

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ»

На правах рукописи



Бляхарский Дмитрий Петрович

**МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ЛЕДНИКОВЫХ
ПОВЕРХНОСТЕЙ
ПО ДАННЫМ БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Флоринский Игорь Васильевич

Москва – 2021

Содержание

Обозначения и сокращения.....	6
ВВЕДЕНИЕ.....	7
ГЛАВА 1 МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА, БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ	15
1.1 Ледники как объект гляциологических исследований	15
1.2 Использование ЦМР низкого и среднего разрешения в гляциологических исследованиях	16
1.3 Использование материалов беспилотной аэрофотосъемки, включая ЦМР высокого и сверхвысокого разрешения, в гляциологических исследованиях	24
1.4 Центры проекций снимков.....	31
1.5 Геоморфометрическое моделирование.....	33
Выводы по главе 1.....	36
ГЛАВА 2 БЕСПИЛОТНАЯ АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ.....	37
2.1 ЦМР как результат беспилотной аэрофотосъемки.....	37
2.2 Аэрофотосъемочные работы.....	39
2.2.1 Характеристики БАС	40
2.2.2 Район исследований.....	41
2.2.3 Аэрофотосъемка	42
2.3 Фотограмметрические работы	46
2.4 Геоморфометрическое моделирование.....	51
2.5 Анализ результатов моделирования	54

2.6	Методика фотограмметрической обработки и беспилотной аэрофотосъемки для целей геоморфометрического моделирования ..	60
2.6.1	Общие сведения	60
2.6.2	Камера	61
2.6.3	Аэрофотосъемка с использованием БАС	64
2.6.4	Камеральные работы	67
	Выводы по главе 2.....	69
ГЛАВА 3 ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАС НА ЛЕДНИКАХ ГОРНОГО И ПОКРОВНОГО ТИПА		70
3.1	Предпосылки разработки методики применения БАС в сложных условиях горного и покровного оледенения.....	70
3.2	Особенности аэрофотосъемочных работ с использованием БАС в сложных условиях горного и покровного оледенения	71
3.2.1	Наземная станция управления полетом.....	73
3.2.1.1	Картографические материалы для НСУ	73
3.2.1.2	Составление полетного задания	74
3.2.2	Выбор стартовой площадки	75
3.2.3	Конструктивные особенности БАС	77
3.2.4	Принципы работы запрограммированных команд, автопилот БАС	80
3.2.5	Погодные условия	84
3.2.6	Планово-высотная подготовка аэрофотосъемки	86
	Выводы по главе 3.....	88
ГЛАВА 4 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ		89

4.1 Горный массив Табын-Богдо-Ола (Западная Монголия)	89
4.2 Аэрофотосъемка и геодезическое сопровождение	90
4.2.1 Аэрофотосъемочные работы.....	90
4.2.2 Геодезическое сопровождение аэрофотосъемки	91
4.2.3 Камеральная обработка материалов съемки	93
4.2.4 Оценка точности разности разновременных ЦМР	97
4.3 Геоморфометрический способ расчета динамических гляциологических характеристик.....	100
4.4 Апробация разработанного способа расчета динамических гляциологических характеристик.....	102
4.4.1 Промежуточные материалы.....	102
4.4.2 Горизонтальная и вертикальная скорость	102
4.4.3 Отступление языка ледника.....	105
4.4.4 Объем стаявшего / накопленного материала	105
4.4.5 Границы области питания и фирна	106
Выводы по главе 4.....	109
ГЛАВА 5 ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ЛЕДНИКОВЫХ ТРЕЩИН.....	110
5.1 Антарктида.....	110
5.1.1 Полярные станции.....	110
5.1.2 Покровное оледенение и ледниковые трещины	110
5.2 62-ая РАЭ	113
5.2.1 Область исследования	113
5.2.2 Аэрофотосъемочные работы.....	114
5.2.3 Камеральная обработка материалов съемки	120

5.2.4 Оценка точности ЦМР	125
5.2.5 Анализ движения поверхности льда	126
5.3 Выявления скрытых ледниковых трещин	127
5.3.1 Геоморфометрический способ.....	128
5.3.2 Апробация геоморфометрического способа выявления скрытых ледниковых трещин	130
5.3.3 Верификация геоморфометрического способа выявления ледниковых трещин	135
5.3.3.1 Текстурные признаки Харалика	135
5.3.3.2 Оценка эффективности двух способов	139
Выводы по главе 5.....	145
ГЛАВА 6 КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ПРОСЕДАНИЕ НА ЛЕДНИКЕ ДОЛК (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА).....	146
6.1 Провалы и ледники	146
6.2 Исследование на леднике Долк	146
6.3 Интерпретация катастрофического проседания	152
Выводы по главе 6.....	155
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	156
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	157
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	181
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	190

Обозначения и сокращения

БАС	беспилотная авиационная система
ВПП	взлетно-посадочная полоса
ГНСС	глобальные навигационные спутниковые системы
ДДЗ	данные дистанционного зондирования
КМОП	Комплементарная структура металл – оксид – полупроводник
КЦП	координаты центра проекции
НСУ	наземная станция управления
ПВП	планово-высотная подготовка
РАЭ	Российская антарктическая экспедиция
СГП	санно-гусеничный поход
ЦМП	цифровая модель поверхности
ЦМР	цифровая модель рельефа
ASTER	Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection
ITRS	International Terrestrial Reference System
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
CA	водосборная площадь
G	Уклон
k_h	горизонтальная кривизна
k_{max}	максимальная кривизна
k_{min}	минимальная кривизна
k_v	вертикальная кривизна

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы

Области покровного и горного оледенения находятся в центре внимания наук о Земле. Это связано с рядом научных, экономических и политических факторов. В частности, одной из важнейших задач государства является обеспечение развития территорий Арктики – зоны стратегических интересов России. Не менее важной геополитической задачей является обеспечение присутствия Российской Федерации в Антарктическом регионе. Серьезным политическим инструментом становится доступ к источникам пресной воды, которыми являются горные ледники.

Кроме того, области покровного и горного оледенения оказывают существенное влияние на изменения климата на глобальном уровне. С другой стороны, динамика горных ледников является косвенным индикатором региональных климатических изменений.

К тому же, ледники находятся в непрерывном движении, что приводит к постоянным изменениям геометрии ледниковых поверхностей. Эти изменения могут быть как медленными, так и катастрофическими. В частности, на поверхности ледников образуются трещины и провалы, которые представляют опасность для исследователей. Некоторые естественные процессы на горных ледниках (прорывы ледниковых озер, ледниковые оползни) могут приводить к катастрофическим последствиям в прилегающих населенных долинах. В этой связи актуален оперативный мониторинг и безопасное изучение ледников.

В последней четверти прошлого века произошло существенное изменение подходов наблюдения за ледниками: от прямых полевых работ к дистанционному зондированию. Последние 15 лет для этих целей все чаще применяют беспилотные аэрофотосъемочные системы (БАС). Это потребовало совершенствования теоретической и аппаратной базы беспилотной аэрофотосъемки и методов обработки полученных результатов. В частности, одним из наиболее перспективных подходов к изучению

ледников является их геоморфометрическое моделирование по цифровым моделям рельефа (ЦМР) сантиметрового и дециметрового пространственного разрешения, полученным по материалам беспилотной аэрофотосъемки.

Степень разработанности проблемы

Применение ЦМР и методов геоморфометрии в гляциологии началось в 1990-е гг. В 1993 г. И.А. Суетова и С.В. Чистов [39] создали по картографическим материалам мелкомасштабные ЦМР фрагмента поверхности Антарктиды. В 1997 г. Б. Этцельмюллер и Дж.Л. Соллид [85] ввели понятие «ледниковой геоморфометрии» и составили по разновременным аэрофотоснимкам серию ЦМР нескольких ледников Шпицбергена. В дальнейшем в гляциологии использовались ЦМР различного разрешения отдельных ледников, их фрагментов, а также всей Антарктиды и Гренландии.

ЦМР ледниковых поверхностей создают по топографическим картам, материалам аэро- и космических съемок, наземных топографических и лидарных съемок и используют для оценки и изучения динамики ледников и снежников, их объемов и др. [27, 83, 14, 168, 78, 164, 100, 129, 10, 53, 58, 4, 102, 116, 37].

Беспилотную аэрофотосъемку ледников впервые применили в 2007 г. А. Ходсон с соавт. [120]. Этот метод и получаемые с его помощью детальные ЦМР использовались для анализа динамики ледников, скорости их движения, изучения ледниковой дренажной сети и пр. [206, 123, 169, 171, 128, 55, 26].

Нерешенной проблемой беспилотной аэрофотосъемки ледников остается сложность или невозможность выполнения условий планово-высотного обоснования (отсутствие наземных опорных точек). Это связано с ограничениями техники безопасности во время выполнения исследований (опасность ледниковых трещин) и непрерывным движением ледниковой поверхности. Решением может стать использование в качестве опорной информации центров проекции снимков [71, 194] и профессионального

аэрофотосъемочного и геодезического оборудования.

За последние 20 лет в развитии теории и методов геоморфометрии отмечен существенный прогресс, о чем свидетельствует ряд сводных работ и монографий по этой тематике [207, 176, 117, 89, 91]. Однако, эти достижения до сих пор не нашли должного применения в гляциологических исследованиях.

Цель и задачи исследования

Цель работы: разработать комплексную методику моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки, включающую три основных компонента: полевые работы, камеральную обработку полученных материалов и геоморфометрический анализ данных. Для этого необходимо было решить следующие задачи:

1. Разработать методику беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования.
2. Разработать методику проведения беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников с использованием в качестве опорной информации центров проекции снимков.
3. Разработать геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик по данным разновременной беспилотной аэрофотосъемки.
4. Разработать геоморфометрический способ выявления ледниковых трещин по данным беспилотной аэрофотосъемки.
5. Апробировать разработанные методики при изучение высокогорных ледников Монгольского Алтая и покровных ледников Антарктиды.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются цифровые модели рельефа

ледниковых поверхностей. Предметом исследования является фотограмметрическое и геоморфометрическое моделирование рельефа ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки.

Научная новизна исследования

Автором впервые разработана комплексная методика, включающая:

1) Методику проведения беспилотной аэрофотосъемки в сложных условиях горного и покровного оледенения с использованием в качестве опорной информации центров проекций снимков.

2) Методику фотограмметрической обработки материалов беспилотной аэрофотосъемки, которая обеспечивает получение ЦМР ледниковых поверхностей, обладающих точностью и качеством, необходимым для последующего геоморфометрического моделирования.

3) Методику геоморфометрического моделирования и дешифрирования ЦМР, полученных по материалам беспилотной аэрофотосъемки, который обеспечивает расчет и картографирование серии моделей динамических гляциологических характеристик и выявление ледниковых трещин.

Теоретическая и практическая значимость

Теоретическая значимость работы состоит в развитии теории беспилотной аэрофотосъемки в контексте геоморфометрического моделирования и гляциологических исследований.

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной методики при проведении исследований в условиях оледенения Арктики, Антарктики и высокогорья.

Результаты исследования были внедрены в ООО «Геоскан» для создания модификаций серийных беспилотных аэрофотосъемочных систем и программного обеспечения планирования полетного задания, предназначенных для использования в полярных и высокогорных условиях.

Методология и методы исследования

В ходе работы использованы методы беспилотной аэрофотосъемки, глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС), фотограмметрии, геоморфометрии, математической статистики и геоинформатики.

Для проведения беспилотной аэрофотосъемки использовались БАС Геоскан 101 Геодезия и Геоскан 201 Геодезия, оснащенные приемниками ГНСС геодезического класса Topcon b110 и камерами Sony NEX-5N и Sony DSC-RX1. В качестве базовых станций и для геодезических измерений на разных этапах применялись ГНСС-приемники Trimble R6-2 Internal, Trimble R8 Internal, Javad Prego Lite и Topcon HiPer V. Для вспомогательной беспилотной видеосъемки на одном из этапов был применен БАС мультироторного типа DJI Phantom 4.

Для обработки материалов беспилотной аэрофотосъемки использован программный комплекс Agisoft PhotoScan Professional, версии 1.2.4, 1.2.5 и 1.3.2. Обработка измерений бортовых ГНСС-приемников и наземных геодезических измерений выполнено в программном обеспечении Pinnacle 1.0, Trimble Business Center 2.0 и Magnet Office Tools 2.8. Геоморфометрическое моделирование на разных этапах проведено в программных комплексах ArcMap 10.0, ENVI Classic 2.7, MatLab R2008b, LandLord 4.0, QGIS 3.00 и MapInfo Pro 16.0.1.

Защищаемые положения

На защиту выносятся комплексная методика моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки, включающая в себя:

1. Методику беспилотной аэрофотосъемки фотограмметрической обработки и для целей геоморфометрического моделирования.
2. Методику беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников с использованием в качестве опорной информации центров проекции снимков.

3. Геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик по данным разновременной беспилотной аэрофотосъемки.

4. Геоморфометрический способ выявления ледниковых трещин по данным беспилотной аэрофотосъемки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности

Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.34 «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» по п. 4 «Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследования».

Степень достоверности и апробация результатов исследования

Достоверность полученных результатов основана на следующих положениях: 1) Использование современного профессионального аэрофотосъемочного и геодезического оборудования; 2) Использование высококачественных материалов беспилотной аэрофотосъемки сантиметрового разрешения; 3) Применение методов беспилотной аэрофотосъемки, ГНСС, фотограмметрии, геоморфометрии, математической статистики и геоинформатики; 4) Применение современного специализированного программного обеспечения.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и российских конференциях: International symposium on glaciology in high-mountain Asia “IGS-2015” (Kathmandu, Nepal, 2–6 марта 2015); IX Всероссийская конференция «Геоинформационные технологии и космический мониторинг» (Дюрсо, 12–16 сент. 2016); Всероссийская научная конференция «Международный год карт в России: объединяя пространство и время» (Москва, 25–28 окт. 2016); XVIII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и студентов (Нерюнгри, 30 марта – 1 апр. 2017); 2-я Международная научно-практическая конференция

«Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры» (Санкт-Петербург, 8–10 нояб. 2017); 4th International conference on geographical information systems theory, applications and management “GISTAM 2018” (Funchal, Portugal, 17–19 марта 2018); Международная молодежная научная конференция по геодезии, гляциологии, гидрологии и геофизике полярных регионов (Санкт-Петербург, 17–19 мая 2018); 5th International conference “Geomorphometry 2018” (Boulder, CO, USA, 13–17 авг. 2018); Всероссийская научно-практическая конференция «Цифровая география» (Пермь, 16–18 сент. 2020); XVII Гляциологический симпозиум (Санкт-Петербург, 17–20 нояб. 2020).

Личный вклад

Соискатель принимал участие в трех экспедициях на хребет Табын-Богдо-Ола, Монгольский Алтай (авг. 2014, июнь и авг. 2015), а также в 62-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в районе полевой базы Молодежная и полярной станции Прогресс (дек. 2016 – март 2017). Соискатель лично организовал и провел беспилотные аэрофотосъемочные работы и их планово-высотное обоснование, а также участвовал в гляциогидрогеофизических исследованиях в районах экспедиционных работ. Соискатель лично выполнил камеральную обработку материалов беспилотной аэрофотосъемки в Монгольском Алтае и руководил камеральной обработкой материалов беспилотной аэрофотосъемки 62-й РАЭ. Соискатель лично провел беспилотные аэрофотосъемочные работы на Заокском геополигоне МИИГАиК и выполнил камеральную обработку полученных материалов. Соискатель лично разработал методику беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников, а также способ определения геоморфометрических гляциологических характеристик по данным беспилотной аэрофотосъемки. Соискатель принял ключевое участие в разработке методики беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования, а также геоморфометрического способа выявления ледниковых трещин по данным

беспилотной аэрофотосъемки. Соискатель лично провел геоморфометрическое моделирование по полученным ЦМР и принимал участие в интерпретации полученных результатов.

Соискатель являлся исполнителем проекта Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ) № 17-37-50011 «Геоморфометрическое моделирование ледникового трещинообразования по данным беспилотной аэрофотосъемки» (2017–2018), а также является исполнителем проекта РФФИ и Государственного фонда естественных наук Китая № 20-51-53016 «Моделирование и анализ эволюции микрорельефа поверхности ледников по данным беспилотной аэрофотосъемки (на примере района холмов Ларсеманн, Восточная Антарктида)» (2020–2022).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 23 работы, в том числе 11 статей в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК. Из них – 6 статей в журналах, индексируемых в системах цитирования Web of Science (Science Citation Index Expanded) и Scopus.

Структура и объем диссертации

Работа включает в себя введение, 6 глав, заключение, список литературы (212 наименований) и 2 приложения. Общий объем: 192 страницы, включая 41 рисунок и 12 таблиц.

Благодарности

Выражаю благодарность доценту кафедры фотограмметрии МИИГАиК Т.Н. Скрипицыной за обсуждение и конструктивную критику работы. За помощь в организации и проведении полевых исследований благодарю В.М. Куркова, М.В. Сыромятину, К.В. Чистякова, С.В. Попова, С.С. Пряхина и А.В. Миракина. Отдельно благодарю компанию «Геоскан» и А.Е. Семенова за предоставленное оборудование.

ГЛАВА 1

МЕЖДУНАРОДНЫЙ ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕЛЬЕФА, БЕСПИЛОТНОЙ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ

В главе изложена степень разработанности проблемы исследования. § 1.1 посвящен краткому описанию типологии ледников. Использованию ЦМР низкого и среднего разрешения в гляциологических исследованиях посвящен § 1.2. В § 1.3 дан обзор применения материалов беспилотной аэрофотосъемки, включая ЦМР высокого и сверхвысокого разрешения, в гляциологии. Использование центров проекции рассматривается в § 1.4. § 1.5 посвящен современному состоянию геоморфометрического моделирования.

1.1 Ледники как объект гляциологических исследований

Ледники – удивительное явление природы.

Ледники находятся в постоянном движении. При движении лед на своем пути переносит горные породы, образуют своеобразные формы ландшафта: морены, бараньи лбы, кары, друмлины, цирки и др. Если ледники перестают двигаться, образуется так называемый мертвый лед. При сползании в мировой океан, ледники образуют зону трещин и раскола, а также дрейфующие айсберги.

В ледниках сосредоточены огромные запасы пресной воды. Большинство ледников накапливают воду в зимний сезон и отдают ее талыми водами. Это особенно важно в горных регионах, где ледники являются единственным источником пресной воды для местных жителей. Талые воды ледников являются источником существования большого количества разнообразных экосистем.

По способу движения и форме ледники делятся на два основных типа: покровные (континентальные) и горные. Более 98% от площади всего оледенения Земли занимают покровные ледники, а горные ледники – около

1,5% [39]. Материковые (покровные) ледники представляют собой ледниковые щиты гигантских размеров, которые расположены в Антарктиде и на островах Северного Ледовитого океана. Ледники этого типа имеют плоско-выпуклые формы, которые чаще всего не зависят от подледникового рельефа. Ледники горного типа имеют небольшие размеры, но разные формы. У всех ледников данного типа выражены участки питания и таяния [36, 40].

Ледники являются подтвержденными и хорошо наблюдаемыми индикаторами оценки изменения климата [25, 123, 134]. Масштабные изменения площади оледенения и их гидрологических режимов могут обернуться катастрофами планетарного масштаба. Подобная ситуация требует непрерывного и всеобъемлющего подхода за наблюдением состояния ледникового покрова Земли.

Классический подход за наблюдением ледников включает большое количество экспедиционной работы специалистов из разных областей науки, таких как гляциологи, гидрологи, метеорологи, геоморфологи, картографы и др. Для выполнения мониторинговых наблюдений необходимо наличие постоянно действующих гляциогидрометеорологических/полярных станций. Такие станции существуют не везде; в основном они сосредоточены в Антарктиде, на побережье и островах Северного Ледовитого океана (Арктика), а также в меньшей степени в районе крупных горных систем. Круглогодичный полевой мониторинг ледников ограничен рядом факторов, таких как неблагоприятный климат, плохая доступность, нехватка рабочей силы и финансирования. В подобной ситуации дистанционное зондирование Земли может выступать альтернативой полевым работам, для удовлетворения растущих потребностей в гляциологических исследованиях.

1.2 Использование ЦМР низкого и среднего разрешения в гляциологических исследованиях

Для ледниковых поверхностей ЦМР низкого и среднего разрешения

создаются по топографическим картам, материалам аэро- и космических съемок, наземных топографических и лидарных съемок и используются для оценки и изучения динамики ледников и снежников. Как правило, ЦМР является не конечным продуктом для описания ледникового ландшафта, а используются для дальнейшего геоморфометрического моделирования (или цифрового анализа рельефа).

Применение ЦМР и методов геоморфометрии в гляциологии началось в 1990-е гг. В 1993 г. И.А. Суетова и С.В. Чистов [39] создали по картографическим материалам мелкомасштабные ЦМР фрагмента Антарктиды. Они произвели расчеты экспозиции склонов и уклонов местности, а также приблизительного объема льда, как разности двух цифровых моделей. В 1997 г. Б. Этцельмюллер и Дж.Л. Соллид [85] ввели понятие «ледниковая геоморфометрия» и составили по разновременным аэрофотоснимкам серию ЦМР нескольких ледников Шпицбергена. В дальнейшем в гляциологии использовались ЦМР различного разрешения отдельных ледников, их фрагментов, а также всей Антарктиды и Гренландии.

В 1997 г. Д.С. Трабант и Д.Б. Хавкинс [191] опубликовали работу, посвященную моделированию объема снега и льда, которые были уничтожены извержением вулкана Редалт на Аляске. Для цифрового моделирования авторы использовали две архивные аэрофотосъемки, выполненные до (1979) и после (1990) извержения вулкана.

В 1999 г. А.В. Погорелов [27] выполнил расчет снегозапасов в бассейне реки Пшеха с использованием ЦМР, полученной путем векторизации рельефа с листа топографической карты масштаба 1:100 000.

В 2000 г. Б. Этцельмюллер и Х. Бьорнсон [84] провели исследование на леднике в Исландии с использованием ЦМР, полученной путем векторизации топографической карты. Особенность работы заключалась в дополнении пространственной информации, которая описывает геометрию ледников, данными и физическими моделями гляциологических процессов (напр., данными радиоэхолота для определения цифровой модели ложа

ледника или данными барометрического профилирования), полученными из полевых наблюдений. Результатом исследования стало определение потоков движения ледника, подледниковое распределение водных каналов, а также оценка потенциального стока.

В этом же году была опубликована еще одна работа Б. Этцельмюллера [83]. Для ледника Финстервальдербрин на Шпицбергене было проведено сравнение двух разновременных ЦМР ледника. Цифровые модели ледника были получены фотограмметрическим методом при обработке аналоговых снимков за 1970 и 1990 гг. Сравнение происходило по трем группам параметров: параметры точки, шероховатость поверхности и гипсометрические параметры.

В 2000 г. Ю.Ф. Книжников и соавт. [14] опубликовали обзор изменений в технологиях наблюдения за ледниками за последние 50 лет в контексте получения пространственных данных на примере оледенения Эльбруса. Рассматриваются методы мензульной съемки, фототеодолитной съемки и аэрофотосъемки. Приводятся примеры получения ЦМР по топографическим картам разных лет, цифровой стереофотограмметрической обработки сканированных аналоговых снимков [14]. Описывается определение скорости движения льда способом псевдопаралаксов [11, 12].

В 2001 г. Дж.Л. Бамбер и соавт. [52] публикуют работу, посвященную получению цифровой модели Гренландии. Для ее создания использовались, в основном, данные радарной космической съемки с космических аппаратов ESP-1 и GeoSAT. Однако сплошного покрытия выбранных космических ДДЗ не хватало, поэтому дополнительно использовались материалы аэрофотосъемки и векторизация имеющихся топографических карт, преимущественно, на свободные ото льда территории и «мертвые зоны» космической съемки. Оценку точности полученной цифровой модели выполняли по материалам воздушного лазерного сканирования, маршруты которого покрыли практически всю Гренландию. Оценка точности показала разброс ошибок от 30 см до 6,5 м и зависимость от угла наклона местности.

В этом же году А.Дж. Фокс с соавт. [101] рассматривают автоматический способ получения ЦМР ледниковой поверхности по материалам аэрофотосъемки с использованием программного обеспечения Erdas Imagen OrthoMax. Проводится оценка точности по точкам фотограмметрического сгущения и контрольным точкам, полученным геодезическим методом. Исследование проводилось в окрестностях британской полярной станции Фоссил Блюф на Антарктическом полуострове.

В 2002 г. выходит другая работа Ю.Ф. Книжникова и соавт. [13], рассказывающая о модификации способа псевдопаралаксов для работы с цифровыми камерами потребительского уровня. Исследование проводилось на леднике Джанкуат (Северный Кавказ). В статье подробно описана методика выполнения работ и произведена оценка точности получаемых результатов. Дальнейшее развитие применения цифровых камер при определении скорости движения ледников описано в работе Р.П. Гельмана и А.А. Алейникова в 2006 г.[6].

В 2003 г. Д.М. Риппин и соавт. [168] опубликовали статью об исследовании на леднике Ловенбрин (Шпицберген). Суть работы заключалась в использовании двух разновременных ЦМР и цифровой модели ложа ледника. Первая цифровая модель была получена путем векторизации топографической карты, вторая – в результате цифровой аэрофотосъемки, ложе ледника рассчитали по материалам наземной радиолокационной съемки. Использовались цифровые модели с пространственным разрешением 20 м. Была предпринята попытка расчета баланса массы ледника по ЦМР.

На конференции Американского геофизического союза 2005 г., Дж.П. Димарзио с соавт. [78] были представлены цифровые модели поверхности покровного оледенения Гренландии и Антарктиды. Данные были получены со спутника ICESat. Результаты космической лидарной съемки сравнивались с результатами воздушной съемки. В Гренландии оценка точности показала расхождение в пределах 0,5 м между двумя съемками, в Антарктиде –

меньше 1 м.

