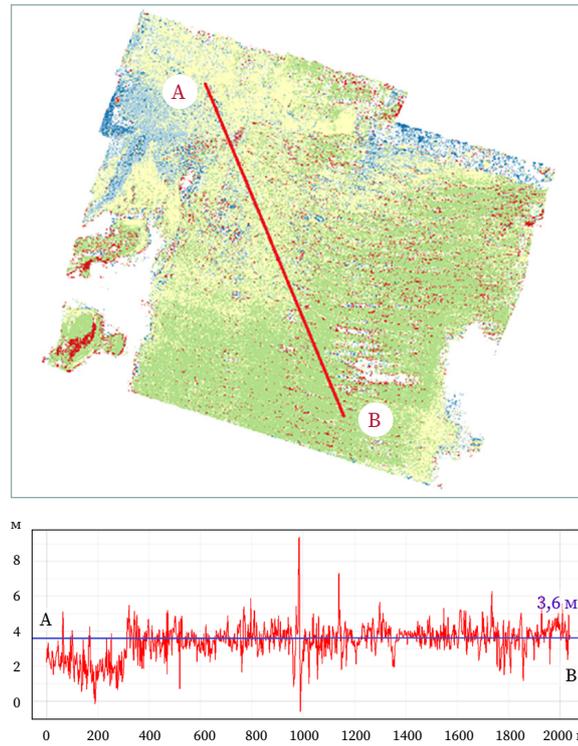


Рис. 11 ⌵

Профиль матриц разности высот AKAZE – Agisoft Metashape

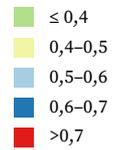
Fig. 11

AKAZE – Agisoft Metashape difference matrix profile



Условные обозначения

Значение разностей, м



4 Выводы

Результаты исследования демонстрируют существенную зависимость точности воспроизведения рельефа от качества выполненной фототриангуляции, причем определяющим фактором выступает алгоритм нахождения связующих точек. Особенности ледяной поверхности как объекта съемки создают значительные трудности при автоматическом отождествлении характерных точек, что подтверждается существенным расхождением в количестве и распределении связующих точек, полученных в двух программных комплексах. Данное несоответствие повлекло за собой различия в вычислении элементов внешнего и внутреннего ориентирования, что в итоге привело к различию в построении ЦМР.

Алгоритм AKAZE продемонстрировал лучший результат в расхождении на связующих точках, а также в их распределении по полю снимков. В результате практически для всех снимков удалось получить ЭВО и построить ЦМР, тогда как с помощью стандартных программ получались фотограмметрические разрывы (для отдельных снимков не определены ЭВО) из-за отсутствия или малого числа и плохого расположения связующих точек.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. Kääh A., Huggel C., Fischer L., et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview // *Natural Hazards and Earth System Science*. 2005. Vol. 5(4). P. 527–554. DOI:10.5194/nhess-5-527-2005.
2. Paul F., Bolch T., Kääh A., et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products // *Remote Sensing of Environment*. 2015. Vol. 162. P. 408–426. DOI:10.1016/j.rse.2013.07.043.
3. Bhardwaj A., Sam L., Akanksha, et al. UAVs as a remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects // *Remote Sensing of Environment*. 2016. Vol. 175. P. 196–204. DOI:10.1016/j.rse.2015.12.029.

4. Скрыпицына Т.Н., Захаров В.Г., Киселева А.С. и др. Эволюция рельефа выводного ледника Долк (залив Прюдс, Восточная Антарктида) по данным беспилотных аэрофотосъемок 2017–2019 годов // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2021. Т. 65, № 5. С. 517–528. DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528.
5. Казаков Э.Э., Волков В.А., Демчев Д.М. Система оперативного мониторинга морского льда в Арктике, основанная на открытых спутниковых радиолокационных данных // Сборник материалов II Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения». СПб.: Политехника, 2017. С. 33–39.
6. Нефедова О.А., Чибуничев А.Г., Журкин И.Г. Исследование алгоритмов автоматического нахождения и измерения связующих точек на снимках ледника, полученных с БВС // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2024. Т. 68, № 5. С. 31–43. DOI:10.30533/GiA-2024-037.
7. Tareen S.A.K., Saleem Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK // International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET). Sukkur: IEEE, 2018. P. 1–10. DOI:10.1109/ICOMET.2018.8346440.
8. Yang X., Cheng K.T. LDB: An ultra-fast feature for scalable augmented reality // IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR). Atlanta: IEEE, 2012. P. 49–57. DOI:10.1109/ISMAR.2012.6402537.
9. Kalms L., Khaled M., Gzhringer D. Accelerated Embedded AKAZE Feature Detection Algorithm on FPGA // HEART'17: Proceedings of the 8th International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies. New York: ACM, 2017. P. 10. DOI:10.1145/3120895.3120898.
10. Смирнов А.В., Скрыпицына Т.Н., Зубков С.А. Особенности фотограмметрической обработки съемки айсбергов, полученной с беспилотного воздушного судна // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». 2022. Т. 66, № 3. С. 42–59. DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-3-42-59.
11. James M.R., Antoniazza G., Robson S., et al. Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection: accuracy, precision and considerations beyond off-nadir imagery // Earth Surface Processes and Landforms. 2020. Vol. 45. Is. 10. P. 2251–2271. DOI:10.1002/esp.4878.

АВТОР Нефедова Ольга Александровна

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет геодезии и картографии»
(МИИГАиК), Москва, Россия

кафедра фотограмметрии, факультет геодезии

 0009-0005-6240-8014

Поступила 23.03.2025. Принята к публикации 24.10.2025. Опубликовано 31.10.2025.