В 2005 г. выходит обзор А. Кааба и соавт. [130], посвященный применению различных типов ДДЗ (в том числе – стереопар космических снимков) для изучения опасных природных явлений, связанных с горными ледниками и вечной мерзлотой.

В 2007 г. А.Е. Раковитяну и соавт. [164] проводили исследование ледника в Андах на юге Перу. Авторы выполнили оценку использования открытых данных радиометрической спутниковой съемки на примере глобальных ЦМР ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection) и SRTM (Shuttle Radar Topography Mission). Данные глобальных ЦМР сравнивались с ЦМР, полученной при векторизации топографической карты. В районе оледенения на ряде участков были выполнены определения координат точек местности с помощью GPS-приемника. Эти данные также использовались для оценки точности. Авторы использовали GPS-приемники с кодовым методом определением координат (Garmin).

В 2007 г. выходит работа Е. Бертье и соавт. [57], посвященная расчету баланса масс ледников в Гималаях. Авторы использовали две ЦМР за 2000 и 2004 гг. Первая ЦМР была получена из глобальной ЦМР SRTM, вторая ЦМР была получена по стереопаре снимков SPOT 5.

Опубликованное в том же году исследование А. Поуп и соавт. [162] было посвящено оценке точности ЦМР, полученных фотограмметрическим методом. Авторы рассматривают несколько архивных съемок ледника на Шпицбергене и методы сопоставления разновременных ЦМР с оценкой точности результата сопоставления, а также с оценкой дальнейших гляциологических расчетов на основании полученных ЦМР.

В 2008 г. изучением процессов глобального потепления занимались А.Дж. Фокс и А. Зиферски [100] на примере ледников Антарктического полуострова. Авторы связывали изменение климата с изменениями рельефа поверхности ледников. Исследование включало в себя фотограмметрический подход получения ЦМР. Использовались архивные материалы

аэрофотосъемки за 1947, 1957, 1989 и 1991 гг. Планово-высотное обоснование архивных данных выполнялось за счет точек фотограмметрического сгущения современной аэрофотосъемки 2005 г. Дальнейшие вычитания ЦМР показали динамику изменения объема льда.

В том же году выходит другая статья А. Кааба [129] по использованию ДДЗ для расчета изменения объема двух ледников на Шпицбергене. Автор использовал топографическую карту 1970 г. и данные радиометрической съемки ASTER 2002 г. Дополнительно использовались материалы лидарной съемки ICESat с 2003 по 2006 гг. ЦМР, полученные по материалам космической съемки, привязывались по опорным точкам, снятым с топографической карты 1970 г. Среднегодовое уменьшение ЦМР ледников между 1970 и 2002 (2006) гг. составило 0,6 м.

В 2009 г. выходит монография Е.А. Золоторева [10], посвященная картографо-аэрокосмическим технологиям гляциологического мониторинга на примере оледенения Эльбруса. Рассматриваются различные наземные и аэрокосмические методы получения картографических материалов, основные проблемы совмещения разновременных данных, в том числе старых топографических карт. Ставится акцент на развитие цифровых технологий и цифровой фотограмметрии. Особое внимание уделяется изучению опасных явлений в ледниковой зоне, таких как сход снежных лавин и образование ледниковых селевых потоков.

В этом же году выходит еще одна работа Дж.Л. Бамбера и соавт. [53], посвященная получению цифровой модели, на этот раз на территорию всей Антарктиды. Для этой цели использовались, преимущественно, данные космической радарной съемки с космического аппарата ERS-1. Недостающий набор данных на область «полярной шапки» южнее 81,5° ю.ш. получали с помощью материалов космической лидарной съемки (до 86° ю.ш.) с космического аппарата ICESat и последующей интерполяции до самого полюса. Авторы описали технологию совмещения разновременных и разномасштабных данных. В итоге была получена ЦМР Антарктиды с

пространственным разрешением 1 км.

В 2009 г. Р. Бхамбри и Т. Болч [58] публикуют обзор научных работ, посвященных гляциологическому картографированию ледников Гималаев на территории Индии. В том числе разбирается вопрос получения ЦМР для расчета баланса массы ледника и определения скоростей течения. Преимущественными данными получения ЦМР являются векторизация топографических карт, аэрофотосъемка, обработка материалов космической радарной и лидарной съемки, стереофотограмметрическая обработка космических снимков среднего и сверхвысокого разрешения, а также использование глобальных ЦМР.

В 2010 г. происходит защита кандидатской диссертации Е.С. Бойко [4], посвященная изучению микрорельефа как фактора формирования снежного покрова в горах. В данной работе автор использует материалы цифровой аэрофотосъемки и данные воздушного лазерного сканирования, на основании которых создаются ЦМР высокого разрешения, которые в дальнейшем используются для морфометрического анализа с целью оценки влияния микрорельефа на формирования поля снежного покрова.

В 2011 г. выходит еще одна работа Р. Бхамбри и соавт. [59], посвященная картографированию ледников Гималаев. Исследование сосредоточено исключительно на ледниках, покрытых осадочными породами. Авторы используют ЦМР, полученную по результатам космической съемки, и космические снимки в тепловом диапазоне. В основе работы лежит известный факт, что поверхность ледника, покрытого осадочными породами, нагревается быстрее, чем без них.

В 2013 г. П. Фретвэл с соавт. [102] публикуют исследование, посвященное получению второй цифровой модели подледникового рельефа Антарктиды южнее 60° ю.ш. К этой ЦМР была также добавлена информация о толщине ледникового покрова. Авторы использовали большой набор разнообразных картографических, геофизических, гравиметрических и батиметрических данных. Идея исследования заключалась в получении

цифровой модели толщины льда из разных источников. В дальнейшем из цифровой модели поверхности Антарктиды вычитали цифровую модель толщины льда в местах сплошного оледенения. Отдельно получали цифровую модель на районы выхода скальных пород и области шельфовых ледников. В итоге три цифровые модели были интегрированы в одной базе данных.

В 2014 г. В. Хелм и соавт. [116] представили новые цифровые модели поверхности Гренландии и Антарктиды на основании данных космической радарной съемки со спутника CrySat. Точность цифровых моделей, полученных с CrySat, соответствует точности аналогичных данных с других подобных спутников, в том числе ICESat. По разности разновременных данных авторы оценили объемы и скорости изменения покровного оледенения Гренландии и Антарктиды.

В 2017 г. публикуется исследование Э.Р. Семаковой и Д.Г. Семакова [37], посвященное применению материалов дистанционного зондирования для расчета гляциологических показателей горных регионов Узбекистана. В исследовании использовались материалы космической съемки со спутников Alos, TerraSar-X и ICESar, а также глобальные ЦМР SRTM и ASTER [172]. В результате исследования удалось определить изменение высоты границы фирновой зоны и рассчитать изменение рельефа поверхности ледников за 12 лет.

В 2019 г. было опубликовано исследование Ю. Подгорски и соавт. [161], которое посвящено использованию радиолокационных данных с космического аппарата TanDEM-X в Андах. Авторы сравнили получаемые ЦМР с данными глобальных ЦМР ASTER и SRTM, а также результатом воздушного лазерного сканирования. Произведена оценка точности применения ЦМР, полученных с космического аппарата TanDEM-X, и предложена методика работы с этими данными для гляциологических исследований.

На основании проведенного обзора можно сделать вывод, что в

большинстве опубликованных работ по использованию ЦМР в гляциологии используются данные с низким или средним пространственным разрешением (от 5 км до 20 м) и простые базовые процедуры геоморфометрического анализа (сложение и вычитание цифровых моделей, расчет крутизны и экспозиции склона).

1.3 Использование материалов беспилотной аэрофотосъемки, включая ЦМР высокого и сверхвысокого разрешения, в гляциологических исследованиях

Различные направления применения беспилотной аэрофотосъемки для дистанционного зондирования Земли описаны в ряде работ [16, 19, 45, 74, 80, 153, 157, 174, 190, 198, 201, 204, 205].

Беспилотная аэрофотосъемка выполняется с использованием БАС, которые состоят из беспилотного воздушного судна (например: планер, дирижабль, вертолет и т.д.), оснащенного съемочной аппаратурой (камерой в видимом, мультиспектральном или тепловом диапазоне, лидаром), инерциальной системой и приемником ГНСС, а также наземной станцией управления (НСУ) и канала радиосвязи между БАС и НСУ. Как правило, аэрофотосъемка с БАС выполняется в автоматическом режиме. Результатом съемки является набор снимков и приблизительные значения элементов внешнего ориентирования. Последующая фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки выполняется в программном обеспечении, реализующем как классические алгоритмы фотограмметрической обработки, так и алгоритмы автоматизации фотограмметрических измерений [23, гл. 5; 181].

Беспилотная аэрофотосъемка в комплексе с алгоритмами автоматизации представляют экономически выгодную альтернативу пилотируемой аэрофотосъемке и классической фотограмметрии. Использование беспилотных платформ обеспечивает гибкость выбора периода наблюдения и типа получаемых данных. Следует отметить, что

получаемые данные могут иметь субсантиметровое пространственное разрешение.

Современные беспилотные воздушные суда имеют все необходимое оборудование и функциональные возможности, чтобы использоваться в гляциологических исследованиях.

В последнее время в зарубежной и отечественной литературе наблюдается увеличение количества исследований с использованием БАС. Существует несколько обзорных статей с обсуждением аппаратных компонентов, особенно различных коммерческих производителей БАС и их междисциплинарное применение. К таким работам можно отнести статью А.С. Вотца с соавт. 2012 г., И. Коломина и П. Молина 2014 г., а также обзоры К. Вайтхеда с соавт. 2014 г. и В.М. Куркова с соавт. 2015 г. [20, 74, 201, 204, 205]. Во всех работах описываются прикладные возможности применения БАС в различных отраслях науки, связанных с изучением окружающей среды. В 2016 г. А. Бхарвадж с соавт. [60] опубликовали первый обзор по применению беспилотных технологий в гляциологических исследованиях, где провели разделение всех исследований на две основные группы: исследования горных и покровных ледников.

В 2007 г. была опубликована первая статья по применению БАС в гляциологических исследованиях: А. Ходсон и соавт. [120] рассчитали пространственный градиент распределения криоконита с использованием снимков, полученных с БАС Helibal 323. Работы проводились на леднике Мидре Ловенбрин (Шпицберген).

В 2008 г. М. Фунаки и Н. Хирасава [103] опубликовали исследования по разработке шести типов малых БАС, которые основывались на четырех типах планера. БАС называли «Ant planer», так как предполагалось использование в Антарктиде. Авторы выполнили испытательные полеты на вулкане Сакураджама (Кюсю, Япония) в условиях сильного ветра.

В том же году Дж. Иноу и соавт. [124] применили БАС для наблюдения за таянием арктического льда в море Бофорта и Чукотском море.

Использовался БАС компании AAI Corporation Aerosonde. Всего было получено 470 изображений с пространственным разрешением 8 см/пиксель. Кроме этого, результаты сравнивали с материалами, полученными с усовершенствованного микроволнового сканирующего радиометра для определения концентрации льда в системе наблюдения Земли (AMSR-E).

В 2009 г. М. Вальтер и соавт. [200] провели исследование во французских Альпах. Авторы с использованием БАС проанализировали оползневое событие в низовьях ледникового водосбора и сравнили движение оползня с ледниковыми трещинами.

В 2011 г. Р.И. Крокер с соавт. [75] описали применение лидара на БАС. Авторы применили мультисенсорный и мультиплатформенный подход для картографирования ледяного покрова в различных пространственно-временных условиях Гренландии, Шпицбергена и Антарктиды. Использовались несколько БАС разных производителей: BAE Systems Manta, NASA SIERRA, AAI Corporation Aerosonde и Insitu Inc. ScanEagle. Основная полезная нагрузка состояла из лидара, инерциального измерительного блока, ГНСС-приемника и цифровой камеры, способной фотографировать и снимать видео. Основной целью работ в Гренландии было картографирование участка ледника, а в проливе Фрам (Шпицберген) и у американской полярной станции МакМерде (Антарктида) выполнялись измерения надводного борта морского льда и его шероховатость.

В 2013 г. публикуется дипломная работа Е. Фредли [60]. Исследование проводилось на леднике Рона в швейцарских Альпах. Использовался БАС мультироторного типа Falcon 8. Суть работы состояла в сравнении беспилотной и пилотируемой аэрофотосъемки, а также наземной фототеодолитной съемки. Автор выявил эффективные области применения каждого способа получения пространственных данных для гляциологии.

В том же году С. Солбоа и Р. Сторволда [180] описали использование высокоточного двухчастотного GPS-приемника, установленного на БАС. Исследования проводились на Шпицбергене, использовался БАС Cryowing.

Определение высокоточных координат во время полета потребовалось для повышения точности выполняемых измерений профиля ледника с использованием полезной нагрузки в виде лазерного альтиметра и синхронизированного с ним высокоточного GPS-приемника. В ходе профилирования было выяснено, что требуется более мощный лазерный альтиметр, так как используемый мог работать на высотах до 100 м над ледником.

В 2013 г. К. Вайтхед с соавт. [206] провел исследование по дистанционному зондированию на леднике Фонтан (Канадская Арктика). Использовался БАС Outlander компании Cropcam. Исследование было сосредоточено на создании ортофотопланов зоны языка ледника. Авторы выполнили сравнение полученных материалов с другими пространственными данными для определения отступления языка ледника с 1958 г. Кроме этого, была проведена оценка точности результатов и выполнен расчет отступления языка ледника за короткий промежуток времени (лето).

В 2014 г. выходит другая работа М. Фунаки и соавт. [104] о применении БАС «Ant planer» на Южных Шетландских островах (Антарктида). Основная цель исследования заключалась в сборе аэромагнитных данных и аэрофотосъемке территории исследования. Результаты работы продемонстрировали, что дистанционное зондирование с применением БАС не обязательно должно быть сфокусировано только на земной поверхности: возможно применять БАС и для исследования атмосферы в высоких широтах.

В 2014 г. С. Леушен с соавт. [139] провели радарную съемку льда в Антарктиде. Использовался БАС, разработанный в Центре дистанционного зондирования ледяного покрова (CReSIS). Радарная съемка позволила выполнить профилирование глубины снежного и ледяного покрова, а также способствовала изучению рельефа ложа ледника. Для контроля обратного рассеивания радиолокационного сигнала и предотвращения вертикального

рассеивания авторы синтезировали двумерную апертуру и успешно замаскировали отраженные сигналы от ложа ледника.

В этом же году В.В. Иммерзил с соавт. [123] выполнил картографирование ледника Лирунг (Непал) с использованием БАС Swinglet САМ компании SenseFly. В результате были получены ортофотопланы высокого разрешения и ЦМР. Экспедиция состояла из двух этапов, что позволило выполнить мониторинг за летний промежуток времени. Авторы указали на будущие возможности изучения внутриледниковых каналов путем визуальной оценки их возможного местоположения по моделям проседания, полученным по разности двух разновременных ЦМР.

В 2015 г. публикуется еще одна работа Д.М. Рипинна и соавт. [169]. Исследование проводилось на леднике Мидре Ловенбрин (Шпицберген). Цель исследования заключалась в получении ЦМР фрагмента ледника фотограмметрическим методом с использованием БАС. Авторы провели обширное исследование поверхностного ледникового стока.

В этом же году Дж.С. Раен и соавт. [171] провели исследование ледника Стор (Гренландия) с использованием БАС. Авторы исследовали динамику айсбергообразования при сползании языка ледника в море. В основе лежал анализ разновременных ЦМР ледника.

В 2015 г. М.В. Сыромятина и соавт. [186] выполнили аэрофотосъемку языка ледника Козлова в горном массиве Табын-Богдо-Ола (Монгольский Алтай). Использовался БАС Геоскан 101. По ортофотоплану фиксировалось положение языка ледника. Производилось сравнение с другими материалами дистанционного зондирования. В результате определено отступление языка ледника за 15 лет. Спустя год, под руководством М.В. Сыромятиной проведено исследование по изучению динамики ледников Потанина и Александры горного массива Табын-Богдо-Ола. Анализировался разновременный набор пространственных данных, полученный с помощью БАС в начале и конце сезона абляции (сезона таяния). К сожалению, работа была опубликована только в 2019 г. [3]. Подробности этих работ, в которых

принимал непосредственное участие соискатель, изложены в главе 4 и, частично, в главе 3.

В этом же году публикуется исследование Н.В. Коваленко и соавт. [15] о применении БАС DJI Phantom на леднике Колка (Кавказ). Произведена аэрофотосъемка части ледника, получены ортофотоплан высокого разрешения и ЦМР, которая сравнивалась с материалами наземных тахеометрической и фототеодолитной съемок. Дополнительно в анализе точности ЦМР использовали стереопару космических снимков со спутника Spot 6.

В 2016 г. выходит исследование П.Д.А Крайджейбринка и соавт. [135]. Объектом исследования является ледник Лирунг (Непал), использовался БАС Swingle CAM компании SenseFly. Эти авторы в 2014 г. выполнили аэрофотосъемку и получили ортофотоплан и ЦМР ледника. Дополнительно использовался набор подобных данных за 2013 г., полученный от В.В. Иммерзила. Это позволило оценить динамику ледника за целый год. Была выделена большая скорость движения ледников, покрытых осадочными породами, в течение лета.

В 2017 г. А.В. Погорелов с соавт. [28] публикуют работу о динамике ледника Фишт (Кавказ). Используются различные картографические материалы, описывается изменение границ и площади ледника за 26 лет, при этом последние картографические материалы получены с использованием БАС DJI Phantom.

В этом же году публикуется исследование Г. Жуве и соавт. [128] о проведении работ на леднике Боудоин (Гренладия). Эти авторы отслеживали процесс айсбергообразования путем моделирования вертикальных и горизонтальных изменений кромки ледника по материалам беспилотной аэрофотосъемки. Также для моделирования горизонтальной скорости движения всего ледника использовались разновременные космические снимки.

В 2017 г. была опубликована статья О. Вигмора и Б. Марка [208],

посвященная аэрофотосъемке ледника Ллака (Анды) с использованием БАС мультироторного типа. Авторы выполнили съемку языка ледника и морены малой ледниковой эпохи в июле 2014 и июле 2015 гг. По разновременным данным произведена оценка динамики ледника. Кроме этого, выполнена оценка точности ортофотопланов и ЦМР ледника.

В 2018 г. С.С. Черноморец и соавт. [42] описывают прорыв ледникового озера Башкара (Кавказ) и последствия вызванного этим селевого потока, произошедшие 1 сентября 2017 у одноименного ледника. Авторы сравнивают границы озера до и после прорыва. Для определения границ до прорыва используется космический снимок, после прорыва – материалы аэрофотосъемки с БАС DJI Phantom.

В том же году выходит работа Е.А. Басша и соавт. [55], посвященная исследованию на леднике Фонтан (Канадская Арктика). Авторы, используя небольшой БАС мультироторного типа, выполнили съемку участка ледника 400 на 600 м. Съемка проводилась три раза с 21 по 23 июля 2016. Планово-высотное обеспечение выполнялось с использованием наземных опорных точек. Цель исследования заключалась в отслеживании изменения поверхности ледника за 3 дня. Результаты изменения сравнивались с измерениями по гляциологическим рейкам. Был произведен расчет баланса массы части ледника, полученный по материалам ДЗЗ (0,170 м водного эквивалента (в.э.)) и гляциологическим измерениям (0,144 м в.э.).

В 2018 г. выходит исследование Д.А. Петракова и соавт. [26], посвященное леднику Колка (Кавказ). В сентябре 2002 на леднике произошла гляциальная катастрофа. Авторы анализируют набор разнообразных и разновременных пространственных данных (тахеометрическая съемка, несколько стереопар космических снимков, беспилотная аэрофотосъемка), которые свидетельствуют о темпах восстановления ледника.

Недавний всплеск исследований по применению и использованию БАС в гляциологических исследованиях наглядно демонстрирует увеличивающиеся потребности в новых технологиях получения и

использования ДЗЗ. Потенциал использования БАС в гляциологии высок. Он может сыграть важную вспомогательную роль для гляциологических наблюдений в промежутке между полевыми работами и дистанционным зондированием из космоса.

1.4 Центры проекций снимков

Нерешенная проблема беспилотной аэрофотосъемки ледников – сложность или невозможность выполнения условий планово-высотного обоснования (отсутствие наземных опорных и контрольных точек). Это связано с ограничениями техники безопасности (опасность ледниковых трещин) и непрерывным движением ледниковой поверхности. Решением может стать использование в качестве опорной информации центров проекций снимков и профессионального аэрофотосъемочного, геодезического оборудования.

Сущность использования центров проекции в качестве опорной информации заключается в определении элементов внешнего ориентирования снимков в процессе фототриангуляции. В качестве исходных данных используются снимки и высокоточные координаты центров проекции (КЦП), которые рассчитываются на основании кинематических измерений между наземным ГНСС-приемником геодезического класса и бортовым (ОЕМ-модуль – плата обработки сигнала и антенна приема сигнала).

Высокая точность определения КЦП достигается за счет синхронизации временной шкалы бортового ГНСС-приемника (ОЕМ модуль) и автопилота БАС. Последний регистрирует время срабатывания затвора камеры и передает эту информацию на ОЕМ-модуль. Координата центра проекции рассчитывается методом линейной интерполяции по времени между двумя ближайшими кинематическими измерениями. Среднеквадратическая погрешность определения КЦП составляет 3–5 см [9, 16, 17, 131].

В 2012 г. К.В. Чанги с соавт. [71] провели исследования по оценке

точности использования центров проекции в качестве опорной информации. Используя достаточно массивное беспилотное воздушное судно массой 25 кг и размахом крыла 5 м, они выполнили съемку небольшого участка застроенной территории, площадью 9 км² во взаимно перпендикулярных направлениях. Для оценки точности использовались 20 наземных контрольных точек, координаты которых были определены геодезическим методом. Плановая точность составила чуть больше 5 м, точность по высоте – 10 м. Низкая точность была связана с использованием дешевого одночастотного GPS-приемника на борту и камеры со шторно-щелевым затвором, а также плохой точностью синхронизации ГНСС-приемника и камеры. Тем не менее, авторы утверждают, что данной точности достаточно для картографирования территории после природных бедствий и в чрезвычайных ситуациях.

В 2014 г. Д. Турнел с соавт. [194] провели исследования по применению центров проекции снимков в качестве опорной информации. Использовался небольшой БАС мультироторного типа (октокоптер) и двухчастотный ГНСС-приемник. Было выполнено сравнение трех фотограмметрических программных продуктов по скорости и точности получения данных. Лучший результат показал плановую среднеквадратическую ошибку в 11 см.

В этом же году под руководством В.М. Куркова выполняется тестирование различных беспилотных воздушных судов на Заокском геополигоне МИИГАиК, в результате публикуется ряд работ [9, 16, 18, 20]. В качестве контрольных точек используется более 60 маркированных точек, координаты которых определены геодезическим методом. Происходит всеобъемлющая оценка точности полученных результатов; кроме того, выполняется анализ использования полевой и лабораторной калибровки камер.

Впервые использование центров проекций снимков в качестве опорной информации при гляциологических исследованиях упоминается в

работе М.В. Сыромятиной и соавт. [186] на ледниках горного массива Табын-Богдо-Ола (Монгольский Алтай) в 2015 г. Подробное описание этой работы, в которой принимал непосредственное участие, соискатель, изложено в главе 4 и, частично, в главе 3.

В недавней работе С.А. Кадничанского и соавт. [131] приводится исследование по оценки точности фотограмметрической калибровки при использовании БАС. Авторы делают вывод о том, что точность центров проекций снимков в совокупности с определенной методикой работ (полевая калибровка, самокалибровка) и использованием определенного оборудования (камера, приемник ГНСС) сопоставима с точностью фототриангуляции.

На данный момент остается нерешенным вопрос независимого контроля применения центров проекции снимков, в качестве опорной информации при условии невозможности использования контрольных точек.

1.5 Геоморфометрическое моделирование

Геоморфометрия – научная дисциплина, предметом которой является моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем [41, 91, 92].

Геоморфометрическое моделирование [91, 92, 117, 176, 207] связано с концепцией общей геоморфометрии, которую предложил английский геоморфолог И.С. Эванс [86], определяемой, как «измерение и анализ тех характеристик рельефа, которые применимы к любой непрерывной шероховатой поверхности». Методами общей геоморфометрии могут описываться поверхностный сток, расчлененность склонов, геометрические формы, высотная зональность и др. [175].

Геоморфометрия имеет дело с математическим моделированием, в котором реальный рельеф земной поверхности аппроксимируются топографической поверхностью. Под топографической поверхностью понимают замкнутое ориентированное бесконечно дифференцируемое двумерное многообразие в трехмерном евклидовом пространстве [41, 92,

175]. При этом:

- 1) Поверхность определяется гладкой однозначной функцией $z = f(x, y)$, где z – высота, x и y – декартовы координаты;
- 2) Топографическая поверхность имеет производные всех порядков;
- 3) Топографическая поверхность находится в однородном гравитационном поле;
- 4) При анализе топографической поверхности кривизной планеты можно пренебречь;
- 5) Топографическая поверхность является масштабно зависимым объектом.

Свойства топографической поверхности описываются морфометрическими характеристиками (такими как уклон, кривизны поверхности, площадь водосбора и т.д.) [91, 176].

Выделяют четыре основные группы морфометрических величин [91, 92, 175]:

- 1) Локальные величины (крутизна склона, экспозиция склона, горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, средняя кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, разностная кривизна, гауссова кривизна, избыточная горизонтальная кривизна, избыточная вертикальная кривизна, аккумуляционная кривизна, кольцевая кривизна, несферичность, ротор).
- 2) Нелокальные величины (водосборная площадь, дисперсивная площадь).
- 3) Солярные величины (отражательная способность, инсоляция).
- 4) Комбинированные величины (топографический индекс, индекс мощности потоков, индекс формы).

Более подробное описание морфометрических величин дано в Приложении 1.

Геоморфометрическое моделирование широко используется для решения различных задач наук о Земле, включая моделирование рельефа

местности и гидрологическое моделирование, прогнозное картографирование почв и растительности, выявление и анализ геологических структур, моделирование эволюции ландшафта и их визуализацию, в том числе и с использованием ЦМР, полученных с помощью беспилотной аэрофотосъемки [56, 65, 76, 126, 146, 151, 178, 203, 212].

За последние 20 лет в развитии теории и методов геоморфометрии произошел существенный прогресс. Об этом свидетельствует ряд сводных работ и монографий Дж.П. Вилсона и Дж.К. Галанта, З. Ли и соавт., Т. Хенгла и Х.И. Реутера, а также И.В. Флоринского [91, 117, 140, 207]. Однако эти достижения до сих пор не нашли должного применения в гляциологических исследованиях. Применение этих методов для изучения ледников рассмотрено в данной работе.

Выводы по главе 1

1) Ледники являются подтвержденными и хорошо наблюдаемыми индикаторами изменения климата, как на региональном уровне, так и на глобальном. Масштабные изменения площади оледенения, гидрологических режимов, могут обернуться катастрофическими последствиями. Кроме того, ледники находятся в непрерывном движении, что приводит к постоянным изменениям геометрии ледниковых поверхностей. Это требует непрерывного и всеобъемлющего подхода за наблюдением состояния ледникового покрова Земли.

2) Использование ЦМР в гляциологических исследованиях началось в 1990-е гг. В дальнейшем использовались ЦМР ледников, фрагментов ледников и даже всей Антарктиды и Гренландии, преимущественно с низким или средним пространственным разрешением. Применение высокого или сверхвысокого разрешения ЦМР ледников не получило должного развития.

3) Беспилотная аэрофотосъемка ледников выполняется с 2007 г. Используются разнообразные типы БАС (мультироторного и самолетного типа) и съемочной аппаратуры (обычные и мультиспектральные камеры, радары, лидары). Однако до сих пор не решена проблема сложности или невозможности выполнения условий планово-высотной подготовки аэрофотосъемки. Применение центров проекции снимков в качестве опорной информации, в условиях оледенения и непрерывного движения ледников, не описано.

4) Применение методов геоморфометрии в гляциологических исследованиях сводится, преимущественно, к расчету разности разновременных ЦМР и определению крутизны и экспозиции склона. Достижения теории и методов геоморфометрии последних нескольких десятилетий, связанных с математическим моделированием локальных и нелокальных морфометрических величин, не нашли должного применения в гляциологических исследованиях.

ГЛАВА 2

БЕСПИЛОТНАЯ АЭРОФОТОСЪЕМКА И ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

В главе изложена методика беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки в контексте геоморфометрического моделирования, а также описаны полевые и камеральные исследования по разработке и апробации этой методики. § 2.1 посвящен ЦМР, получаемым по материалам беспилотной аэрофотосъемки. Проведению аэрофотосъемочных работ с использованием БАС посвящен § 2.2. В § 2.3 разбирается вопрос фотограмметрической обработки результатов беспилотной аэрофотосъемки. В § 2.4 описывается геоморфометрическое моделирование с использованием универсального спектрально-аналитического метода. § 2.5 посвящен анализу результатов проведенного исследования и описанию методики беспилотной аэрофотосъемки и камеральной обработки материалов с целью получения ЦМР с высоким пространственным разрешением, предназначенной для геоморфометрического моделирования. Разработанная методика применима, в частности, для моделирования ледниковых поверхностей.

2.1 ЦМР как результат беспилотной аэрофотосъемки

Данные, полученные с БАС, часто используются для создания ЦМР с высоким и очень высоким пространственным разрешением (10–30 см/пиксель), которые затем используются для моделирования динамики склоновых, прибрежных, ледниковых и речных процессов, а также для выявления геологических микрообъектов (напр., микроскладки и микроразрывы) и пр. [56, 65, 76, 79, 82, 126, 127, 135, 146, 178, 186, 202].

Для создания корректной ЦМР необходимо учитывать технические характеристики БАС, камеры и навигационной системы, а также особенности алгоритмов обработки данных, реализованных в специализированном программном обеспечении. В противном случае пользователь может

получить ЦМР с серьезными артефактами, в частности, из-за систематических крупномасштабных ошибок (напр., искажение геометрического подобия между объектом и его снимком). Такие ошибки вызваны использованием относительно простых камер с большой дисторсией объектива и неправильно выполненной калибровкой [43, 125]. Как правило, это связано с низкой профессиональной подготовкой пользователей в области фотограмметрии и цифрового моделирования рельефа. Это подтверждается широким распространением БАС и камер потребительского уровня, а также бесплатным программным обеспечением для обработки снимков, которое не позволяет получить корректную ЦМР [159]. В связи с этим, вопросы точности и ошибок ЦМР, полученных по данным с БАС, находятся в центре внимания профессиональных сообществ в области геодезии, аэрофотосъемки и фотограмметрии [16, 49, 72, 81, 82, 121, 136, 138, 158, 166, 189, 195]. Некоторые исследователи начали разрабатывать рекомендации для получения ЦМР по аэрофотоснимкам с БАС [173, 185], которые можно было бы использовать в качестве обязательных инструкций для пользователей БАС.

Во многих случаях ЦМР является не конечным продуктом для описания ландшафтов, а используются для дальнейшего геоморфометрического моделирования или цифрового анализа рельефа (§ 1.4).

При геоморфометрическом моделировании могут быть наложены дополнительные требования к точности ЦМР. Это связано с несколькими факторами. Во-первых, расчет локальных морфометрических величин (например, уклона и кривизны поверхности) основан на вычислениях первой и второй частных производных высоты. Эти расчеты значительно усиливают случайные ошибки в ЦМР (фотограмметрические и интерполяционные, а также высокочастотный шум), которые практически незаметны на самой ЦМР [89, 90]. Во-вторых, расчет нелокальных и комбинированных морфометрических величин (напр., водосборной площади и

топографического индекса) основан на алгоритмах маршрутизации потока. Во время этих вычислений ошибки накапливаются вдоль маршрутов потока в зависимости от пространственного распределения случайных и систематических ошибок в ЦМР [197]. В-третьих, очевидно, что ошибки морфометрических расчетов переходят в почвенные, гидрологические и другие модели геоморфометрического прогнозирования [141]. Следует обратить внимание, что невозможно предсказать или количественно оценить возникновение подобных ошибок в ЦМР до морфометрических вычислений. Это связано, в частности, с тем, что такие ошибки не превышают по своему значению допустимые погрешности по стандартным требованиям к точности создания ЦМР. Расчеты усиливают проявление ошибок в морфометрических моделях, и ошибки становятся видимыми на морфометрических картах. Визуальный контроль морфометрических карт является основным методом обнаружения паттернов «артефактов» в исходных ЦМР.

С точки зрения геоморфометрического моделирования, вопросы точности и ошибок ЦМР, полученные по данным с БАС, до сих пор не решены. В 2016 г. был опубликован первый большой обзор по применению ЦМР, полученной по материалам беспилотной съемки, в науках о Земле [82]. А. Элнер и соавт. упомянули слово «геоморфометрия» в названии статьи и нескольких местах в тексте, но не обсуждали ни геоморфометрическое моделирование само по себе, ни возможные связи между точностью ЦМР и результатами геоморфометрического моделирования.

Вопрос получения корректных ЦМР высокого разрешения, получаемых по материалам беспилотной аэрофотосъемки, предназначенных для геоморфометрического моделирования остается открытым.

2.2 Аэрофотосъемочные работы

С целью изучения возможностей беспилотной аэрофотосъемки для получения ЦМР высокого разрешения был проведен ряд исследований, направленных на использование получаемых ЦМР в геоморфометрическом

моделировании. В исследованиях использовались БАС самолетного типа. Результаты выполненной работы можно распространить на другие типы БАС.

2.2.1 Характеристики БАС

Геоскан 101 Геодезия – БАС самолетного типа, подтип «летающее крыло». Размах крыльев 130 см, взлетный вес 2,5 кг. Взлет с катапульты, посадка на парашюте. Оснащен электродвигателем, продолжительность полета до 1 часа, скорость полета 72 км/ч. Система может использоваться в температурном режиме от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$, при скорости ветра до 12 м/с при запуске и во время полета. Максимальная заявляемая высота полета – до 4000 м над ур. м. [7].

Геоскан 201 Геодезия – БАС самолетного типа, подтип «летающее крыло». Размах крыльев 230 см, взлетный вес 8 кг. Взлет с катапульты, посадка на парашюте. Оснащен электродвигателем, продолжительность полета до 3 часов, скорость полета 78 км/ч. Система может использоваться в температурном режиме от -20°C до $+40^{\circ}\text{C}$, при скорости ветра до 12 м/с при запуске и во время полета. Максимальная заявляемая высота полета – до 4000 м над ур. м. [8].

Обе системы обеспечены телеметрическими модемами связи на частоте 867,8 МГц и управляются с НСУ Geoscan Planer. Для точного определения КЦП установлен приемник ГНСС геодезического класса, поддерживающий системы ГЛОНАСС/GPS на частотах L1/L2.

В качестве съемочной аппаратуры использовались:

- полнокадровая цифровая камера Sony DSC-RX1 с центральным затвором, объектив Carl Zeiss Vario Sonnar T, фокусное расстояние 35 мм. Размер светочувствительной КМОП-матрицы (комплементарная структура металл-оксид-полупроводник) 6000 x 4000 пикселей, размер одного пикселя 6 мкм;

- цифровая камера Sony NEX-5N с шторно-щелевым затвором,

фокусное расстояние объектива 20 мм. Размер КМОП-матрицы 4912 x 3264 пикселя, размер одного пикселя 5 мкм.

Камеры работают в режиме приоритета выдержки, с автоматическим определением размера диафрагмы и параметра светочувствительности (ISO). В зависимости от наличия облачности выдержка устанавливалась 1/800 или 1/1000.

2.2.2 Район исследований

Исследования проводились на Заокском геополигоне МИИГАиК. Заокский геополигон расположен в центре европейской части России, в Тульской области, в 120 км к югу от Москвы и в 15 км к юго-западу от города Пущино (рис. 2.1а). Заокский геополигон предназначен для разработки и оценки технологий картографирования и мониторинга на основе использования БАС [16, 20]. Общая площадь Заокского геополигона составляет около 200 км². На его площади представлены разнообразные формы рельефа, реки, ручьи, пруды, леса, сельскохозяйственные угодья, промышленные площадки, населенные пункты (поселки, деревни и жилые комплексы), железные дороги, автомагистрали, проселочные и полевые дороги, линии электропередач различного напряжения и трубопроводы. На Заокском геополигоне находится 23 пункта государственной геодезической сети и 340 контрольных / опорных точек с определенными координатами. Из них 47 точек определены только по высоте, 293 точки определены в плане и по высоте; 72 точки имеют маркировку. Точность координат точек составляет 2–3 см в плане и 3–4 см по высоте.

Для исследования была выбрана долина реки Скнига между лагерем Заокского геополигона и селом Костино. Размер района исследований составляет около 1700 на 1870 м; перепад высот составляет около 86 м (рис. 2.1б).

Район исследований включает в себя: 1) р. Скнига, пересекающую район с юго-востока на северо-запад; 2) задернованный оползневой

правобережный склон долины р. Скнига с группами деревьев и кустарников; 3) задернованный пологий левый берег долины р. Скнига с деревьями и кустарниками; 4) два относительно густых лесных участка на левом берегу долины р. Скнига; 5) жилые дома и сельскохозяйственные постройки вдоль северной и южной границ. Несколько асфальтированных и полевых дорог, а также тропы пересекают район исследований.

2.2.3 Аэрофотосъемка

Аэрофотосъемка района исследований проводилась с использованием БАС Геоскан 101 Геодезия (рис. 2.2), который зарекомендовал себя как БАС со стабильными летными характеристиками при аэрофотосъемке природных, сельских, городских и промышленных территорий в России, Монголии, Центральной и Южной Америке [5, 9, 18, 186].

На борту БАС была установлена камера Sony DSC-RX1. Для учета искажений объектива ранее была выполнена: 1) лабораторная фотограмметрическая калибровка камеры, и 2) полевая калибровка на Заокском полигоне. Для лабораторной калибровки использовался лабораторный стенд и специализированное программное обеспечение [43, 105]. Полевая калибровка была проведена на участке испытательного полигона размером 1 на 1 км (перепад высот около 80 м) с использованием 51 маркированной опорной точки. Параметры фотограмметрической дисторсии объектива были определены по результатам фототриангуляции с самокалибровкой. Результаты калибровки камеры представлены в табл. 2.1.

Отметим, что камера может записывать файлы в формате JPEG или RAW. RAW-файлы занимают много места для хранения и требуют дальнейшего преобразования данных. Ранее было показано, что сжатие JPEG практически не влияет на точность матрицы высот [183]. Н. Андерс и соавт. [48] также нашли, что снимки с БАС в формате JPEG подходят для создания ЦМР, предназначенных для геоморфометрического использования.

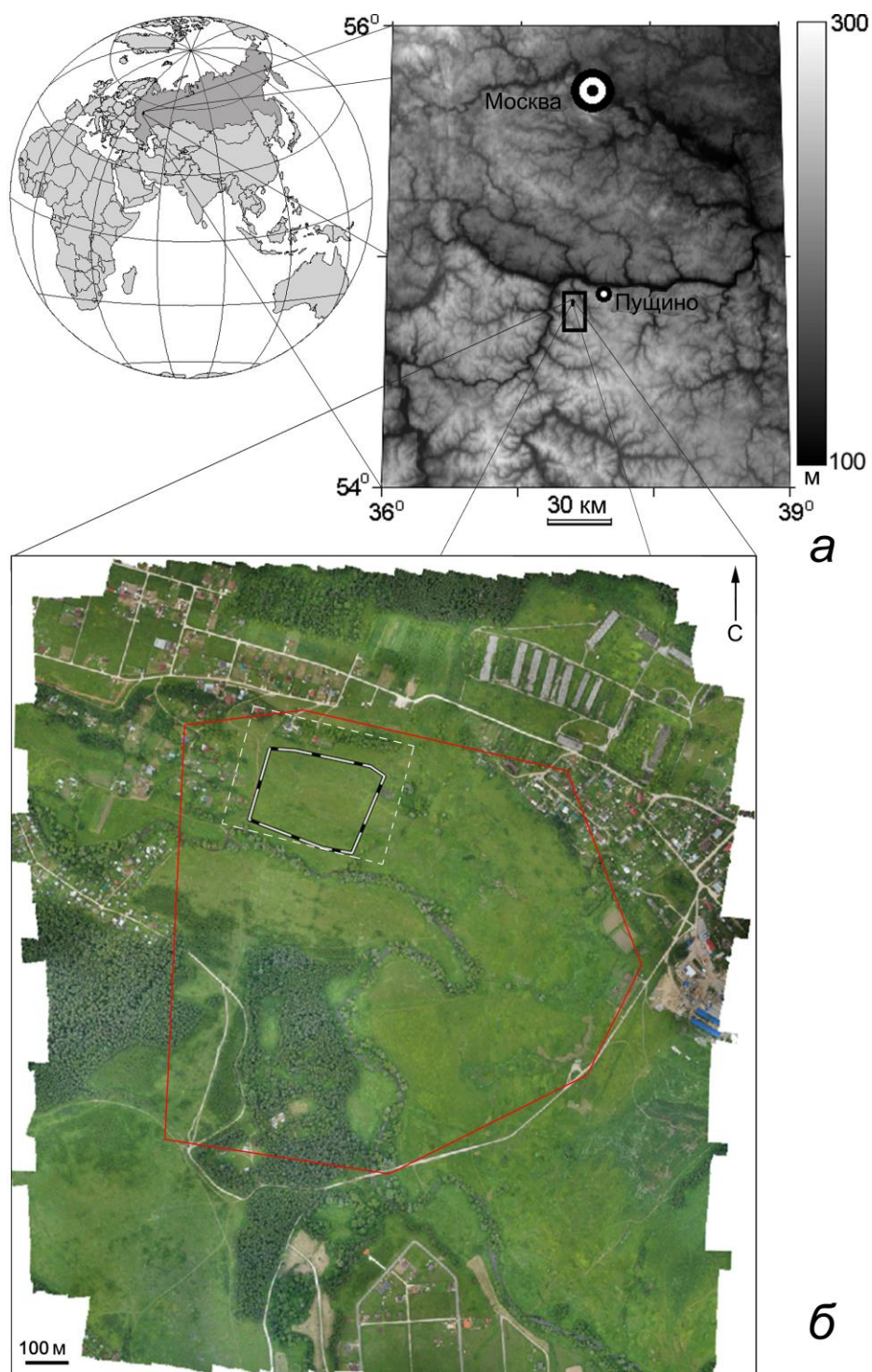


Рисунок 2.1 – Географическое положение района исследований: *а* – Заокский геополYGON (черная рамка) на фоне карты высот (ЦМР SRTM30_PLUS), *б* – район исследований, ортофотоплан. Черно-белая и красная рамки – выдел и тестовый участок для моделирования с разрешением 20 см (рис. 2.7*а*) и 1 м (рис. 2.7*б*), соответственно. Белая пунктирная рамка – фрагмент, иллюстрирующий плотное облако точек (рис. 2.5)

На борту БАС был установлен ГНСС-приемник геодезического класса, используемый для высокоточного определения КЦП снимков. Наземная базовая станция ГНСС включала приемник Javad Prego Lite (ГЛОНАСС / GPS, L1 / L2, антенна MarAnt). Совокупность вышеупомянутой камеры, бортового ГНСС-приемника и наземной базовой станции позволяет определять КЦП снимков с плановой точностью 2 см и вертикальной точностью 3–4 см [9, 16, 17].

Полет БАС выполнялся в автоматическом режиме с использованием автопилота. Необходимо указать полетное задание в НСУ, выбрав исследуемую область и установив параметры полета.

Ключевой параметр – это перекрытие между снимками, выраженное в процентах. Для обычной пилотируемой аэрофотосъемки предполагается, что минимальное требуемое продольное и поперечное перекрытия равны 60% и 30%, соответственно [21].

При аэрофотосъемке с БАС вероятность появления «фотограмметрических дыр» возрастает, поэтому рекомендуется устанавливать избыточное продольное и поперечное перекрытие – 70% и 50%.

Далее должен быть установлен один из трех взаимосвязанных параметров, таких как пространственное разрешение аэрофотоснимков, высота полета или расстояние между маршрутами. В качестве исходного параметра было выбрано пространственное разрешение снимков 5 см/пиксель. Затем в программном обеспечении НСУ [34] автоматически рассчитываются маршруты и координаты точек фотографирования.

БАС осуществляет полет, либо на постоянной высоте над поверхностью Земли, либо на постоянной высоте над уровнем моря.

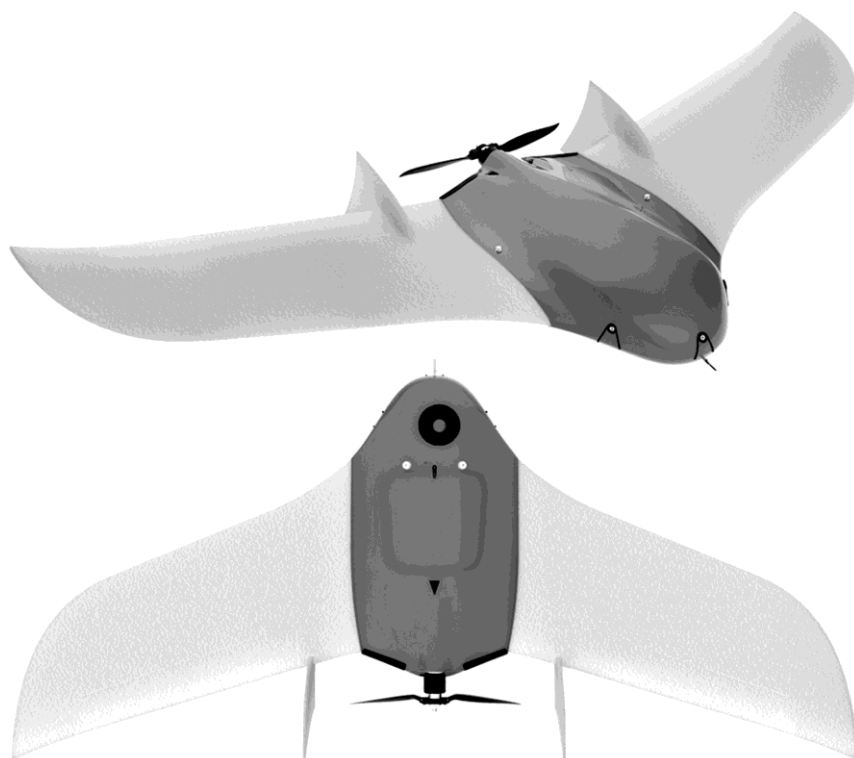


Рисунок 2.2 – БАС Геоскан 101 Геодезия, вид сбоку и снизу

Таблица 2.1 – Параметры дисторсии объектива

Параметры	Значение
Фокусное расстояние (пиксель)	5704,67
Размер пикселя (мкм)	6 x 6
Размер снимка (пиксель)	6000 x 4000
C_x, C_y	9,53551; – 2,35541
<i>Коэффициенты радиальной дисторсии</i>	
K_1, K_2, K_3, K_4	– 0,11155; 0,578603; – 2,87085; 4,2585
<i>Коэффициенты тангенциальной дисторсии</i>	
P_1, P_2, P_3, P_4	– 0,000173695; 0,00051821; 0; 0
<i>Коэффициенты аффинитета и неортогональности</i>	
B_1, B_2	1,21642; – 0,0101437

Погодные условия во время съемки (июль 2016) были хорошими. При переменной облачности температура воздуха была 20–22°C, ветер северный, со скоростью 5–6 м/с на высоте полета. Аэрофотосъемка продолжалась около 1 ч. Средняя высота полета составляла 310 м над уровнем земли. Аэрофотосъемка состояла из 13 маршрутов, ориентированных с востока на запад и включала 319 аэрофотоснимков. Продольное и поперечное перекрытие составило 70% и 50% ($\pm 1-3\%$), соответственно (рис. 2.3). Аэрофотоснимки имеют среднее разрешение 5,13 см.

2.3 Фотограмметрические работы

Камеральная обработка снимков состояла из двух основных этапов: 1) постобработка измерений встроенного в БАС приемника ГНСС относительно базовой станции; 2) фотограмметрическая обработка материалов аэрофотосъемки.

Для постобработки спутниковых наблюдений использовалось программное обеспечение Magnet Office Tools [145]. В результате, для каждого снимка были рассчитаны КЦП, которые использовались в дальнейшей фотограмметрической обработке.

Фотограмметрическая обработка данных проводилась с использованием программного обеспечения Agisoft PhotoScan Professional [35] версии 1.2.5. Данный программный продукт реализует классические алгоритмы фотограмметрической обработки [21, 23] и алгоритмы автоматизации фотограмметрических измерений (в частности: Structure from motion, полуглобальный метод отождествления соответствующих точек, sift) [23, 44, 82, 67, 99, 119, 179, 181, 202]. Ранее, независимое сравнительное тестирование Agisoft PhotoScan с аналогичным программным обеспечением показало, что Agisoft PhotoScan характеризуется одними из лучших результатов с точки зрения фотограмметрической точности [81, 109, 112, 182, 194].

В качестве исходных данных для фототриангуляции и определения

элементов внешнего ориентирования в исследовании использовались только высокоточные КЦП снимков (рис 2.4). Табл. 2.2 и рис. 2.4 демонстрируют точность определения КЦП снимков. Высокая точность фототриангуляции (табл. 2.3), сравнимая с пространственным разрешением снимков 5 см, была достигнута благодаря нескольким факторам:

- 1) калибровка камеры;
- 2) высокоточное определение координат центров проекции снимков с использованием приемников ГНСС геодезического класса;
- 3) строгие алгоритмы фотограмметрической обработки, реализованные в программном обеспечении.

Это говорит о том, что точность последующей фотограмметрической обработки данных может быть в пределах 1–2 пикселей исходных снимков [17, 20, 97, 131].

Используя результаты фототриангуляции и полуглобальный метод отождествления соответствующих точек, было рассчитано плотное облако точек, которое по своей сути является нерегулярной цифровой моделью поверхности (ЦМП) (рис 2.5а, б). Из нерегулярной ЦМП методом линейной интерполяции рассчитывают регулярную ЦМП [46]. Для получения ЦМР необходимо применить алгоритм классификации, разработанный ООО Agisoft, который позволяет выделить точки «на земле». [35, 38].

Во избежание путаницы напомним, что ЦМР описывает топографическую поверхность, в то время как ЦМП описывает поверхность, охватывающую или состоящую из частей топографической поверхности, поверхности растительного покрова, верхних частей зданий и других объектов, расположенных на топографической поверхности [91, гл. 3].

Классификация включает в себя следующие этапы анализа плотного облака точек. Обследуемый участок делится на квадраты заданного размера (обычно от 50 x 50 м до 100 x 100 м). Предполагается, что самая низкая точка в квадрате является «наземной» точкой.