A Study of the Algorithm for Automatically Finding and Measuring AKAZE Connection Points in Glacier Images Taken from the Unmanned Aerial Vehicle

Olga A. Nefedova¹✉

¹ Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
✉ o.nefedova2011@yandex.ru

CITATION Nefedova OA. A Study of the Algorithm for Automatically Finding and Measuring AKAZE Connection Points in Glacier Images Taken from the Unmanned Aerial Vehicle. *Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2025;69(5): 35–45. DOI:10.30533/GiA-2025-036.

KEYWORDS unmanned aerial photography, aerial photographs of the glacier, connecting points, detector, descriptor, phototriangulation, digital terrain model

ABSTRACT This work is aimed at investigating the effectiveness of the adapted AKAZE algorithm for processing images of the surface of glaciers, which have a complex structure due to the variety of textures, cracks and variability of lighting conditions. Glacial surfaces pose a challenge to traditional image processing methods, as the qualities of the connecting points can vary significantly depending on the environment. In the study, preliminary image processing was carried out, which made it possible to increase the accuracy of finding the connecting points necessary for accurate modeling. Using the Python programming language, the AKAZE algorithm was implemented to find and measure connecting points in images. The images were then transferred to the PHOTOMOD 7 software package, where several subsequent processing steps were carried out to create a digital relief model. A full cycle of processing of the same block was also performed using internal algorithms in the PHOTOMOD 7 and Agisoft Metashape software package to compare results and evaluate quality. A comparative analysis of the obtained elevation matrices demonstrated the effectiveness of the AKAZE algorithm in the context of processing complex glacial surfaces. The results of the study highlight its potential in geoinformation tasks and open up new horizons for further research in the field of photogrammetry and monitoring of natural objects.

REFERENCES 1. Kääh A, Huggel C, Fischer L, et al. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview. *Natural Hazards and Earth System Science*. 2005;5(4): 527–554. DOI:10.5194/nhess-5-527-2005.

2. Paul F, Bolch T, Kääb A, et al. The glaciers climate change initiative: Methods for creating glacier area, elevation change and velocity products. *Remote Sensing of Environment*. 2015;162: 408–426. DOI:10.1016/j.rse.2013.07.043.
3. Bhardwaj A, Sam L, Akanksha, et al. UAVs as a remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects. *Remote Sensing of Environment*. 2016;175: 196–204. DOI:10.1016/j.rse.2015.12.029.
4. Skrypitsyna TN, Zakharov VG, Kiseleva AS, et al. Evoljucija rel'efa vyvodnogo lednika Dolk (zaliv Prjuds, Vostochnaja Antarktida) po dannym bespilotnyh ajerofotos'emok 2017–2019 godov [Evolution of the relief of the Dolk outlet glacier (Prudes Bay, East Antarctica) according to unmanned aerial photographs from 2017–2019]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2021;65(5): 517–528. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2021-65-5-517-528.
5. Kazakov EE, Volkov VA, Demchev DM. Sistema operativnogo monitoringa morskogo l'da v Arktike, osnovannaja na otkrytyh sputnikovyh radiolokacionnyh dannyh [An operational monitoring system for sea ice in the Arctic based on open satellite radar data]. *Proceedings of the II International Scientific and Practical Conference "Geodesy, Cartography, Geoinformatics and Cadastre. From Idea to Application"*. St. Petersburg: Politehnika; 2017: 33–39. (In Russian).
6. Nefedova OA, Chibunichev AG, Zhurkin IG. Issledovanie algoritmov avtomaticheskogo nahozhdenija i izmerenija svjazujuvih toček na snimkah lednika, poluchennyh s BVS [Study of algorithms for automatic detection and measurement of tie points in glacier images obtained from UAVs]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2024;68(5): 31–43. (In Russian). DOI:10.30533/GiA-2024-037.
7. Tareen SAK, Saleem Z. A comparative analysis of SIFT, SURF, KAZE, AKAZE, ORB, and BRISK. *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET)*. Sukkur: IEEE, 2018: 1–10. DOI:10.1109/ICOMET.2018.8346440.
8. Yang X, Cheng KT. LDB: An ultra-fast feature for scalable augmented reality. *IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality (ISMAR)*. Atlanta: IEEE; 2012: 49–57. DOI:10.1109/ISMAR.2012.6402537.
9. Kalms L, Khaled M, Gzhringer D. Accelerated Embedded AKAZE Feature Detection Algorithm on FPGA. *HEART'17: Proceedings of the 8th International Symposium on Highly Efficient Accelerators and Reconfigurable Technologies*. New York: ACM; 2017: 10. DOI:10.1145/3120895.3120898.
10. Smirnov AV, Skrypitsyna TN, Zubkov SA. Osobennosti fotogrammetricheskoy obrabotki s'emki ajsbergov, poluchennoj s bespilotnogo vozdušnogo sudna [Features of photogrammetric processing of iceberg surveys obtained from an unmanned aircraft]. *Izvestiya vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*. 2022;66(3): 42–59. (In Russian). DOI:10.30533/0536-101X-2022-66-3-42-59.
11. James MR, Antoniazza G, Robson S, et al. Mitigating systematic error in topographic models for geomorphic change detection: accuracy, precision and considerations beyond off-nadir imagery. *Earth Surface Processes and Landforms*. 2020;45(10): 2251–2271. DOI:10.1002/esp.4878.

AUTHOR Olga A. Nefedova

Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, Russia
 Department of Photogrammetry, Faculty of Geodesy

 0009-0005-6240-8014

Submitted: March 23, 2025. Accepted: October 24, 2025. Published: October 31, 2025.