После получения «наземных» точек, выполняется интерполяция, в

результате чего рассчитывается поверхность, которая является первым приближением топографической поверхности. Затем в каждой точки первого приближения топографической поверхности строится виртуальный луч. Проводится анализ плотного облака точек с установкой параметров длины луча и угла над поверхностью. Все точки, расположенные под лучом, относятся к классу «земля», а все точки, расположенные над лучом, относятся к классу «неназначенные». Таким образом, можно удалить точки, связанные с высоким растительным покровом и зданиями (рис. 2.5в). Есть также точки, расположенные под поверхностью. Такие точки относятся к классу «низкого шума». Чтобы избежать этой проблемы, перед классификацией плотное облако точек обычно обрабатывают с помощью медианного фильтра. Параметры классификации (размер ячейки, угол луча, длина луча) выбираются в зависимости от типа рельефа местности.

Чтобы получить ЦМР исследуемой области, был произведен анализ размеров регулярной сетки с пространственным разрешением 6 см (максимально возможное), 20 см и 1 м. Разрешение 6 см было исключено, так как оно находится на пределе точности: аэрофотоснимки имеют среднее разрешение 5,13 см.

Принимая во внимание теорему Котельникова, можно рассматривать размер сетки 20 см как наилучшее пространственное разрешение (с запасом точности), которое может быть использовано для получения ЦМР района исследований (рис 2.6) [89; 91, с. 104-105]. В табл. 2.4 приведена точность ЦМР всего района исследований с разрешением 20 см. Оценка точности производилась с использованием 41 контрольной точки. Ошибка по высоте составляет -0.09 ± 0.10 м, то есть около $0,10 \pm 12\%$ от амплитуды высот в пределах исследуемой зоны.

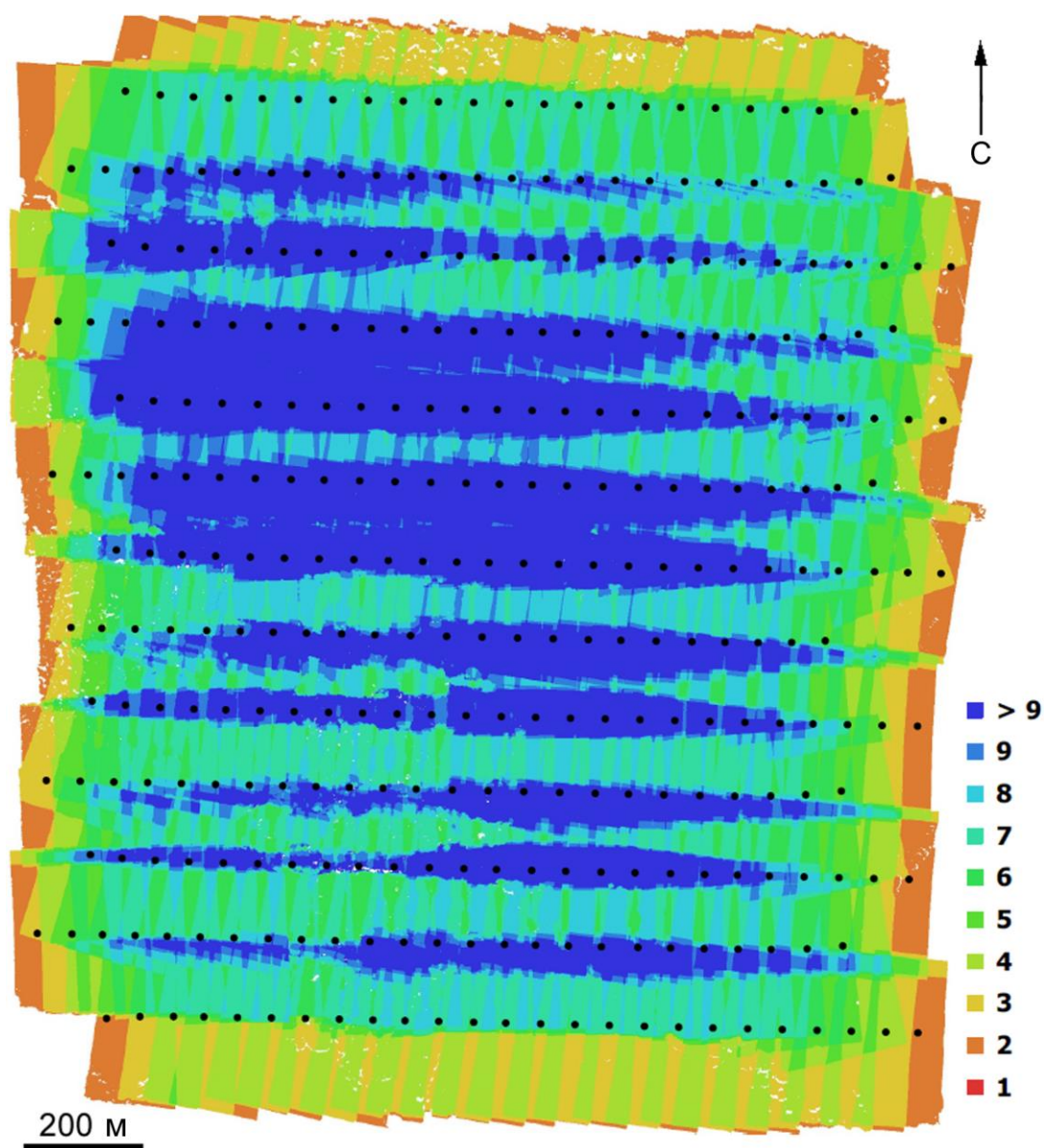


Рисунок 2.3 – Схема аэрофотосъемки и перекрытие снимков.
 Черные точки – центры проекций снимков; цветом отображается степень
 перекрытия снимков

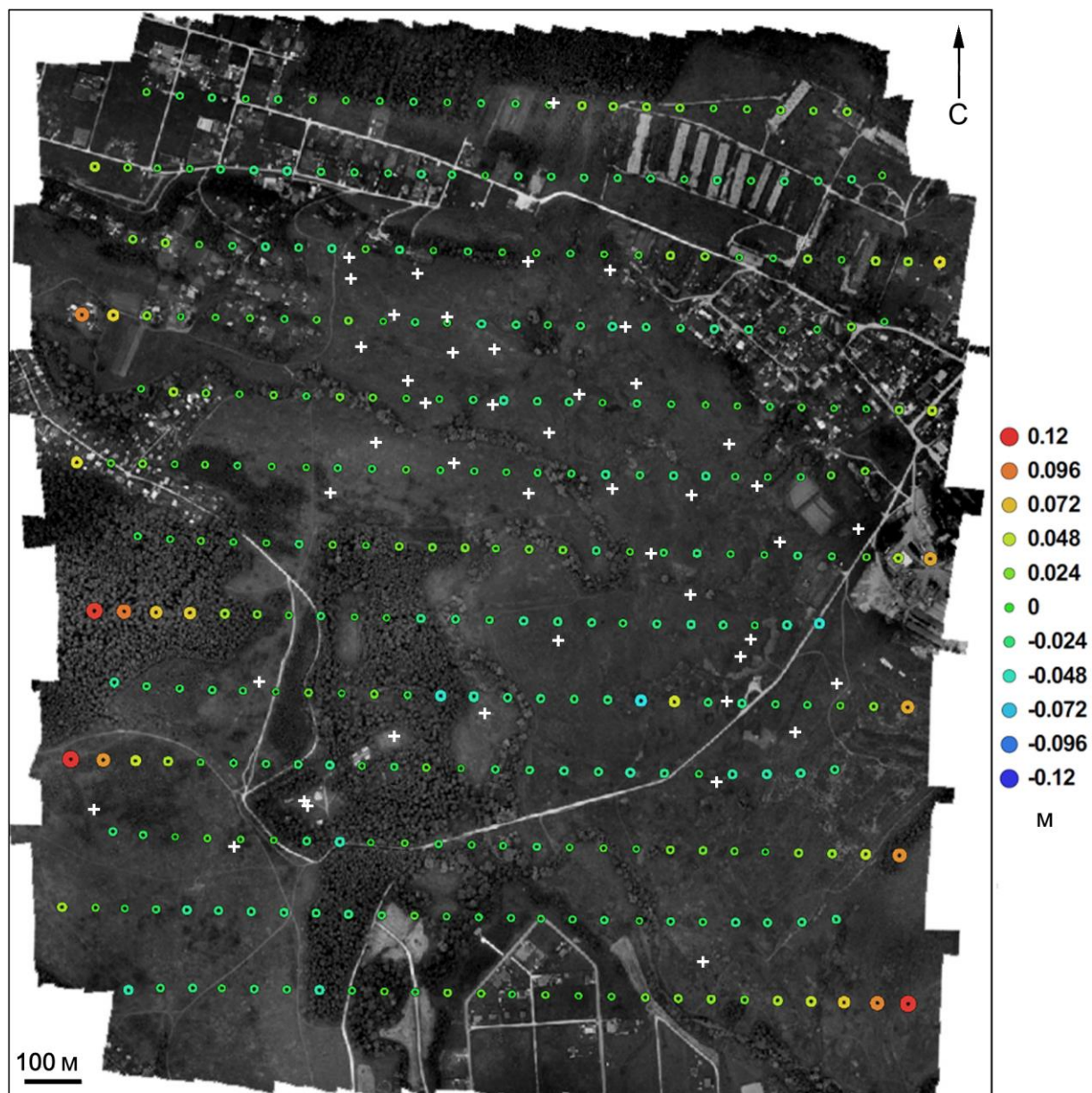


Рисунок 2.4 – Ошибки в определении КЦП снимков на фоне ортофотоплана.

Цвет и размер пунсона характеризуют ошибки по вертикали и в плане, соответственно. Черные точки – центры проекций снимков.

Белые кресты —маркированные контрольные точки

2.4 Геоморфометрическое моделирование

Для геоморфометрического моделирования использовались две ЦМР с пространственным разрешением 20 см и 1 м, полученные для двух типичных участков исследуемого района (рис. 2.6). Меньший участок (выдел на рис. 2.1б) включает травянистый оползневой правобережный склон долины р. Скнига. Размер участка составляет около 310 x 240 м; амплитуда высот около 41 м. Большой участок (тестовый участок на рис. 2.1б) включает центральную треть района исследований. Размер этого участка составляет около 1146 x 1103 м; амплитуда высот около 74 м.

ЦМР выдела (рис 2.7а) вписывается в матрицу 1510 x 1172 элементов с шагом 20 см. ЦМР включает в себя 1201311 точек со значениями высоты. ЦМР тестового участка (рис. 2.7б), вписывается в матрицу 1145 x 1102 элементов с шагом 1 м. ЦМР включает 1014469 точек со значениями высоты.

Точность ЦМР выдела (табл. 2.5) была оценена с использованием семи контрольных точек, равномерно расположенных на этом участке (рис. 2.6). Как и в случае всего исследуемого района (см. выше), ошибка по высоте составляет $-0,09 \pm 0,03$ м, то есть около $0,22 \pm 0,07\%$ амплитуды высот в пределах исследуемой зоны. Ошибка носит систематический характер, это вызвано травянистым покровом. Опорные точки расположены на «земле», в то время как точки модели с низкой травяной растительностью не были «срезаны» классификацией и были отнесены к классу точек «земля».

Для аппроксимации высот (рис. 2.7а, б) и вычисления локальных морфометрических величин использовался универсальный спектрально-аналитический метод [98]. Метод предназначен для обработки регулярных ЦМР в рамках единой схемы, включающей глобальную аппроксимацию ЦМР, удаление шума, генерализацию и вычисление частных производных высоты [90]. Метод основан на ортогональных разложениях высокого порядка с использованием полиномов Чебышева первого рода с последующим суммированием Фейера.

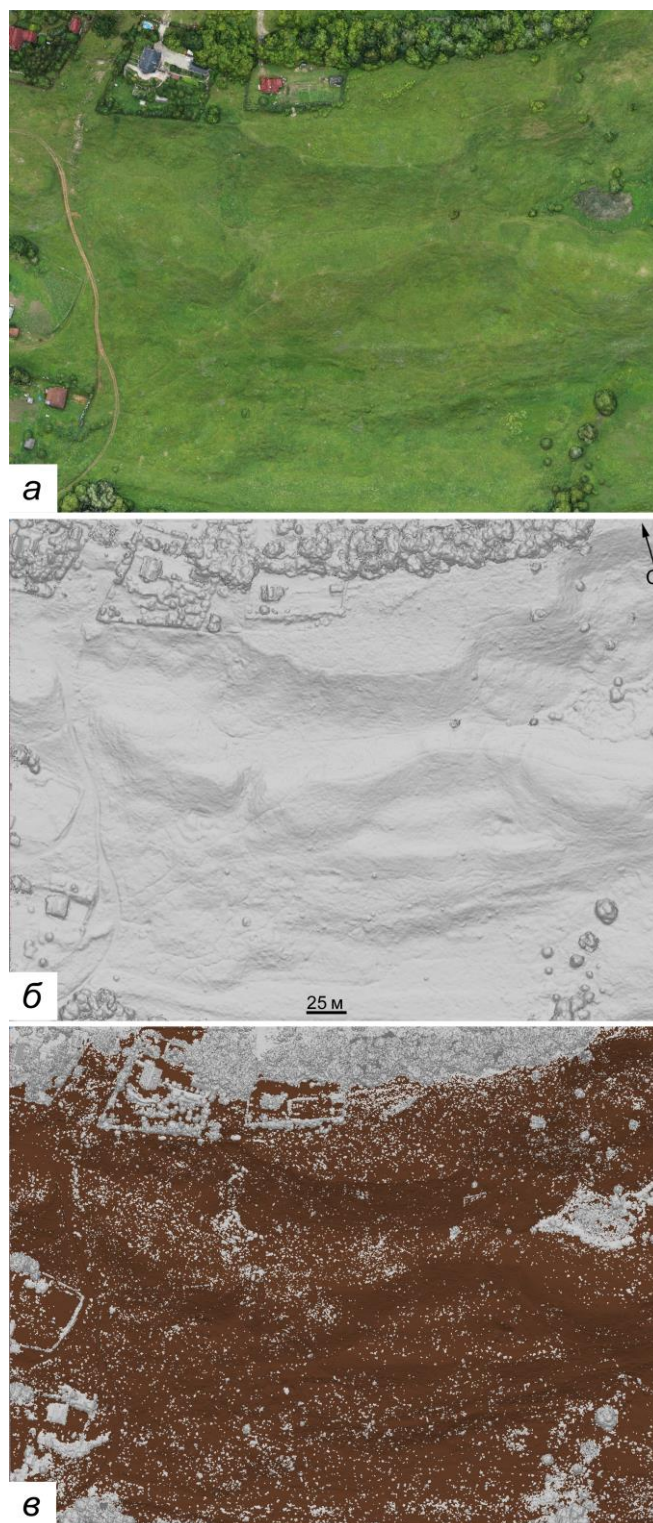


Рисунок 2.5 – Плотное облако точек для фрагмента района исследований:
а – облако точек в естественных цветах, *б* – неклассифицированное облако точек, *в* – классифицированное облако точек (коричневый цвет – точки класса «земля», белый цвет – точки классов «незначенного» и «низкий шум»). Расположение этого фрагмента показано на рис. 2.1б

Для аппроксимации и восстановления двух ЦМР были оценены различные наборы коэффициентов разложения: 1000, 750, 500, 250, 100 и 50 коэффициентов разложения по осям x и y . В результате выявлено, что использование 500 коэффициентов разложения достаточно для восстановления ЦМР практически без потери информации. Таким образом, дальнейшие вычисления проводились с использованием 500 коэффициентов разложения по осям x и y (то есть, глобальная аппроксимация высоты и вычисление частных производных выполнялись с использованием 500^2 коэффициентов разложения).

В итоге, используя модели частных производных, были рассчитаны цифровые модели некоторых локальных морфометрических величин: уклон (G), горизонтальная кривизна (k_h), вертикальная кривизна (k_v), минимальная кривизна (k_{min}) и максимальная кривизна (k_{max}) (рис. 2.7–2.8). Применялись уравнения, представленные в Приложении 1 [91, гл. 2; 175].

С целью демонстрации влияния ошибок фотограмметрической обработки на геоморфометрическое моделирование, была рассчитана k_h по ЦМР с разрешением 20 см (рис. 2.10). Эта ЦМР включает в себя артефакты, вызванные случайными ошибками автоматической классификации плотного облака точек (§ 2.3).

Для аппроксимации высоты и вычисления k_h применен универсальный спектрально-аналитический метод с 500 коэффициентами разложения [98].

Значения кривизн характеризуются широким динамическим диапазоном. Чтобы избежать потери информации о пространственном распределении значений кривизны при отображении, целесообразно применять логарифмическое преобразование, используя следующее выражение [91, с. 244; 176]:

$$\Theta' = \text{sign}(\Theta) \ln(1 + 10^n |\Theta|), \quad (2.1)$$

где Θ и Θ' – значение начальной и логарифмически преобразованной

морфометрической величины, соответственно. $n = 0$ для высоты и нелокальных величин и $n = 2, \dots, 18$ для локальных величин. Такая форма логарифмического преобразования предполагает, что динамические диапазоны некоторых морфометрических величин включают как положительные, так и отрицательные значения. Выбор значения n зависит от размера области исследования; в данном случае $n = 3$ и $n = 4$ для картографирования кривизны с разрешением 20 см и 1 м, соответственно (рис. 2.7д, е; 2.8 и 2.10в). Вычислительные краевые эффекты были удалены. Геоморфометрическое моделирование и картографирование выполнялись с использованием программного обеспечения Matlab R2008b и LandLord [91].

2.5 Анализ результатов моделирования

Каждая морфометрическая величина имеет свою интерпретацию [91, гл. 2; 176]. k_h – это мера конвергенции потоков (первый механизм аккумуляции потоков), гравитационные наземные и внутрипочвенные латеральные потоки конвергируют при $k_h < 0$ и расходятся при $k_h > 0$.

С геоморфологической точки зрения, картографирование k_h позволяет выявить отроги хребтов и долин (области дивергенции и конвергенции, соответственно), комбинация которых выявляет так называемые потоковые структуры.

k_v – это мера относительного замедления и ускорения гравитационных потоков (второй механизм аккумуляции потоков). Наземные и внутрипочвенные латеральные потоки замедляются при $k_v < 0$ и ускоряются при $k_v > 0$. В геоморфологическом плане, картографирование k_v позволяет выявить террасы и обрывы.

Положительные значения k_{min} соответствуют локальным выпуклым формам рельефа местности (напр., холмам), в то время как отрицательные значения относятся к удлиненным вогнутым формам рельефа (напр., долинам).

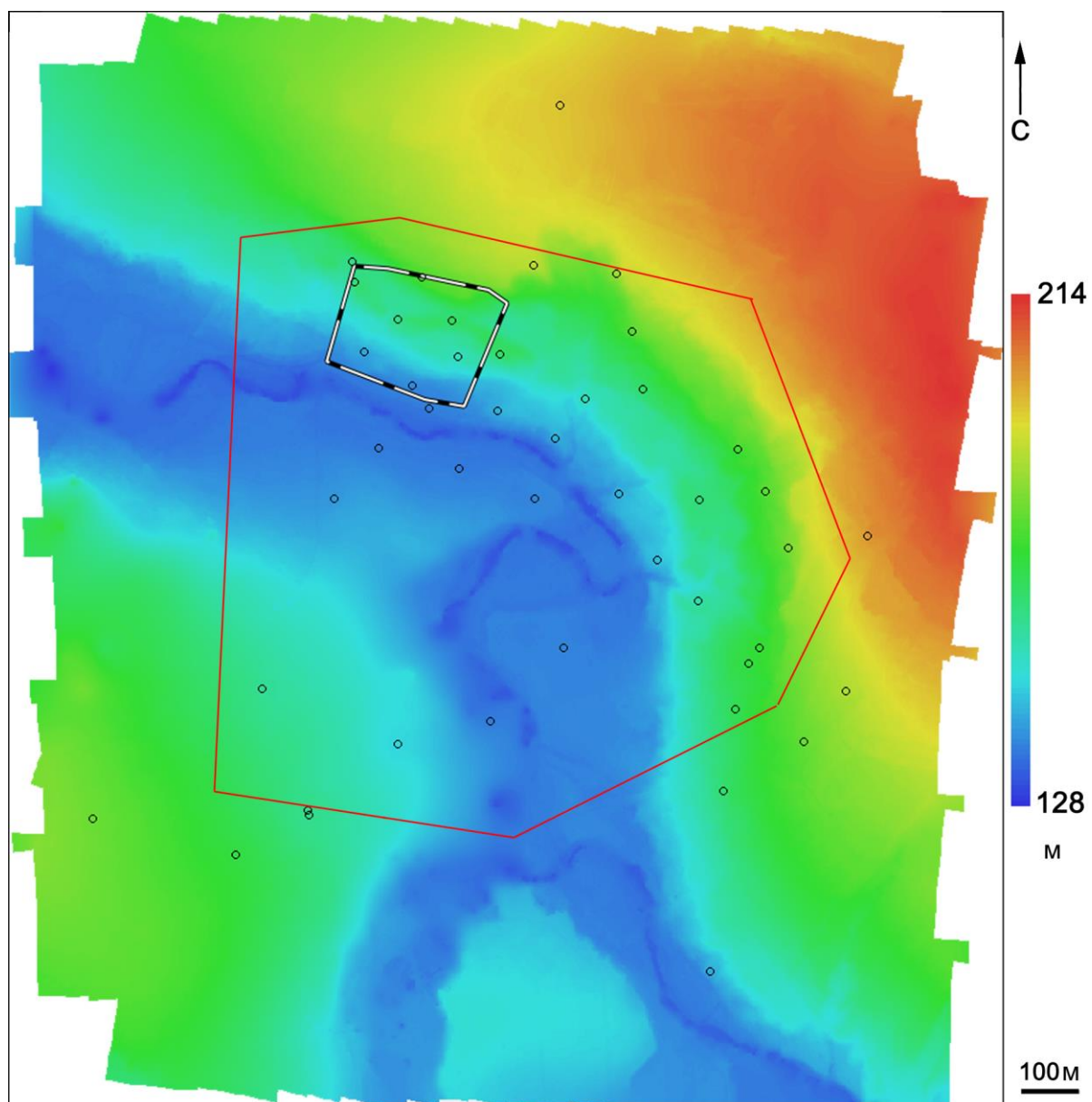


Рисунок 2.6 – ЦМР района исследований.

Черно-белая и красная рамки – выдел и тестовый участок для дальнейшего геоморфометрического моделирования с разрешением 20 см (рис. 2.7а) и 1 м (рис. 2.7б), соответственно. Пунсоны показывают местоположение контрольных точек

Таблица 2.2 – Точность определения КЦП

Ошибка	X (м)	Y (м)	H (м)
Минимальная	–0,227	–0,104	–0,061
Максимальная	0,181	0,106	0,118
Средняя	0,000	0,000	0,000
Среднеквадратическая	0,131	0,042	0,028

Таблица 2.3 – Точность фототриангуляции

Ошибка	X (м)	Y (м)	H (м)
Минимальная	–0,038	–0,011	–0,070
Максимальная	0,038	0,051	0,138
Средняя	–0,012	0,019	0,030
Среднеквадратическая	0,016	0,014	0,040

Таблица 2.4 – Точность ЦМР района исследований

Ошибка	Значение (м)
Минимальная	–0,33
Максимальная	0,38
Средняя	–0,09
Среднеквадратическая	0,10

Таблица 2.5 – Точность ЦМР выдела

Название точки / Вид ошибки	Значение высоты (м)		Значение ошибки (м)
	Каталог контрольных точек	ЦМР	
OP08	161,58	161,66	–0,08
OP01	159,96	160,00	–0,04
KL05	141,42	141,56	–0,14
KL09	138,07	138,15	–0,08
KL06	153,50	153,63	–0,13
KL10	165,09	165,15	–0,06
OP09	173,32	173,39	–0,07
Минимальная			–0,04
Максимальная			–0,14
Средняя			–0,09
Среднеквадратическая			0,03

Положительные значения k_{max} соответствуют удлиненным выпуклым формам рельефа (напр., гребням), в то время как отрицательные значения относятся к локальным вогнутым формам рельефа (напр., котловинам). Характеристика других морфометрических величин представлено в Приложении 1.

Визуальный анализ морфометрических карт выдела (рис 2.7в, д; 2.8а, в, д) показал, что они адекватно отражают особенности микрорельефа на этом небольшом травянистом участке. В частности, k_h выявляет структуры микропотоков (рис. 2.7д), а k_v выявляет микротеррасы (рис. 2.8а). Деревья, кустарники и высокий травяной покров были эффективно удалены с помощью автоматической классификации плотного облака точек. В то же время, классификация не смогла удалить низкий травяной покров со средней высотой около 9 см (§ 2.3, табл. 5).

Это подтверждается едва заметными следами в нескольких местах на морфометрических картах (рис. 2.7в, д; 2.8а, в). Эти узкие кусочно-линейные артефакты возникли из-за хорошо известной чувствительности частных производных к резким скачкообразным изменениям значений высот [89]. В данном случае ступенчатые изменения расположены вдоль краев троп и низкого травяного покрова. Следует обратить внимание, что эти артефакты не видны на ЦМР (рис. 2.7а).

Парный сравнительный анализ карт с разным разрешением (20 см и 1 м) для каждой морфометрической величины (рис. 2.7–2.8) позволяет увидеть явный эффект генерализации в пределах выдела. Это хорошо известный эффект изменения разрешения ЦМР на элементах изображения морфометрических карт [48; 91, § 6.2.6; 212].

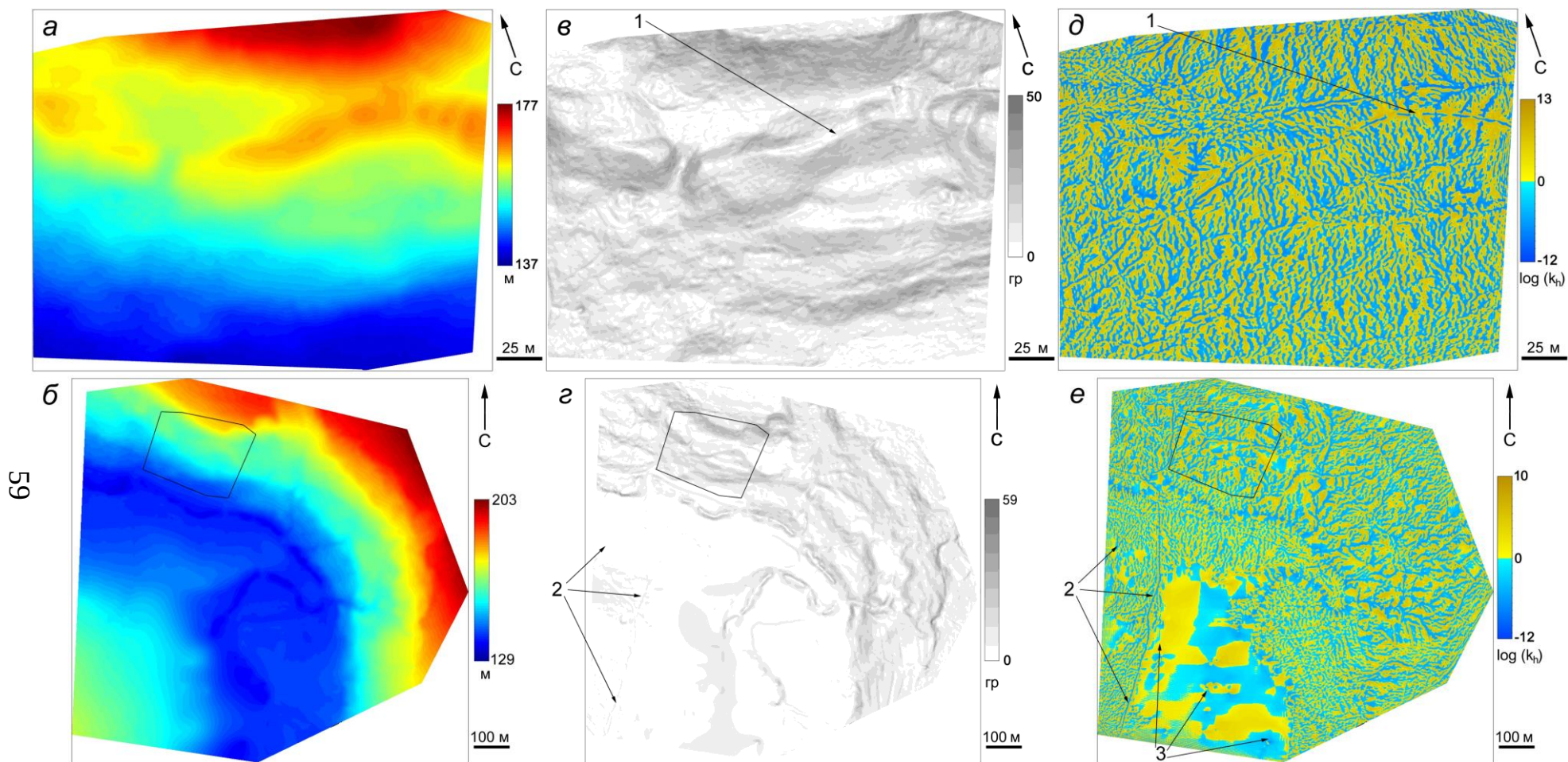


Рисунок 2.7 – Выдел (*a, в, д*) и тестовый участок (*б, г, е*), разрешение 20 см и 1 м, соответственно: *a* и *б* – высоты; *в* и *г* – G ; *д* и *е* – k_h . Черная рамка – расположение выдела. Стрелками показаны артефакты: 1 – тропа, 2 – дороги, 3 – лес

Тестовый участок с разрешением 1 м (рис. 2.7*г, е* и 2.8*б, г, е*) охватывают относительно большую территорию с различными типами рельефа. Хорошо видно, что разный морфометрический рисунок (узор) характеризуют разные типы рельефа тестового участка. Можно визуально отличить, по крайней мере, два типа рисунков. Первый связан с оползневый правобережным склоном долины р. Скнига (северная и восточная части области тестирования), а второй – с плоской поймой и левым берегом долины реки (центральная часть области тестирования).

Также, морфометрические карты с разрешением 1 м отображают ярко выраженный площадной артефакт, расположенный в юго-западном углу тестового участка (рис. 2.7*е* и 2.8*б, г, е*). Он связан с зоной сплошной лесной растительности размером около 400 x 500 м (рис. 2.1*б*). На таком участке алгоритмы классификации не работают, поскольку на снимках фактически не видно поверхности Земли. Подобную проблему невозможно решить без вспомогательных данных о рельефе.

Н. Андерс и соавт. [47] предложили решать такие проблемы, используя данные воздушного лазерного сканирования или наземной съемкой с использованием приемников ГНСС. Также может быть использована тахеометрическая съемка.

На западной стороне области тестирования также можно увидеть несколько ярко выраженных линейных артефактов (рис. 2.7*г, е* и 2.8*б, г*). Это следы дорог (см. рис. 1*б*), возникающие по той же причине, что и следы троп (см. выше). Вдоль краев дорог присутствуют резкие, ступенчатые изменения значений высот, связанные с растительностью. Площадной и линейные артефакты не видны на ЦМР (рис. 2.7*б*).

2.6 Методика фотограмметрической обработки и беспилотной аэрофотосъемки для целей геоморфометрического моделирования

2.6.1 Общие сведения

В результате проведенных исследований и экспериментов на

Заокском геополигоне выявлены условия по получению корректных ЦМР высокого разрешения на основании материалов беспилотной аэрофотосъемки, предназначенных для геоморфометрического моделирования. Некоторые из условий являются общеизвестными в узких профессиональных кругах, но, тем не менее, требуют упоминания по ряду причин, среди которых следует отметить растущий рынок БАС, который привлекает к себе неподготовленных пользователей. В общем используются классическая схема проведения аэрофотосъемочных и фотограмметрических работ, но с учетом ряда технологических особенностей, которые можно разделить на несколько групп: связанные с полезной нагрузкой, аэрофотосъемочными работами и фотограмметрической обработкой. Рис. 2.9 иллюстрирует технологические особенности методики беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования.

2.6.2 Камера

Следует использовать камеру, оборудованную центральным или электронным затвором. Не рекомендуется использовать камеры со шторно-щелевым затвором. Изображение, сформированное такой камерой, можно рассматривать как матрицу, строки которой формируются в разные моменты времени при разных значениях параметров внешнего ориентирования.

Это связано с тем, что камера меняет свою угловую ориентацию во время формирования изображения, что приводит к геометрическим искажениям [24, 33].

Потребительские, профессиональные и аэрофотосъемочные камеры обычно имеют КМОП матрицы с размерами пикселей 1–3, 4–6 и 6–16 мкм, соответственно [74; 110, гл. 5]. Хорошо известно, что чем больше площадь пикселя, тем выше уровень сигнала; динамический диапазон и отношение сигнал / шум выше при увеличении площади пикселя [45, с. 71; 68; 110, с. 86; 209].

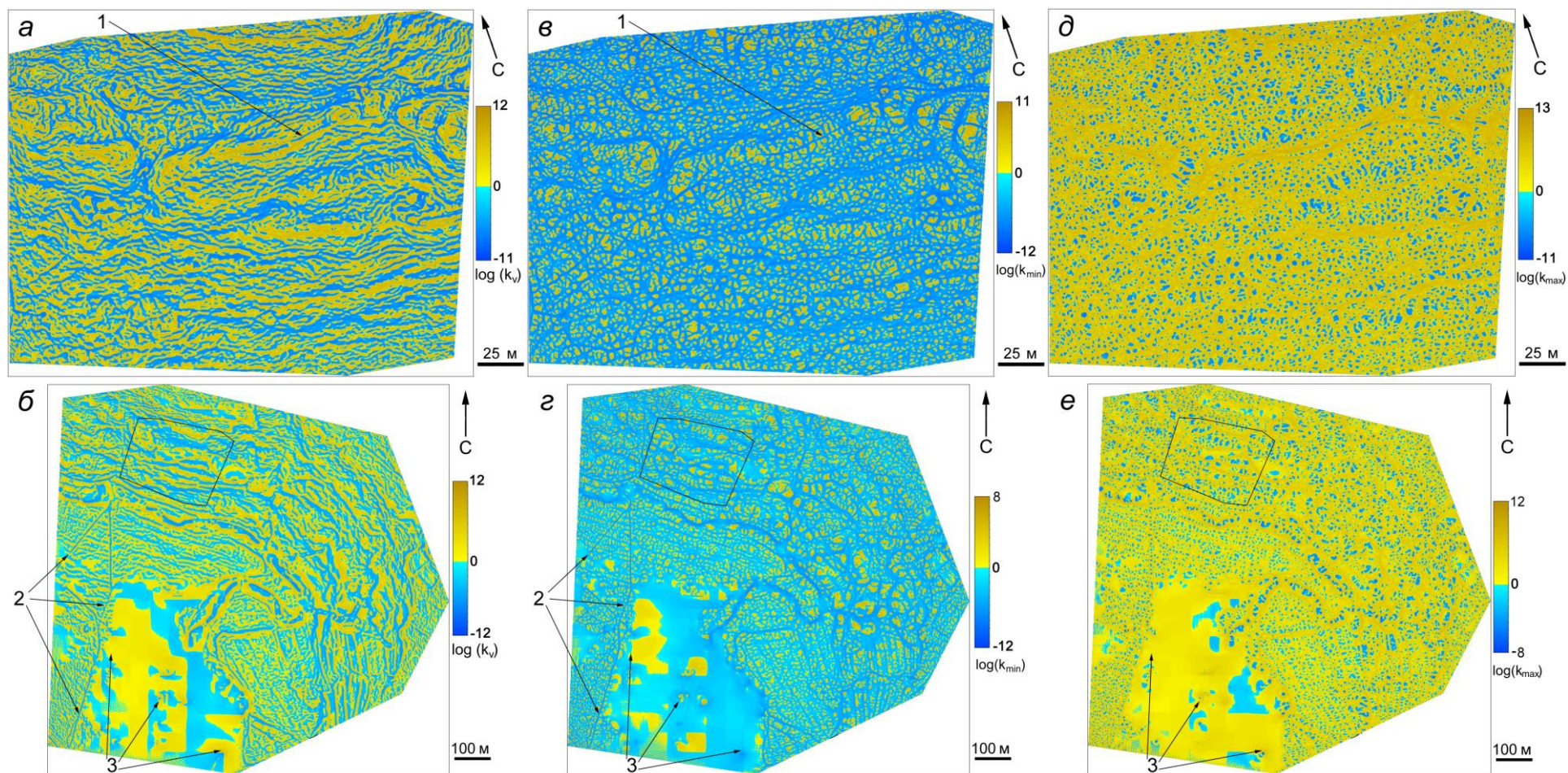


Рисунок 2.8 – Морфометрические величины на выдел (*a*, *б*, *д*) и тестовый участок (*б*, *з*, *е*): *a* и *б* – k_v , *б* и *з* – k_{min} , *д* и *е* – k_{max} . Черная рамка – местоположение выдела. Стрелками показаны артефакты: 1 – тропа, 2 – дороги, 3 – лес

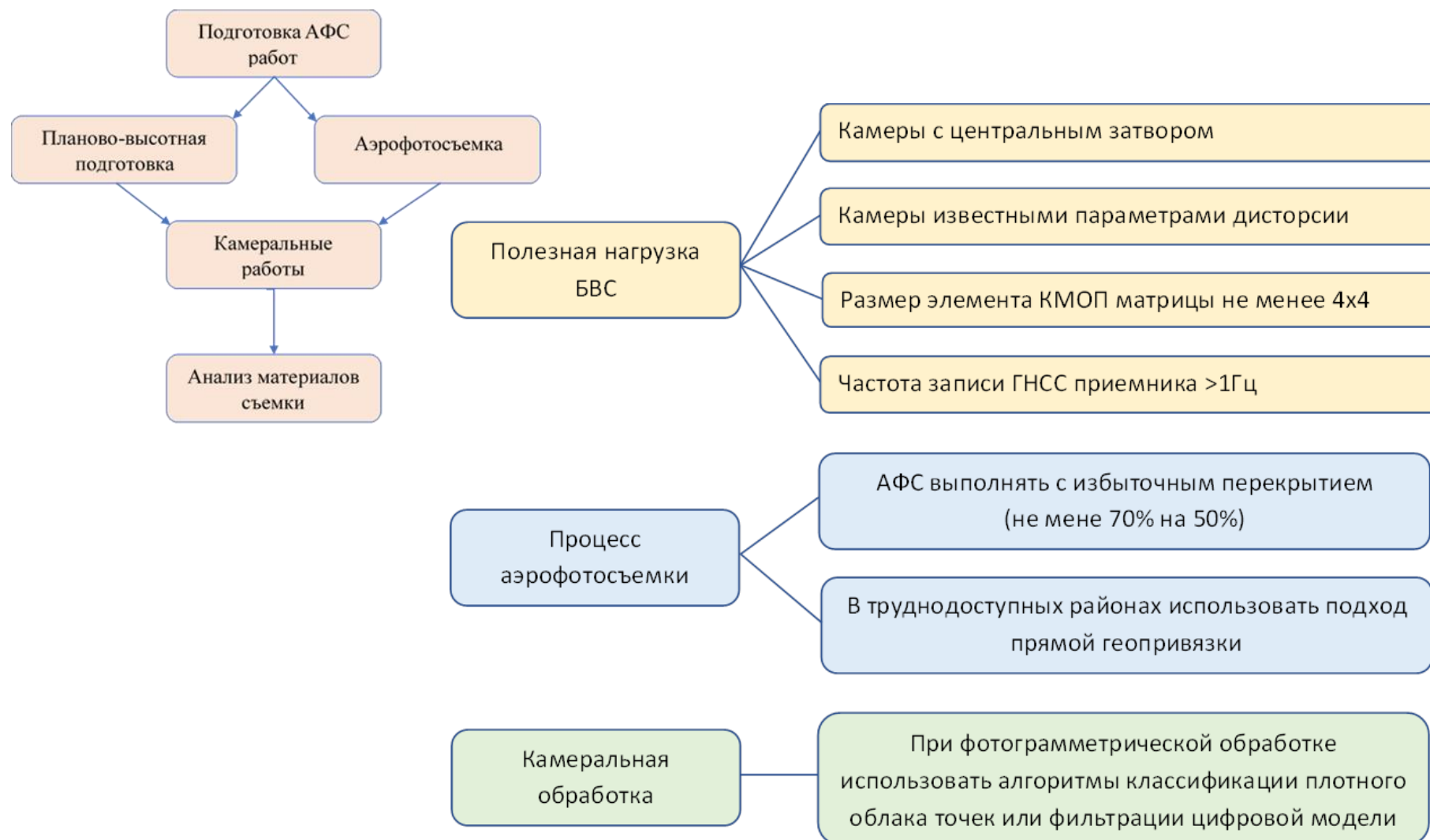


Рисунок 2.9 – Технологические особенности методики беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования

Не рекомендуется использовать КМОП матрицы с размерами пикселей менее 4 x 4 мкм. Это означает, что использование потребительских камер (и, тем более, камер для смартфонов [211]) не желательно. В противном случае качество изображений будет сильно снижено, что приведет к ухудшению визуального и автоматического распознавания объектов на снимках.

Следует использовать калиброванные камеры с известными параметрами дисторсии объектива, полученными при лабораторной и/или полевой калибровке. Использование опции самокалибровки в фотограмметрическом программном обеспечении без достаточного количества данных геодезической привязки (т.е., высокоточных центров проекции снимков, опорных и контрольных точек) может привести к искажению полученной фотограмметрической модели из-за корреляционных связей между параметрами внешней и внутренней ориентации, включая параметры дисторсии.

2.6.3 Аэрофотосъемка с использованием БАС

Рекомендуется использовать БАС, способные обеспечить проведение аэрофотосъемки с гарантированным продольным и поперечным перекрытием не менее 70% и 50%, соответственно.

В пилотируемой аэрофотосъемке обычное продольное и поперечное перекрытия (60% и 30%) обеспечивают тройное перекрытие соседних снимков. Чрезмерное перекрытие (70% и 50%) необходимо, потому что БАС, имеющий небольшой вес, сильно подвержен влиянию ветра. Это может привести к неожиданным изменениям маршрутов полета и кренов во время полета, что приведет к «фотограмметрическим дырам», то есть к области без тройного перекрытия снимков или даже без каких-либо снимков.

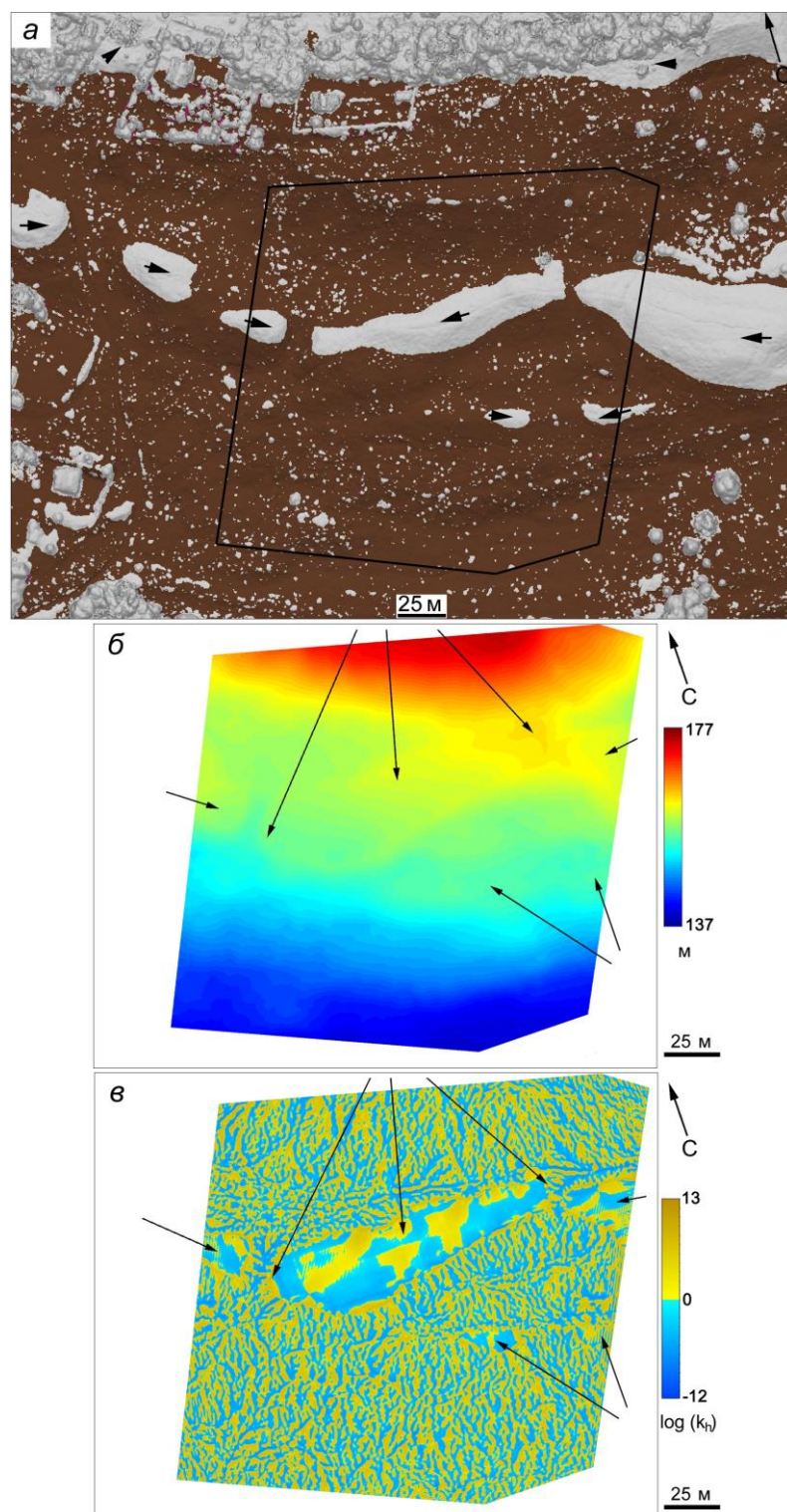


Рисунок 2.10 – Примеры артефактов, вызванных ошибками автоматической классификацией плотного облака точек для части исследуемого района, включающего выдел: *a* – классифицированное облако точек с ошибками, черная рамка показывает местоположение выдела; *б* – ЦМР; *в* – k_h . Стрелки показывают ошибки классификации и артефакты в моделях

Также избыточное перекрытие следует использовать при сильном ветре. БАС поворачивается и летит «боком», приспособляясь к направлению ветра. Как правило, камера жестко закреплена в корпусе БАС, между камерой и направлением полета образовывается угол. Это приводит к повороту изображения относительно направления полета, что, в свою очередь, приводит к появлению зон с недостаточным перекрытием. Избыточное поперечное перекрытие гарантирует отсутствие «фотограмметрических дыр» в подобных ситуациях.

Рекомендуется использовать бортовые приемники ГНСС геодезического класса и наземные базовые станции для высокоточного определения КЦП снимков. Это уменьшает количество дорогостоящих полевых работ, а также предоставляет контрольные данные для самокалибровки со стабильным и надежным определением параметров камеры.

Чтобы добиться хорошего фотометрического качества аэрофотоснимков без размытия изображения, необходимо соотнести время экспозиции со скоростью БАС. Однако не следует сильно увеличивать значение чувствительности ISO, поскольку это приводит к появлению шума на изображениях.

Важно учитывать погодные условия. Сила и направление ветра могут влиять на перекрытие снимков (см. выше). Аэрофотосъемку с БАС не рекомендуется проводить во время выпадения осадков, поскольку на снимках регистрируются следы падающих капель дождя или летящих снежинок в виде штриховки. Такие снимки обрабатываются с ошибками.

Разрешение ЦМР зависит от высоты полета: чем выше высота полета, тем ниже разрешение изображений и ниже разрешение ЦМР. В геоморфометрическом контексте этот вопрос обсуждается в нескольких научных работах [48, 50, 138].

2.6.4 Камеральные работы

Для создания ЦМР необходимо использовать алгоритмы классификации для фильтрации растительного покрова и искусственных объектов. Однозначно невозможно удалить сплошные древесно-кустарниковые массивы из ЦМП. Аналогичная ситуация с плотной высокотравной растительностью. Кроме того, необходимо убрать точки, относящиеся к классу «низкий шум». В фотограмметрических системах эта нетривиальная проблема решается различными способами с различной степенью правдоподобия. Многое зависит от «правильного» выбора параметров фильтрации и/или классификации, в зависимости от особенностей конкретной местности [49].

Артефакты могут оставаться и после автоматической классификации плотного облака точек. В экспериментах они появились в некоторых областях, в основном, связанных со сплошной древесной растительностью. Практически невидимые на картах отмывки рельефа, такие артефакты доминируют на морфометрических картах из-за вычисления частных производных высоты. На рис. 2.10 показан пример некорректной ЦМР с артефактами для выдела. Приводораздельная область в центральной части участка была неправильно описана в ЦМР из-за ряда случайных ошибок при автоматической классификации плотного облака точек (ср. рис 2.5в и 2.10а). Большинство точек, принадлежащих поверхности водораздела, были отнесены к классу «не назначенные» (белый цвет; рис. 2.10а) и поэтому не использовались для интерполяции во время создания ЦМР. Тем не менее, карта отмывки рельефа (рис. 2.10б), построенная по некорректной ЦМР, может быть вполне правдоподобна с точки зрения пространственного распределения значений высот. Только человек, знакомый с местностью, может распознать некоторые странные узоры, связанные с водоразделом в центральной части карты (ср. рис. 2.7а и 2.10б). С другой стороны, морфометрическая карта k_h , полученная по некорректной ЦМР (рис. 2.10в), отображает большой артефакт в этом месте, а также несколько меньших

артефактов. Рисунок артефактов ясно отличается от других близлежащих корректных рисунков рельефа (см. рис. 2.7*д* и 2.10*в*).

Таким образом, чтобы получить корректную ЦМР, необходимо проводить тщательный визуальный контроль. Для распознавания и локализации артефактов могут быть полезны карты локальных морфометрических величин, поскольку вычисление частных производных высоты усиливает выраженность артефакта. Также полезно применять ручное стереоредактирование полученных ЦМР. Рекомендуется использовать фотограмметрическое программное обеспечение с функциями работы в стереорежиме.

Выводы по главе 2

1) Для дистанционного зондирования Земли БАС используются в качестве более дешевой и оперативной платформы получения пространственных данных. В частности, данные, полученные с БАС, используются для создания ЦМР с высоким пространственным разрешением. Однако остается значительное количество вопросов к точности и возможности применения материалов с БАС в геоморфометрическом моделировании.

2) Результаты исследования показывают, что ЦМР, полученные по материалам с БАС, можно использовать для создания хорошо читаемых морфометрических карт уклонов, экспозиции и кривизны поверхности для территории с травянистой растительностью и отдельно стоящими группами деревьев или кустов, а также других объектов. На районах со сплошной лесной растительностью наблюдаются серьезные ошибки в расчетах морфометрических величин, которые невозможно исправить без дополнительных данных о рельефе.

3) Выявлены технологические особенности получения корректных ЦМР высокого разрешения на основе данных с БАС, предназначенных для геоморфометрического моделирования.

4) Разработана методика беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования.

5) Исследование проводилось в сельской местности. Существуют очевидные проблемы с корректным созданием ЦМР на базе БАС в городской местности.

6) Отработку методики аэрофотосъемки с использованием БАС для морфометрического картографирования следует проводить на специальных полигонах. Применение разработанной методики возможно для любых природных ландшафтов, в том числе – для горных и покровных ледников

ГЛАВА 3

ОСОБЕННОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАС НА ЛЕДНИКАХ ГОРНОГО И ПОКРОВНОГО ТИПА

В главе описана методика проведению беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников. § 3.1 посвящен основным предпосылкам разработки методики аэрофотосъемке ледников. В § 3.2 подробно разбираются основные особенности аэрофотосъемочных работ. Систематизация технологических особенностей выполнена с учетом ряда факторов, а именно: выбора стартовой площадки, погодных условий, конструктивных особенностей БАС, алгоритмов работы автопилота, планово-высотной подготовки аэрофотосъемки.

3.1 Предпосылки разработки методики применения БАС в сложных условиях горного и покровного оледенения

В многочисленных исследованиях [16, 60, 74, 201, 204, 205] описываются аппаратные компоненты и прикладные возможности применения БАС в различных отраслях науки, связанных с окружающей средой. Авторы этих работ сталкиваются с проблемами проведения аэрофотосъемки, но ни в одном из обзоров не проведена систематизация выявленных особенностей аэрофотосъемочных работ, в том числе в горной местности и в условиях крайнего севера/юга.

С другой стороны, особенности аэрофотосъемочных работ хорошо регламентируются нормативно-технической документацией, которая четко разделяет обязанности пилота воздушного судна и оператора съемочного оборудования. Высокий уровень автоматизации БАС и существующая производственная практика приводит к размытию границы между обязанностями пилота и оператора съемочного оборудования. Создается потребность в универсальном кадровом потенциале, когда один сотрудник обладает практическими навыками и теоретическими знаниями по геодезии, аэрофотосъемке, фотограмметрической обработке материалов съемки и

управлению БАС. Последние компетенции, как правило, приобретаются на коротких курсах повышения квалификации и не могут включать особенности применения БАС в экстремальных условиях гор и покровного оледенения [1].

В разработке, представленной ниже методики беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников учитывался личный опыт автора, полученный в ходе 3-х экспедиций на горный массив Табын-Богда-Ола (Монголия) и во время участия в 62-ой РАЭ.

3.2 Особенности аэрофотосъемочных работ с использованием БАС в сложных условиях горного и покровного оледенения

Особенности проведения беспилотной аэрофотосъемки в условиях высокогорья и антарктических приполярных широт можно разделить на несколько направлений: 1) программное обеспечение планирования и управления полетом; 2) выбор стартовой площадки; 3) конструктивные особенности БАС; 4) режимы работы автопилота, принципы работы запрограммированных команд; 5) погодные условия; 6) планово-высотная подготовка аэрофотосъемки; 7) тактико-технические характеристики БАС. Все перечисленные направления можно обобщить в три группы, относящиеся к: 1) НСУ; 2) БАС; 3) геодезическим работам. На рис. 3.1 представлены технологические особенности методики применения БАС в условиях оледенения.

Перечисленные выше факторы, рассматриваются на примере продуктов конкретной компании – БАС серии «Геоскан» (§ 2.2.1). Выявленные в ходе экспедиционных исследований достоинства и недостатки могут быть с осторожностью экстраполированы на программно-аппаратные решения других производителей. Для выявленных недостатков даны рекомендации по их устранению. Эти рекомендации использовались, в том числе, при модернизации БАС компании Геоскан.

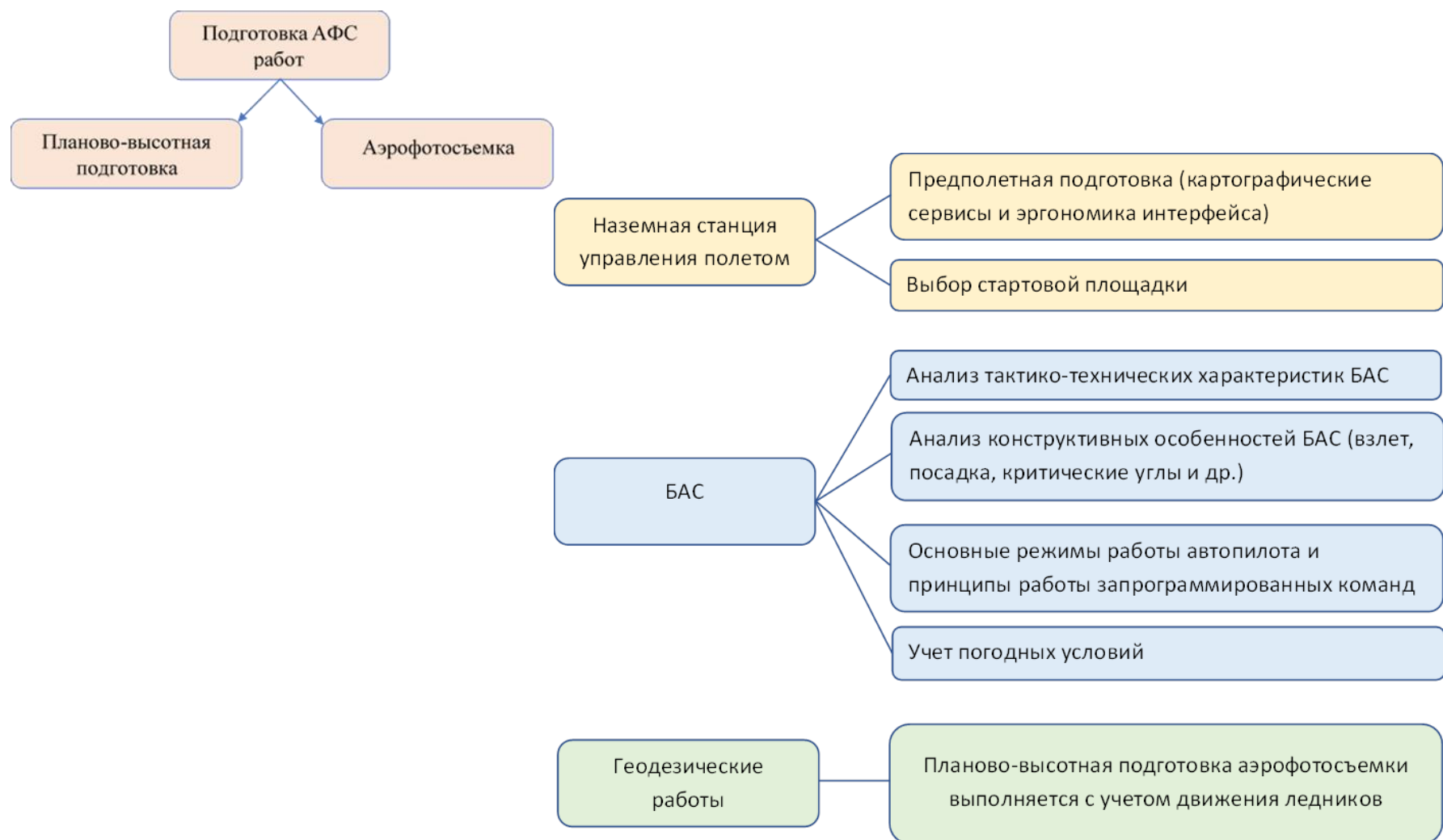


Рисунок 3.1 – Технологические особенности методики беспилотной аэрофотосъемки ледников горного и покровного типа.

3.2.1 Наземная станция управления полетом

3.2.1.1 Картографические материалы для НСУ

Проектирование аэрофотосъемки начинается с изучения картографических материалов на территорию исследования. При проведении классической аэрофотосъемки используют топографические карты разных масштабов: от 1 : 25 000 до 1 : 100 000. Практически все программные продукты составления полетного задания используют технологии веб-картографии для получения картографических материалов. По протоколам WMS (Web Map Service) и WMTS (Web Map Tile Service) программное обеспечение полетного задания получает цифровые карты, данные дистанционного зондирования Земли и ЦМР.

Следует изучить доступность и формат использования публичных веб-картографических сервисов. Особое внимание следует уделить эргономике интерфейса и набору инструментов планирования полетного задания. Это связано с необходимостью оперативного изменения полетного задания непосредственно во время полета БАС.

Программное обеспечение НСУ Geoscan Planer, поддерживает использование 4-х картографических сервисов [34]:

1) Open Street Map – подробная и бесплатная картографическая подложка. Данный ресурс актуален при выполнении аэрофотосъемочных работ урбанизированной территории. При этом практически отсутствуют данные на пересеченную местность.

2) Landsat – общеземное покрытие космическими снимками съемочной системы Landsat 5, 7 с пространственным разрешением 30 м/пиксель. Данное покрытие позволяет грубо оценить физико-географическое описание местности в целом. Актуальность и необходимость данного покрытия вызывает смущение.

3) Bing Maps – картографический сервис, предоставляющий космические снимки на весь земной шар. Пространственное разрешение снимков варьирует в зависимости от территории: от среднего (10–15

м/пиксель) до сверхвысокого (50 см/пиксель).

4) Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) – радарная топографическая съемка большей части суши земного шара. Предоставляет собой ЦМР с пространственным разрешением 3"/пиксель (~90 м/пиксель на экваторе).

Во время создания полетного задания пользователь выбирает один из первых трех картографических сервисов для изучения территории исследования. Информация о рельефе загружается по умолчанию и не требует выбора. При отсутствии картографических материалов на область исследования, следует воспользоваться дополнительными источниками, предварительно изучив вопрос импорта или подключения данных новых сервисов. В частности, подобная проблема актуальна в приполярных широтах.

3.2.1.2 Составление полетного задания

Составление полетного задания заключается в выделении области аэрофотосъемки и создании маршрута посадки. Выделив область аэрофотосъемки многоугольником, программа НСУ автоматически рассчитывает аэрофотосъемочные маршруты на основании ряда параметров:

1) Перекрытие снимков. Минимальное продольное и поперечное перекрытие составляет 60% и 30%, соответственно [21]. Эти параметры можно выдержать при углах наклона не более 3°. Однако, учитывая незначительную массу БАС и сложности выдерживания угловых параметров, во избежание появления «фотограмметрических дыр» следует устанавливать избыточное перекрытие не менее 70% и 50%.

2) Выбор камеры. На основании характеристик камеры и используемого объектива происходит расчет основных параметров съемки.

3) Параметры съемки. Существует три основных взаимосвязанных параметра съемки – это пространственное разрешение снимков, высота съемки и расстояние между маршрутами. Как правило, чаще всего задают

пространственное разрешение снимков с автоматическим расчетом высоты полета и расстояние между маршрутов. Выбор оптимального пространственного разрешения снимков для геоморфометрического моделирования описан в § 2.3.

На следующем этапе составления полетного задания происходит определение маршрута посадки. Маршрут посадки состоит из трех точек: точка захода на глиссаду, промежуточная точка и точка выброса парашюта. Расстояние между крайними точками составляет 600 м. БАС в точке глиссады снижается до 110 м относительно точки старта и затем с плавным снижением до 70 м движется в точку выброса парашюта. Маршрут посадки ориентируют строго против направления ветра.

При аэрофотосъемке в горной местности необходимо использовать функцию НСУ, позволяющую рассчитать аэрофотосъемочные маршруты с учетом ЦМР SRTM. Эта функция обеспечивает постоянство масштаба аэрофотоснимков. Максимальная эффективность данной функции будет обеспечена при условии ориентирования маршрутов перпендикулярно направлению склона. Также данная функция актуальна при съемке покровных ледников.

3.2.2 Выбор стартовой площадки

В классической аэрофотосъемке после определения границ съемочного участка происходит поиск ближайшего аэродрома и оценка возможности его использования. При использовании БАС эта задача видоизменяется. Как правило, ресурс полета БАС ограничен. Необходимо выбирать площадку старта / посадки в непосредственной близости к границам съемочного участка или внутри его. Для этого оценивают транспортную доступность и наличие открытого пространства (участок без древесной и кустарниковой растительности). Выбор последнего определяется в зависимости от типа используемого беспилотного воздушного судна и его размеров: 1) При использовании мультироторного или вертолетного типа,

площадка должна быть размером 10 x 10 м с луговой растительностью и не значительными уклонами местности (3–5°). Это обусловлено вертикальным взлетом и посадкой. 2) При использовании самолетного типа, площадка должна быть размером от 150 x 150 м до 300 x 300 м. Данные параметры применимы для БАС с массой не более 10 кг и с размахом крыльев до 2,5 м.

Используя различные картографические сервисы в НСУ, по спутниковым снимкам дешифрируют открытые участки местности; на основании ЦМР оценивают уклон.

В большинстве случаев определяющим критерием выбора места старта является транспортная доступность. Обычно съемка горных ледников характеризуется плохой транспортной доступностью или ее отсутствием. В подобных случаях доминирующим фактором выбора стартовой площадки является рельеф местности. Практически, стартовая площадка является базовым лагерем. Поэтому следует рассматривать дополнительный критерий: наличие источника пресной воды.

При аэрофотосъемке покровных ледников (напр., Антарктиды), решающее значение при выборе точки старта имеет наличие дороги на леднике. Прибрежное покровное оледенение Антарктиды характеризуется наличием значительного количества ледниковых трещин, что связано с движением ледника. Особую опасность представляют трещины, накрытые «снежным мостом», которые практически невозможно отличить от эоловых форм микрорельефа ледника. Поэтому по правилам техники безопасности запрещено удаляться от оси дороги.

Решение по выбору стартовой площадки принимается только после рекогносцировки на местности. Необходимо проанализировать дополнительный критерий – направление преобладающих ветров и их скорость в совокупности с орографической составляющей. Взлет и посадка БАС самолетного типа выполняется строго против ветра, либо с небольшим углом к направлению ветра (не более 30°). Также существуют ограничения по полету с максимально возможной скоростью ветра. Эта информация

прописана в тактико-технических характеристиках БАС. К примеру, БАС вертолетного типа и мультироторного не рекомендуется использовать при скорости ветра более 10 м/с, а БАС самолетного типа – при скорости ветра более 15 м/с. Фактически, в первом случае этот показатель завышен. Проблемы начинаются при скорости ветра 7–8 м/с. Во втором случае показатель наоборот занижен. Полеты выполнялись при скорости ветра до 20 м/с.

3.2.3 Конструктивные особенности БАС

Тип БАС «летающее крыло» не имеет явно выраженного фюзеляжа и образует вместе с крыльями единую плоскость. Преимущество подобной аэродинамической схемы заключается в возможности создавать подъемную силу сразу всей площадью воздушного судна. Следовательно, взлет должен осуществляться строго против ветра. При взлете по ветру появляется обратный эффект – действие силы ветра сверху на систему больше действия подъемной силы. При взлете с перпендикулярным направлением ветра, появляется аварийная ситуация – опрокидывание.

Для создания первоначального ускорения, при взлете БАС Геоскан 101 и Геоскан 201 используется резиновая катапульта. Конструкция катапульти достаточно примитивна и проста в использовании. Выполнение аэрофотосъемочных работ на высокогорных ледниках (выше 3000 м над ур. м.) или в Антарктиде, при отрицательной температуре воздуха сопровождается проблемами с применением резиновой катапульти. Это связано с эластичными свойствами резины. При отрицательной температуре резина замерзает и теряет эластичность.

Для решения подобной проблемы можно воспользоваться двумя методами. Первый, заключается в быстрой и слаженной работе во время старта БАС. До старта резина удерживается в теплом месте и непосредственно перед стартом используется. Опыт подобной работы свидетельствует, что при температуре воздуха -10°C время использования

резины не более 1,5 мин. Невнимательность и ошибки в действиях оператора БАС приводят к аварийным ситуациям. Второй, заключается в смене конструкции катапульты на морозостойкую конструкцию. К примеру, на пружинную катапульту. Однако следует отметить недостатки в использовании подобной конструкции, связанные с увеличением массы конструкции с 8 до 30 кг. Положительные моменты использования пружинной катапульты заключаются в полной независимости от температуры использования. Аналогом пружинной катапульты может выступать пневматическая катапульта, но она имеет ограничения по минимальной температуре для баллона со сжатым воздухом.

Самыми опасными элементами полета являются взлет и посадка. На этих этапах полета конструкция БАС испытывает наибольшие нагрузки. Часто, в гарантии производителя БАС отмечается определенное количество взлетов и посадок, после которых необходимо проходить техническое обслуживание. При эксплуатации техники в экстремальных условиях возникает потребность в мелком ремонте, для которого необходимо значительное количество запасных частей, инструментов и принадлежностей (ЗИП). Обычно состав ЗИП ограничен клеем, скотчем и несколькими отвертками. При выполнении работ в труднодоступной местности следует брать расширенную комплектацию ЗИП (лопасти винтов, фрагменты крыльев, композитные материалы, сервоприводы элеронов, кили, трубка Пито и др.). Комплектность следует подбирать в зависимости с конструкцией планера БАС.

Для работы электродвигателя БАС используют литий-ионные или литий-полимерные аккумуляторы. Они чувствительны к низким температурам. Расчет основных эксплуатационных характеристик аккумуляторов выполнен для температуры +20°C. При использовании во время старта холодного аккумулятора, потери емкости могут достигать 40%, следовательно, происходит значительное уменьшение времени полета [3].

После подключения аккумулятора и до старта БАС проходит

несколько минут. За это время выполняют проверку работоспособности основных систем, загрузку полетного задания. Потребление электроэнергии незначительное. Температура аккумулятора снижается, происходит потеря емкости. После схода БАС с катапульты начинает работать двигатель. Потребление электроэнергии резко возрастает, происходит выделение сопутствующей тепловой энергии и естественный подогрев аккумулятора. Желательно выдерживать температуру аккумулятора перед включением двигателя в диапазоне $+15^{\circ}\text{C} - +20^{\circ}\text{C}$. Этого можно достичь несколькими методами:

1) Использовать на этапе предварительной подготовке к полету дополнительный аккумулятор, который прямо перед стартом заменяется. Требуется изменение конструкции силового кабеля БАС для поддержки горячей замены аккумулятора.

2) Выполнять подогрев аккумулятора, на этапе предварительной подготовки к полету, используя: электрогрелку, химическую грелку или водяную грелку.

3) Предусмотреть в конструкции аккумулятора элементы нагрева, которые могут использовать собственный заряд для обогрева.

При значительных отрицательных температурах ($< -15^{\circ}\text{C}$), во время выполнения аэрофотосъемочных работ, предъявляются дополнительные требования к камерам потребительского уровня. Это связано с тем, что механические конструктивные элементы камеры могут «примерзнуть» друг к другу. В результате камера перестает работать.

Для решения подобной проблемы предлагается реализовать внешний или внутренний подогрев конструктивных элементов. Наименее энергозатратный подогрев реализуется при модернизации камеры в ходе, которой встраивается нить накаливания.

3.2.4 Принципы работы запрограммированных команд, автопилот БАС

Автопилот любого БАС имеет набор запрограммированных режимов работы, которые в ходе штатного полета сменяют друг друга. В случае возникновения аварийных ситуаций могут быть задействованы аварийные режимы работы, предотвращающие крушение БАС. Автопилот БАС Геоскан включает следующие режимы работы: взлет, набор, автоматический, снижение, посадка, ручное управление.

После схода с катапульты автопилот БАС включает двигатель и переходит в режим работы «взлет». В этом режиме система летит по прямой, элероны находятся в крайнем нижнем положении, электродвигатель работает на максимальных оборотах. При достижении высоты полета 100 м над точкой старта, происходит переход в режим работы автопилота «набор высоты». В этом режиме БАС осуществляет движение по вертикальной спирали. Во время набора высоты электродвигатель работает на 70–80% от максимальной мощности, происходит значительное потребление заряда аккумулятора.

Съемка горных ледников сопровождается набором высоты в 1–2 км, соответственно режим набора высоты становится энергетически не эффективным. Кроме того, при работе в таком режиме более 3-х минут повышается возможность перегрева и дальнейшего перегорания обмотки электродвигателя, что приведет к аварийной ситуации. Следует снизить нагрузку на электродвигатель при наборе высоты. Это возможно за счет поэтапного набора высоты. Необходимо чередовать этапы набора высоты и этапы пролета по прямой. Движение БАС по прямой снижает нагрузку на электродвигатель до 20–40% от максимальной мощности. Данное решение накладывает дополнительные требования на этап планирования и составления полетного задания [3].

Достигнув высоты первого маршрута, происходит смена режима полета автопилота с набора высоты на «автоматический», при этом БАС начинает

выполнять полеты по аэрофотосъемочным маршрутам. Движение к первому маршруту происходит по принципу наикротчайшего расстояния.

При съемке горных ледников дополнительно выполняют анализ ЦМР SRTM на предмет препятствий между последней точкой набора высоты и первой точкой аэрофотосъемочного маршрута. Как правило, при планировании полетного задания, стараются эти две точки расположить в непосредственной близости друг к другу.

Заход на маршрут всегда сопровождается разворотом. НСУ не всегда учитывает радиус разворота. Необходимо выполнять дополнительный анализ ЦМР SRTM на пересечение с предполагаемым маршрутом полета. Радиус разворота зависит от технических характеристик БАС – размах крыла, масса системы, допустимые углы крена. В будущем анализ ЦМР SRTM можно автоматизировать в НСУ, за счет функции проверки полетного задания с учетом радиусов разворота на возможность пересечения маршрута полета с рельефом.

Следует отметить, что при разворотах у аэродинамической схемы «летающее крыло» существует незначительный недостаток. Разворот осуществляется за счет появления крена, который контролируется автопилотом, с одновременным снижением скорости полета. Следствием подобных действий является образование «просадки» воздушного судна. Под «просадкой» подразумевается отрицательное изменение заданной высоты полета. Значения изменения высоты варьируют не значительно и не превышают 10–20 м. Данный факт свидетельствует о необходимости дополнительного анализа ЦМР SRTM. При одновременном образовании «просадки» и появлении воздушных потоков вертикальной направленности (нисходящих) создается предаварийная ситуация.

Воздушные потоки вертикальной направленности (нисходящие/восходящие) образуются, преимущественно, на границах двух сред (лед–земля, земля–вода, вода–лед) и связаны с разной скоростью нагрева подстилающей поверхности. Подобного рода воздушные потоки

поднимают или опускают легкие БАС до 100 м за несколько секунд.

При планировании полетного задания следует учитывать положения маршрутов съемки относительно указанных границ (по материалам дистанционного зондирования). Появление воздушных потоков вертикальной направленности во время полета, требует оперативного вмешательства внешнего пилота. Автопилот воздушного судна будет стараться самостоятельно решить проблему за счет смены запрограммированных режимов полета. Это ни к чему не приведет, но предоставит некоторое время для принятия решения внешнему пилоту. Единственным решением является изменение траектории полета, которое возможно выполнить тремя способами:

1) Изменить полетное задание и отправить его по телеметрическому каналу связи. На изменение полетного задания потребуется от 5 до 10 мин, которых может не быть.

2) Изменить направление полета. Полетное задание состоит из последовательных точек с координатами, изменяя последовательность точек (задать точку следования) происходит смена направления полета. Недостаток заключается в необходимости оперативного анализа высоты точек полетного задания, так как точка следования должна иметь высоту ниже предыдущей точки. В противном случае автопилот перейдет в режим набора высоты и не сможет выйти из зоны вертикальных воздушных потоков.

3) Смена режима полета на ручное управление, самый оперативный способ решения возникшей проблемы.

Полет БАС в режиме «автоматический» осуществляется с учетом ряда параметров, а именно: крейсерская скорость, высота, направление (курс). Выявлено, что при абсолютной высоте полета БАС выше 2500 м над ур. м. наблюдается плавное снижение высоты полета при движении по маршруту. Это связано с разреженностью воздуха. Необходимо увеличить крейсерскую скорость в зависимости от массы БАС от 1 до 3 м/с или от 3,5 до 10 км/ч, соответственно. При высоте полета выше 4000 м над ур. м. потребуется

дополнительно увеличить крейсерскую скорость.

После окончания последнего аэрофотосъемочного маршрута БАС движется в сторону маршрута посадки. Достигнув координат первой точки маршрута посадки (точка снижения), автопилот переходит в режим «снижение». Во время снижения двигатель БАС полностью отключается или работает на минимальных оборотах. Снижение осуществляется за счет планирования по спирали и действия силы тяжести. Обычно автопилот старается контролировать вертикальную скорость снижения в пределах 5 м/с, манипулируя углом крена БАС. Нередко, при снижении с большой высоты (более 500 м над точкой старта), вертикальная скорость может увеличиваться до 7–8 м/с, за счет появления естественного разгона. Такая ситуация может привести к появлению «просадки» в конце снижения до 50 м и аварийному выпуску парашюта. Это связано с запоздалой реакцией автопилота на высокую скорость снижения и необходимость стабилизировать высоту в конце снижения. Необходимо, подобно маршруту набора высоты, разделить этап снижения на участки с чередованием снижения и пролета по прямой. Критерием такого чередования служит изменение высоты полета на 300–500 м, подобранное эмпирически. Другой вариант решения проблемы заключается в использовании функции плавного снижения (по-самолетному). Движение БАС осуществляется по прямой, спуск осуществляется за счет снижения крейсерской скорости полета и действия силы тяжести. Следует учитывать, что требуется значительное удаление между последним маршрутом полета и первой точкой маршрута посадки (напр., при снижении с высоты 1 км расстояние до БАС должно быть не менее 3,5 км). В горной местности дополнительно необходимо анализировать маршрут плавного снижения на предмет пересечения с рельефом.

Аэрофотосъемка горных ледников часто сопровождается попаданием БАС в вертикальные воздушные потоки, особенно опасно это при снижении. Следует уделить особое внимание местам снижения. Попадание БАС в нисходящий воздушный поток на этапе снижения приводит к увеличению

вертикальной скорости до 12–15 м/с за 2–3 секунды. Такие скорости снижения опасны для конструкции БАС. Оператор системы не успевает среагировать на ситуацию. Дальнейший рост вертикальной скорости и выпуск парашюта приводит к критическим перегрузкам в конструкции системы. Возможным решением служит автоматизация потенциальной аварийной ситуации, при которой автопилот принимает решение о выпуске парашюта. Критерием может стать достижение определенного значения вертикальной скорости. Более благоприятная ситуация возникает при восходящих потоках воздуха, на этапе снижения. С колебанием высоты полета (вверх – вниз) около 30–40 м, система находится на одном эшелоне до 20 мин. В этой ситуации только изменение самого воздушного потока позволяет выполнить дальнейшее снижение и посадку.

Выше упоминалось, что взлет и посадку необходимо выполнять строго против ветра. В горной местности, учитывая ограниченное пространство, посадку могут выполнять по ветру. При каждой второй посадке это приводит к легким повреждениям корпуса БАС. Заранее нужно учитывать наличие большого количества запасных деталей и компонентов.

3.2.5 Погодные условия

Особенности аэрофотосъемочных работ, связанные с погодными условиями, также имеют тесное взаимодействие с другими факторами: конструктивные особенности и автопилот БАС. Ранее упоминалось о влиянии отрицательной температуры на конструкцию катапульты и аккумулятора, негативное влияние воздушных потоков вертикальной направленности на режимы работы автопилота.

Аэрофотосъемка обычно выполняется в ясную солнечную погоду или при наличии незначительной, высокой облачности [21]. Развитие беспилотных технологий позволяет выполнять аэрофотосъемочные работы в совершенно других погодных условиях, при средней и даже низкой сплошной облачности. При этом полет выполняется прямо под нижней

кромкой облаков. Рассеянное освещение уменьшает контрастность подстилающей поверхности. Но, так как на горных ледниках достаточно много осыпного материала с ближайших скал, на снимках присутствует своеобразная текстура, позволяющая выполнить фотограмметрическую обработку материалов съемки даже при рассеянном освещении и значительном альбедо подстилающей поверхности.

Противоположная ситуация с требованиями к облачности в условиях сплошного покровного оледенения (напр., Антарктиды). Поверхность оледенения имеет эоловые микроформы рельефа. В солнечную погоду эти микроформы рельефа хорошо видны на аэрофотоснимках, благодаря чему предоставляется возможность выполнить камеральную фотограмметрическую обработку результатов съемки. При сплошной облачности и рассеянном освещении микроформы дневной поверхности ледника не различимы, в результате невозможно выполнить камеральную обработку снимков. Аэрофотосъемку на покровных ледниках следует выполнять только в ясную солнечную погоду или переменную облачность.

Низкая температура в совокупности с влажностью воздуха приводит к образованию наледи на корпусе БАС. Наледь образуется при переходе температуры воздуха через 0°C и влажности более 60% или при полете под нижней кромкой облаков, когда БАС летит в облаках. С обледенением сталкиваются в горной местности при высотах полета выше 3000 м над ур. м., в теплое время года. В Антарктиде, из-за низкой влажности (менее 40%), подобного не происходит.

Нарост льда образуется на корпусе БАС в нескольких местах: передняя край крыльев, передняя часть фюзеляжа, лопасти винта и на трубке Пито. Последний элемент отвечает за определение воздушной скорости движения и барометрической высоты полета. Равномерное образование наледи приводит к увеличению массы воздушного судна. В результате в НСУ наблюдается плавное снижение высоты полета и появление отрицательной вертикальной скорости в диапазоне 0–1 м/с. Также образование наледи

может происходить не равномерно, на одном из крыльев льда становится больше. В НСУ можно заметить частые изменения крена воздушного судна в разные стороны (болтанку). Команды набора высоты или увеличения крейсерской скорости полета не дают результат. Необходимо незамедлительно отправить БАС на посадку.

Процесс обледенения происходит с течением времени. Действия этого процесса можно замедлить, но не прервать. С этой целью проводят противообледенительную обработку основных конструкций БАС. Следует учитывать, что вещество противообледенительной обработки не должно разъедать материалы, из которых сделана конструкция планера БАС.

3.2.6 Планово-высотная подготовка аэрофотосъемки

Классически планово-высотная подготовка (ПВП) аэрофотосъемочных работ выполняется для определения координат опорных и контрольных точек. При использовании координат центров проекций снимков в качестве опорной информации данная работа видоизменяется и делится на 2 основных этапа. Первый относится к сопровождению аэрофотосъемки и, по сути, описывает технологию определения координат полетных базовых станций и высокоточное определение координат центров проекции снимков [17, 97, 131, 194]. Второй этап связан с определением координат контрольных точек для оценки точности получаемых данных.

При ПВП на ледниках существуют особенности, связанные с непрерывным движением ледников. Скорость движения может значительно варьировать. Для сравнения, на горных ледниках среднесуточная скорость движения льда составляет 1–2 см [3]. В Антарктиде среднесуточная скорость движения разных участков одного ледника колеблется от 1 до 27 см [63]. Высокие скорости движения ледника требуют параллельности проведения аэрофотосъемочных и геодезических работ в короткий промежуток времени. Поэтому необходимо знать заранее средние скорости движения ледников и учитывать их при планировании полевых работ.

Обычно продолжительность определения координат точек ПВП составляет от нескольких дней до недели. На горных ледниках для маркировки выбирают неподвижные объекты, расположенные вне ледника (характерные камни на боковой морене и/или выступы скал). Покровное оледенение требует создания специальных конструкций маркировки точек ПВП, которые не подвержены воздействию ветра и температуры (напр., прессованных бочек). В обоих случаях на скорость работ влияет труднодоступность территории и ограничение перемещения по леднику по правилам техники безопасности.

Значительные скорости движения требуют особенной организации полевых работ (аэрофотосъемочных и геодезических). Так, при геодезических работах целесообразно задействовать большее количество людей, а при аэрофотосъемке применить несколько БАС, т.е. использовать групповое применение. Однако существуют финансовые сложности подобных решений. Особенно актуально в этой ситуации использовать центры проекций снимков в качестве опорной информации (§ 1.4), который позволяет сократить объем полевых геодезических работ. Использование центров проекций снимков рассматривается в нескольких работах [71, 105, 122, 160, 193, 194].

Остаются вопросы независимого контроля точности результатов съемки. В качестве потенциального решения (определение относительной точности) можно использовать и специальный проверочный полет БАС, который проводится повторно над какой-либо областью исследований. По результатам проверочного полета определяются точки фотограмметрического сгущения, которым можно оценить точность фотограмметрического сгущения первого полета.

Также возможно, для оценки точности результатов съемки использовать точность фототриангуляции. Более детально этот вопрос рассмотрен в § 1.3.3, и, независимо, в исследовании С.А. Кадничанского и соавт. [131].

Выводы по главе 3

1) Современное развитие аппаратно-программного функционала БАС и потребности существующей производственной практики создают предпосылки для создания профессиональных компетенций по управлению БАС в области геодезии, аэрофотосъемки и картографии.

2) Разработана методика беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников. Даны рекомендации по улучшению технических и методических аспектов беспилотной аэрофотосъемки. В основу методики включен анализ погодных условий, технических характеристик БАС, конструктивных особенностей БАС, режимов работы автопилота, выбора стартовой площадки, функционала наземной станции управления полетом, учета движения ледника.

3) Выявленные по результатам экспедиционных исследований особенности проведения аэрофотосъемочных работ, использовалась ООО «Геоскан» для модернизации и совершенствования серийно производимых БАС Геоскан 101 и Геоскан 201, а также программного обеспечения наземной станции управления полетом Geoscan Planer.

4) Разработанную методику можно использовать в курсах повышения квалификации по направлению подготовки оператора беспилотного воздушного судна для целей аэрофотосъемки.

5) Обособлено стоит вопрос валидации результатов. Обзор рекомендаций к основным особенностям проведения съемки составлен на основании использования коммерческих продуктов одной компании. Потенциально возможна ситуация, при которой описанные особенности проведения аэрофотосъемочных работ имеют различные подходы и решения у разных производителей БАС.

ГЛАВА 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГОРНЫХ ЛЕДНИКОВ ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

В главе изложен разработанный геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик горных ледников, а также полевые и камеральные исследования, связанные с его разработкой и апробацией. В § 4.1 описывается район проведения экспедиционных исследований: горный массив Табын-Богдо-Ола (Монголия). § 4.2 посвящен разновременной беспилотной аэрофотосъемке, планово-высотному сопровождению съемки и основным результатам полевых работ. Геоморфометрический способ расчета динамических гляциологических характеристик описан в § 4.3. Подробности апробации разработанного способа приведены в § 4.4.

4.1 Горный массив Табын-Богдо-Ола (Западная Монголия)

Наблюдения горных ледников Монгольского Алтая необходимо для выявления изменения климата в этом регионе. Здесь насчитывается около 1000 ледников. За последние пару десятилетий они претерпели значительные изменения в размерах (длина и площадь), которые являются показателями динамики ледников. Изучение динамики ледников является важной задачей, поскольку она служит источником пресной воды для местного населения [25, 36, 40].

Ледники Потанина и Александры располагаются на горном массиве Табын-Богдо-Ола, являющемся частью Монгольского Алтая. Хребет Монгольский Алтай находится в пределах северо-западной части Монголии, у границ трех государств (Россия, Китая и Монголия). Средняя высота хребта Монгольский Алтай 3500 – 3800 м, а его наивысшая точка – гора Хуйтен – 4374 м (рис. 4.1).

Исследования ледников начались с конца XVIII – начала XIX в., когда

основным методом их изучения было проведение экспедиций, сложнейших пеших маршрутов. В исследованиях на территории Монгольского Алтая наибольших успехов добился В.В. Сапожников, проводивший экспедиции в начале XX в., и два его главных последователя – М.В. и Б.В. Троновы. Обнаруженные и описанные ими ледники в пределах горного массива Табын-Богдо-Ола – предмет пристального изучения и в настоящее время [36, 40, 134]. Причин этому несколько, но одна из важнейших – тесная взаимосвязь состояния ледников с атмосферой, окружающей средой и климатом [155].

На территории горного массива Табын-Богдо-Ола (рис. 4.1) существует несколько ледников, два из которых – ледники Потанина и Александры – детально изучают уже порядка 10 лет [40, 132, 134]. Изменения размеров и показателя баланса масс этих ледников – прямое следствие изменение климата и надежный его индикатор [25]. Исследование по определению баланса масс этих ледников ранее проводили классическим методом с использованием гляциологических реек [134]. Однако такой метод опасен для исследователей и требует больших временных затрат.

Применение данных дистанционного зондирования, в частности беспилотной аэрофотосъемки, позволяет по новому взглянуть на гляциологические процессы, а также оценить динамику ледников.

4.2 Аэрофотосъемка и геодезическое сопровождение

Экспедиция 2015 года состояла из двух этапов: начало (июнь) и конец (август) сезона абляции. В результате получено два набора пространственных данных (ортофотоплан и ЦМР), которые легли в основу расчета динамических характеристик.

4.2.1 Аэрофотосъемочные работы

Для аэрофотосъемки использовался БАС Геоскан 101 Геодезия (рис. 4.2). Детальное описание БАС представлено в § 2.2.1. В качестве полезной нагрузки использовалась цифровая камера Sony NEX-5N и приемник ГНСС

геодезического класса. Аэрофотосъемка выполнялась с использованием в качестве опорной информации центров проекций (§ 2.2.3).

Район исследования находится в труднодоступной, сильно пересеченной горной местности. Продолжительность экспедиционных исследований была ограничена по времени. Использование контрольных и опорных точек не предполагалось. Для определения элементов внешнего ориентирования и существенного уменьшения полевых работ применяли центры проекций снимков, в качестве опорной информации. КЦП определялись относительно базового репера, положение которого было закреплено на местности.

В первый этап экспедиции (июнь 2015 г.) выполнено 19 полетов общей площадью 40,3 км², во второй этап (август 2015 г.) – 17 полетов общей площадью 48,1 км² (рис. 4.1). Площадь аэрофотосъемки варьировала от 73% до 81% общей площади ледников Потанина и Александры (табл. 4.1). По результатам аэрофотосъемки получено более 10500 снимков. В табл. 4.1 предоставлена общая информация об аэрофотосъемке. В ходе выполнения аэрофотосъемочных работ выявлен ряд особенностей использования БАС в условиях высокогорья. Детально этот вопрос рассматривается в § 3.2.

4.2.2 Геодезическое сопровождение аэрофотосъемки

Неотъемлемой частью аэрофотосъемочных работ является геодезическое сопровождение. Территория исследования находится в нивально-гляциальной зоне и подвержена влиянию процессов, происходящих на ледниках.

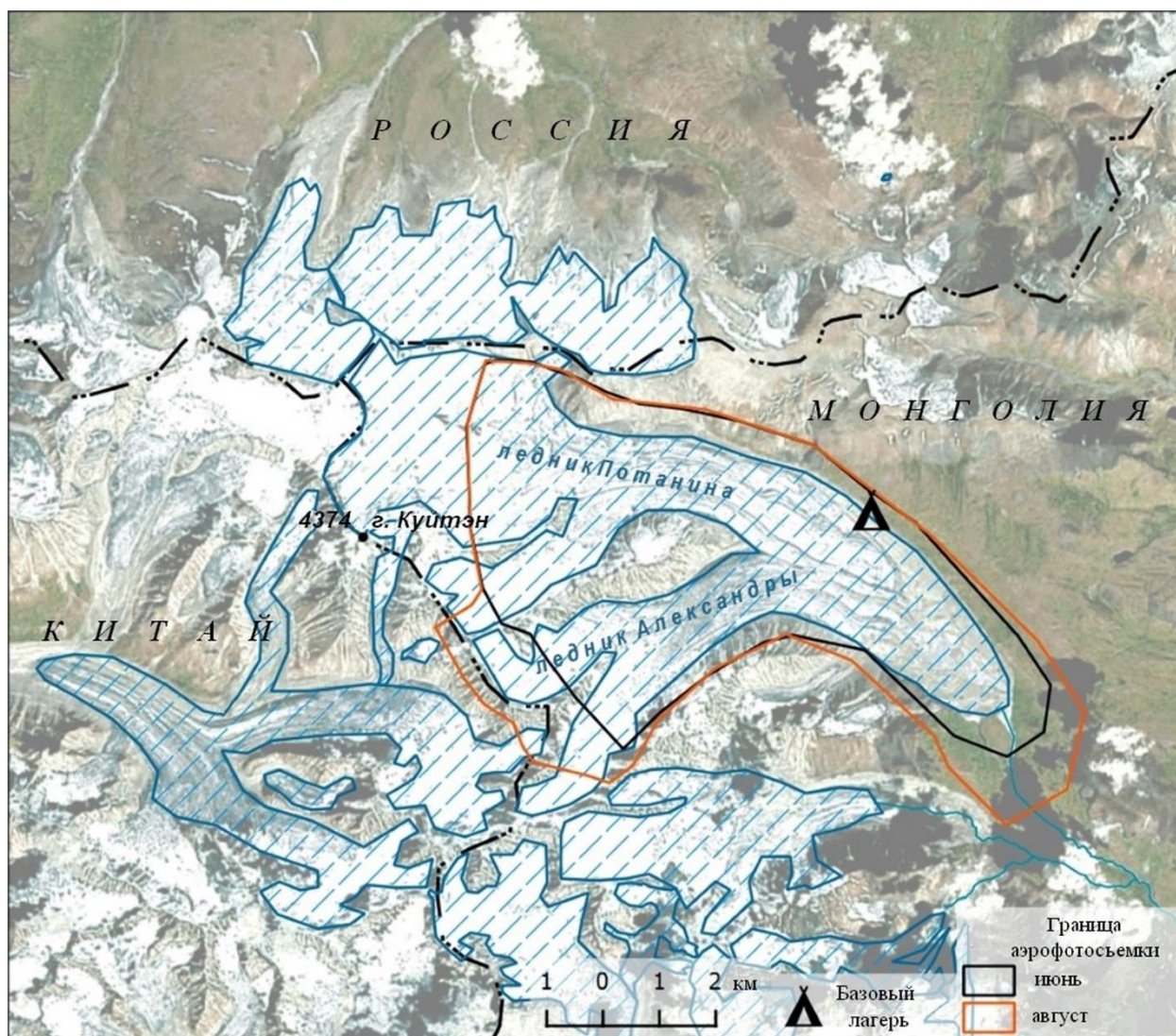


Рисунок 4.1 – Обзорная схема области исследования



Рисунок 4.2 – Взлет и посадка БАС

Возникла необходимость выполнять геодезическое сопровождение с учетом контроля возможных смещений. В районе полевого лагеря был заложен базовый репер (Рп. База) и на незначительном удалении были заложены два дополнительных репера (Рп. 1 и Рп. 2). Вместе пункты образуют примерно равносторонний треугольник с длиной стороны около 500 м. Закладка осуществлялась путем вбивания в землю полутораметровой стальной арматуры диаметром 2 см.

Предполагалось проводить наблюдения в замкнутом треугольнике попарно, в режиме статика, время синхронного наблюдения не менее 1 ч. На первом этапе экспедиции был выполнен первый сеанс наблюдений. На втором этапе измерения повторялись дважды и составили второй и третий сеанс наблюдений. Первый сеанс наблюдений выполнялся не в замкнутом контуре. Второй и третий сеанс выполнялся, как планировалось. Положение базового репера контролировалось по изменениям эллипсоидальных расстояний между пунктами, получаемым в результате уравнивания созданной сети. В результате получена таблица расстояний между пунктами за оба этапа экспедиции (табл. 4.2). Измерения выполнялись с помощью приемников ГНСС Trimble R6-2 Internal и Trimble R8 Internal. При аэрофотосъемке, в качестве базовой станции использовали приемник Trimble R8 Internal, так как он поддерживает интервал записи с частотой 10 Гц, что соответствует требованиям проведения аэрофотосъемки.

На базовом репере выполнены отдельные 12-часовые статические наблюдения с целью расчета его местоположения относительно станций сети ITRS (International Terrestrial Reference System – международная земная система координат) (рис. 4.3) [106, 107, 188]. Аналогичные наблюдения выполнены повторно во второй части экспедиции.

4.2.3 Камеральная обработка материалов съемки

Камеральная обработка спутниковых наблюдений выполнялась с использованием нескольких программных пакетов.

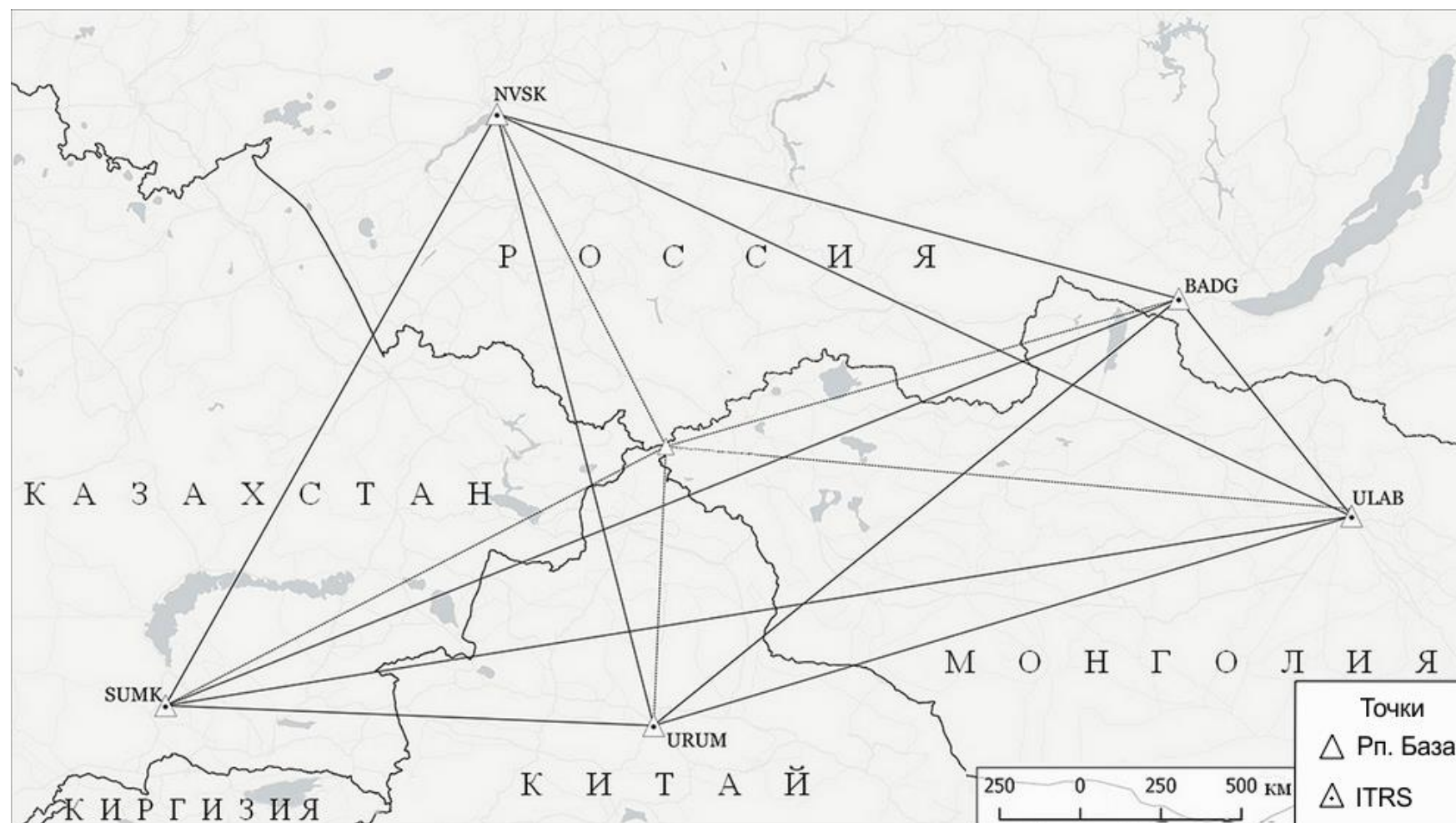


Рисунок 4.3 – Схема расположения станций ITRS

Таблица 4.1 – Общие сведения по аэрофотосъемке

Параметры	Первый этап – июнь 2015	Второй этап – август 2015
Количество полетов	19	17
Перекрытие снимков, %	70/50	70/50
Скорость полета, м/с	26	26
Относительная высота полета, м	300–600	300–600
Площадь съемки, км ²	40,3	48,1
Площадь относительно площади ледника, %	73	81
Разрешение ортофотоплана, см/пиксель	14	14
Разрешение ЦМП, см/пиксель	27	27

Таблица 4.2 – Координаты и рассчитанные эллипсоидальные расстояния

Координаты	Первый этап – июнь 2015	Второй этап –август 2015		Смещение между июнем и августом 2015	
Рп. База, координата X	568760,454	568760,462		0,008	
Рп. База, координата Y	5444542,403	5444542,401		–0,002	
Рп. База, высота Н	3045,222	3045,205		–0,017	
Эллипсоидальные расстояния	1 сеанс	2 сеанс	3 сеанс	2–1	3–1
Рп. База – Рп. 1	457,106	457,115	457,105	0,009	–0,001
Рп. База – Рп. 2	442,744	442,737	442,737	–0,007	–0,005
Рп. 1 – Рп. 2	–	522,754	522,739	–	–

Статические измерения обрабатывались в программном обеспечении Trimble Business Center [192], обработка кинематических измерений производилась в Magnet Office Tools [145]. В первую очередь выполняли обработку статических измерений на базовом репере совместно со станциями сети ITRS. Для обработки были выбраны наиболее близко расположенные к базовому реперу станции: NVSK – Новосибирск, ULAB – Улан-Батор, BADG – Бадары, URUM – Урумчи и SUMK – Сумкар (рис. 4.3). Информация по наблюдениям на станциях сети ITRS получены на сайте SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center). С сайта IGS Product Availability (GPS) и NASA CDDIS (GLONASS) были получены точные эфемериды в формате sp3 [69].

Наблюдения на базовом репере выполнялись в июне и августе 2015 г., на оба периода наблюдений определены координаты. Разница координат дает возможность оценить смещения базового репера (табл. 4.2). В целом, смещение в плане не превысило точности определения координат и составило меньше 1 см. Незначительное смещение по высоте было, вероятно, вызвано проседанием грунта за счет таяния снега или антропогенным воздействием на арматуру, так как пункт располагался в туристическом месте.

Анализ эллипсоидальных расстояний показал, что все заложенные репера относительно друг друга расположены стабильно. Эллипсоидальное расстояние между дополнительными реперами расходится на 15 мм во время второго и третьего сеанса наблюдений. Чем обусловлено такое расхождение – неизвестно. Возможно, при увеличении расстояния между реперами, «треугольник» будет более жесткий и удастся избежать незначительного смещения реперов относительно друг друга.

Фотограмметрическую обработку материалов беспилотной аэрофотосъемки выполняли в программном обеспечении Agisoft Photoscan Professional версии 1.2.4 [35]. Порядок обработки подробно описан в § 2.3. В результате обработки получены цифровые ортофотопланы и ЦМР с пространственным разрешением 14 см/пиксель и 27 см/пиксель,

соответственно.

Среднеквадратическая плановая ошибка определения КЦП снимков в июне 2015 г. составила 14 см, а в августе 2015 г. – 28 см. Среднеквадратическая ошибка по высоте составила 11 см и 14 см для июня и августа 2015 г., соответственно. Таким образом, на втором этапе экспедиции среднеквадратическая плановая ошибка определения КЦП снимков была в два раза хуже, чем на первом. Скорее всего, это связано с условиями полетов: сильные ветра, менее устойчивые магнитные поля ионосферы и другие факторы [152]. Из-за этого возникла дополнительная задача по привязке разновременных результатов аэрофотосъемки относительно друг друга.

Технология работ не предполагала использования опорных точек. Привязку проводили по характерным точкам местности, расположенным за пределами ледников: камни на моренах и выступы на скалах. Кроме этого, было выбрано несколько контрольных точек. Привязка выполнена в программном обеспечении ArcMap по 16 точкам, равномерно расположенным по всей отснятой территории (рис. 4.4). Точки, имеющие большие ошибки (выбросы), не использованы при привязке. В качестве метода преобразования использовали полином второго порядка, так как смещения между данными июня и августа имеют нелинейный характер [66]. По тем же точкам выполнена привязка ЦМР.

4.2.4 Оценка точности разности разновременных ЦМР

Оценка точности получаемых ЦМР выполнялась по оценке точности разности двух ЦМР, которая в дальнейшем будет использоваться для расчета динамических гляциологических характеристик. Оценку проводили по полям ошибок КЦП снимков за июнь и август 2015 г. Из Agisoft Photoscan экспортировали текстовый файл, который содержал название снимков, пространственные координаты центров проекции и ошибки определения пространственных координат. Последние поле формировались из разности двух наборов КЦП, первый был получен в ходе обработки спутниковых

наблюдений, второй был получен в ходе фототриангуляции. Учитывая формулу расчета разности высот (4.1), предложена формула расчета ошибки ее определения через частные производные (4.2). Ошибка определения плановых координат была приравнена к нулю, наибольший вклад вносит ошибка определения высоты:

$$H_{\Delta} = (H_{ji} - H_{ai}) \quad (4.1)$$

$$\Delta H_{\Delta} = \sqrt{\Delta H_{ji}^2 + \Delta H_{ai}^2} \quad (4.2)$$

где H_{Δ} – разность высот одного пикселя; H_{ji} – высота поверхности июня 2015 г. в данном пикселе; H_{ai} – высота поверхности августа 2015 г. в данном пикселе; ΔH_{Δ} – ошибка расчета разности высот в данном пикселе; ΔH_{ji} и ΔH_{ai} – ошибки определения высоты поверхности июня и августа 2015 г., соответственно, в данном пикселе.

Для интерполяции при создании непрерывных полей ошибок использован метод обратных взвешенных расстояний (рис 4.5) [54]. Это связано с тем, что на решение фотограмметрической засечки влияет сразу несколько соседних снимков. Было закреплено расстояние в 500 м, что соответствует 6-7 базисам продольного перекрытия и 3 поперечного.

Также было определено минимальное число точек – 9, так как практически на всей области аэрофотосъемки, не считая краев, было достигнуто перекрытие больше, чем в девяти снимков (70/50%). Пространственное разрешение поля ошибок было выбрано 5 м, как наиболее оптимальное со стороны затрат времени на вычисления. Интерполяция выполнялась по абсолютным значениям ошибки определения высоты КЦП.

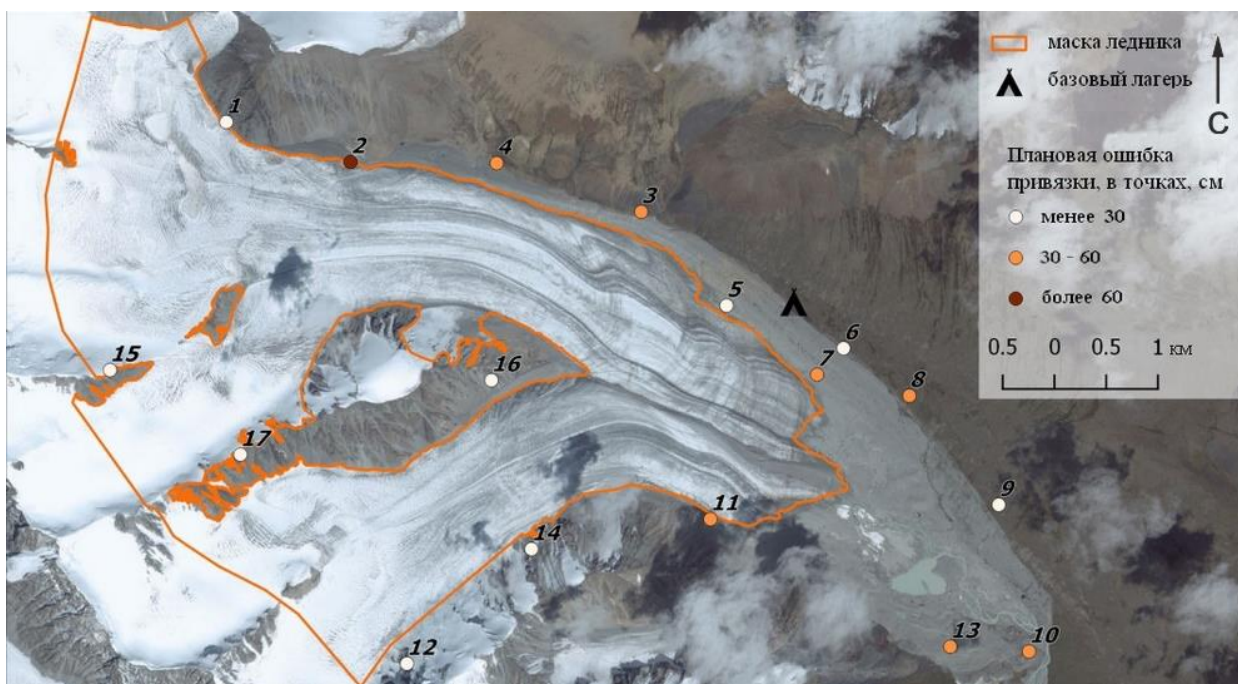


Рисунок 4.4 – Расположение точек привязки и маска проведения расчетов

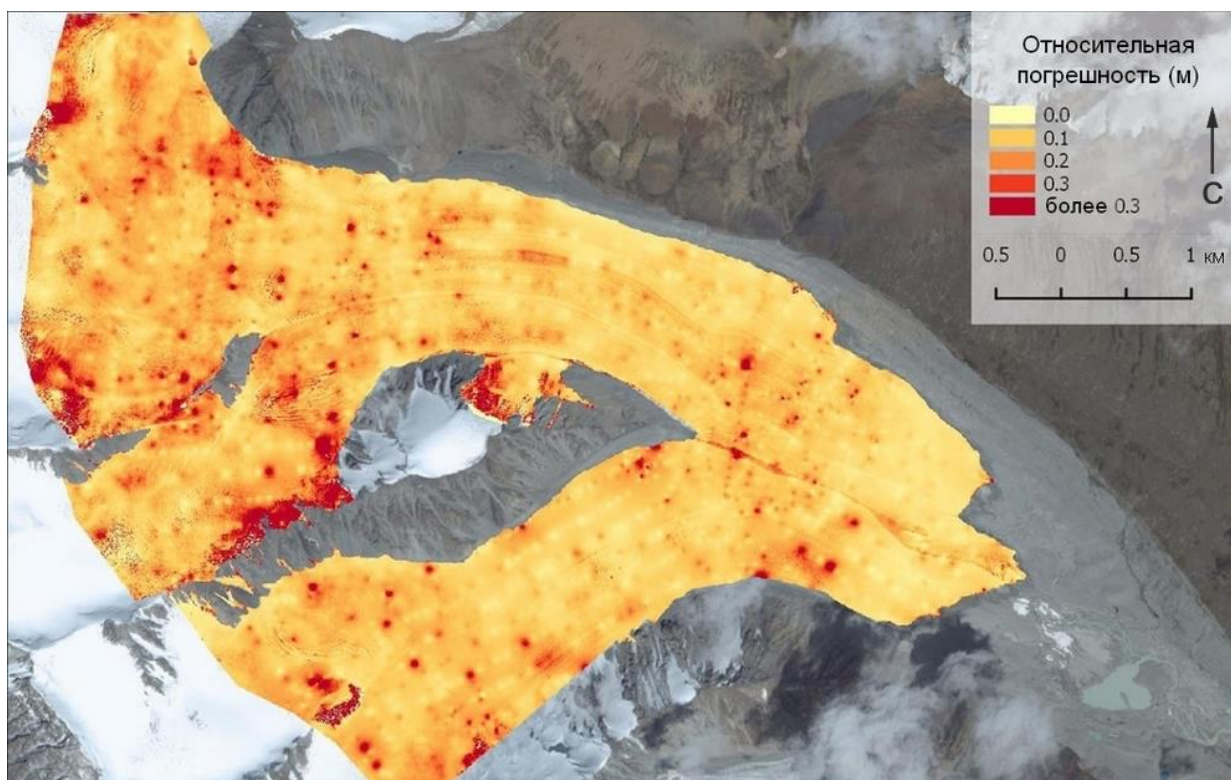


Рисунок 4.5 – Относительная погрешность разности двух ЦМР.

Расчет выполнен по ошибкам определения высоты КЦП

4.3 Геоморфометрический способ расчета динамических гляциологических характеристик

Разработанный геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик основан преимущественно на расчете и анализе модели разности ЦМР. Разработанный способ схематически описан на рис. 4.6.

В качестве исходных данных для расчета моделей (карт) гляциологических характеристик используется набор разновременных ортофотопланов и ЦМР.

Способ состоит из следующих основных этапов:

- 1) Создание маски поверхности ледника по ортофотоплану (рис. 4.4).
- 2) Выделение ЦМР ледников по маске.
- 3) Создание модели разницы ЦМР между периодами съемки (рис. 4.7). Период съемки подбирают в зависимости от режимов питания ледников и возможности проведения экспедиционных исследований.
- 4) Расчет модели среднесуточной вертикальной скорости изменения ледников по модели разнице ЦМР и периоду времени между съемками (рис. 4.8).
- 5) Определение объема расхода массы снега и льда по модели разницы ЦМР и среднему значению плотности льда (характеристика является приблизительной и не учитывает ряда дополнительных параметров, а именно плотности снежного покрова и его мощности).
- 6) Расчет горизонтальной скорости движения ледников методом корреляции разновременных ортофотопланов (рис. 4.9).
- 7) Выполнение анализа отступления языка ледников с созданием модели отступления (рис. 4.10).
- 8) Определение границы питания по модели разницы ЦМР (переход между положительными и отрицательными значениями разности). С целью контроля граница питания дешифрована визуально, по ортофотоплану (рис. 4.11).

Для расчета горизонтальной скорости ледников и отступления языка ледников используются разновременные ортофотопланы.

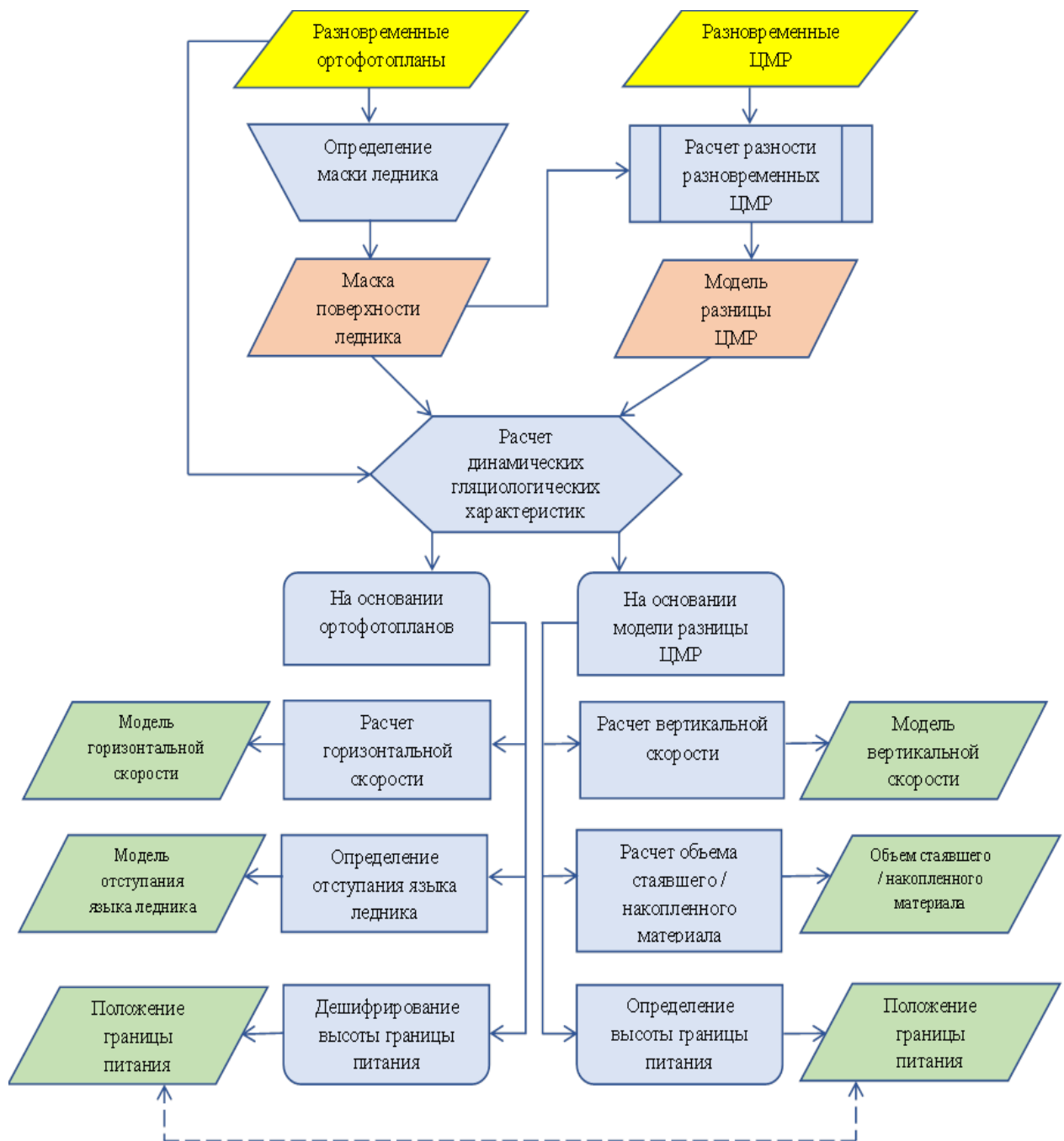


Рисунок 4.6 – Блок-схема геоморфометрического способа определения динамических гляциологических характеристик

4.4 Апробация разработанного способа расчета динамических гляциологических характеристик

4.4.1 Промежуточные материалы

По ортофотоплану визуально дешифрируется область поверхности ледников, которая служит маской для дальнейших расчетов (рис. 4.4). Маска использовалась для исключения вклада морен, склонов и других объектов в расчете объема стаявшего льда и снега. ЦМР были обрезаны по маске ледников. Произведен расчет разности ЦМР (август-июнь 2015 г.), получена модель разности ЦМР (рис. 4.7). Отрицательные значения описывают области таяния ледника, а положительные – области накопления.

На модели разности ЦМР отчетливо видны темные фирновые пятна, оставшиеся с прошлого года в верховье ледника. Обычно фирновые пятна располагаются в теневых местах на следующий сезон абляции. В зонах аккумуляции и переходных зонах они тают быстрее. На леднике Потанина выделяются несколько темных линий (рис. 4.7), которые идут вдоль ледника. Эти линии соответствуют руслам рек поверхностного стока ледника. Также наблюдается тенденция к более активному таянию вдоль боковых морен, примыкающих скал и у языка ледника (нижний край ледника). Это связано с более быстрым нагревом окружающей поверхности.

4.4.2 Горизонтальная и вертикальная скорость

Вертикальная и горизонтальная скорости движения ледника – одни из ключевых гляциологических характеристик.

Вертикальная скорость характеризует движение ледника в вертикальной плоскости, может принимать положительные и отрицательные значения, которые соответствуют зонам аккумуляции (область накопления снега и льда) и абляции (область таяния снега и льда). Для расчета вертикальной скорости используется модель разности ЦМР (рис. 4.8). В качестве дополнительной информации используется период времени между первой и второй аэрофотосъемками, который составил 60 суток. Каждый

пиксель модели разности ЦМР делится на период времени между съемками, в результате получена карта вертикальной среднесуточной скорости ледников (рис. 4.8).

Горизонтальная скорость характеризует движения ледника в горизонтальной плоскости (сползание вниз по долине под действием силы тяжести).

Для расчета горизонтальной скорости движения ледника использован автоматический коррелятор, реализованный в открытом программном обеспечении COSSI-Corr (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation) в качестве дополнительного модуля к ENVI Classic (рис. 4.9) [51]. Методология использования модуля проста, основную сложность составляет эмпирический подбор параметров обработки – максимальный и минимальный размер скользящего окна, шаг скольжения, начальное значение смещения.

Было проведено несколько попыток расчета горизонтальной скорости, на рис. 4.9 представлен наилучший результат. Первоначально использовались параметры из предыдущих аналогичных вычислений [135, 142]. Следует отметить, что на обоих ледниках выделяются две области повышенной горизонтальной скорости, находящиеся после поворота долины ледников (рис. 4.9). Также наблюдается некоторая закономерность в повышенных горизонтальных скоростях движения в районе языка ледника и по краям, у выхода скал.

Точность определения горизонтальной и вертикальной скорости зависит от точности исходных данных, и соответственно варьируется в пределах 20 см (см. § 4.2.3). Так как период наблюдения составил 60 дней, точность определения скоростей составляет 0,003 м/день. Данный результат сопоставим по точности с другим методом определения скорости движения ледника, основанного на фототеодолитной съемки и описанного Ю.Ф. Книжниковым и соавторами [13].

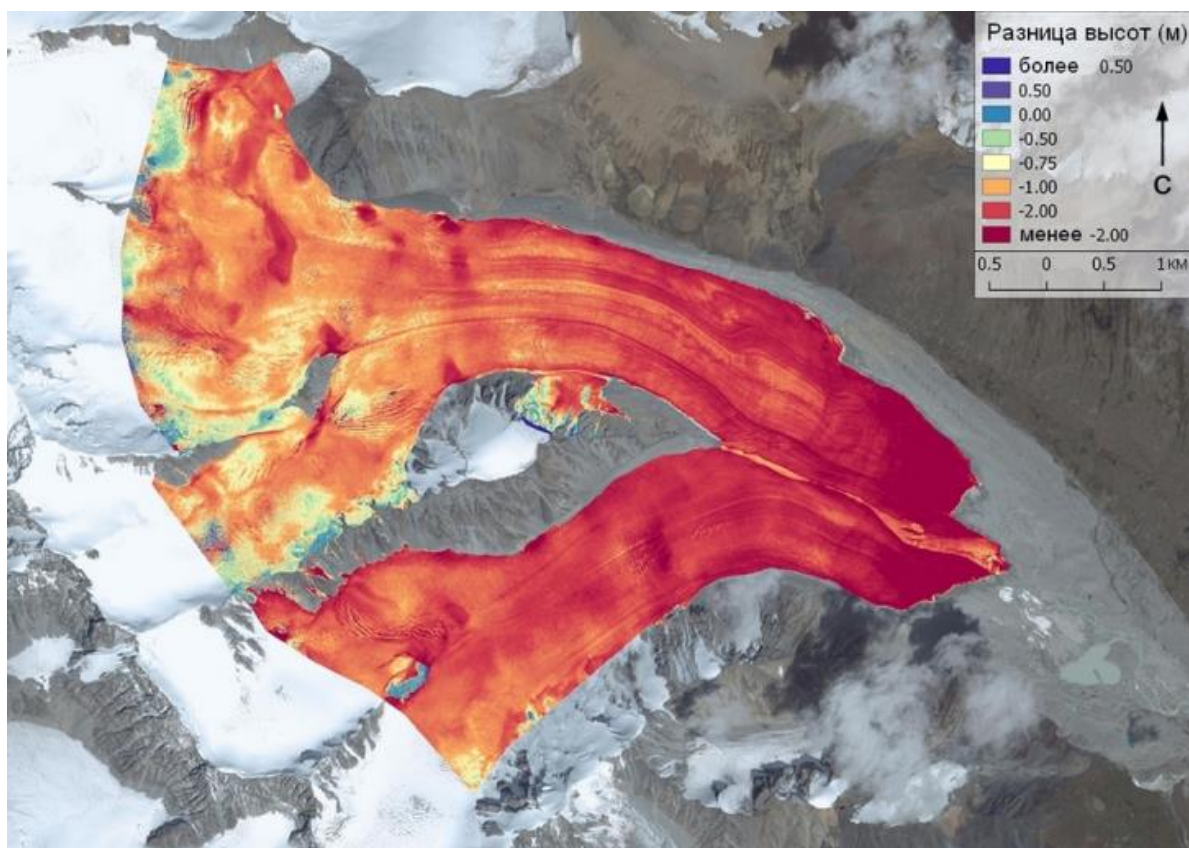


Рисунок 4.7 – Изменение высоты поверхности ледников за сезон абляции

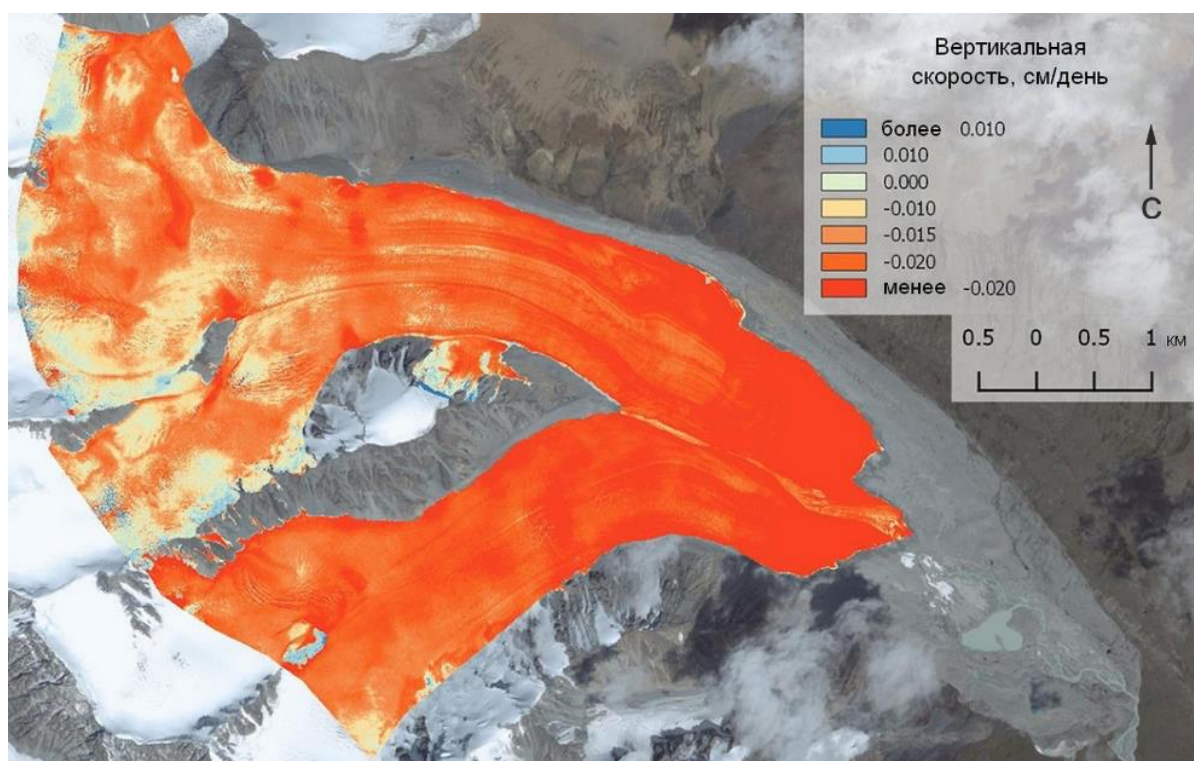


Рисунок 4.8 – Вертикальная скорость движения ледников

4.4.3 Отступление языка ледника

Анализ отступления языка ледника показал, что он движется неравномерно (рис. 4.10). В сезон абляции движение составило в среднем 10–15 м, эти данные соответствуют ранее выполненным наблюдениям [186]. Однако местами отступления не произошло совсем, так как лед на северных склонах и бронированный лед тают медленнее. Расчет отступления языка ледника проводился по ортофотопланам.

На ортофотоплане первого и второго этапа была выделена линия, соответствующая границе языка ледника. Между двумя линиями построили значительное количество перпендикуляров и определили длину каждого перпендикуляра, которая соответствует отступанию языка.

4.4.4 Объем стаявшего / накопленного материала

Расчет объема стаявшего/накопленного материала производился по модели разности ЦМР путем умножения каждого пикселя на его площадь (квадрат пространственного разрешения). На полученном растре объема стаявшего/накопленного материала были выделены маски положительных и отрицательных значений объема. Маски использовались для расчета зональной статистики, в пределах границ положительных и отрицательных значений объема. Сумма всех положительных пикселей объема составила 40 251 600 м³ (стаявший материал). Сумма всех отрицательных пикселей объема составила 231 085 м³ (накопленный материал).

Для оценки точности расчета объема, стаявшего/накопленного материала необходимо добавить в расчеты растр относительной погрешности разности двух ЦМР (рис. 4.5).

По аналогичной методике выполняется расчет объема по ошибкам, используя слой с масками положительных и отрицательных значений объема. Ошибка составила 5 334 383 м³ или 13,25% от общего объема и 30 243 м³ или 13,09% общего объема, для стаявшего и накопленного материала, соответственно. Результат расчетов объема следует записать

следующим образом: объем ставшего материала $40\,251\,564 \pm 5\,334\,383 \text{ м}^3$, объем накопленного материала $231\,085 \pm 30\,243 \text{ м}^3$.

4.4.5 Границы области питания и фирна

Высота границы питания является одним из важнейших показателей, на основании которого проводят прогнозы дальнейшего развития ледников и используют эту характеристику в расчете годового баланса масс. Обычно границу питания определяют на местности визуально и фиксируют ее положение наземными методами (напр., приемниками ГНСС). По ортофотоплану была определена граница питания, высота которой составила 3500–3600 м и 3370–3400 м для ледников Потанина и Александры, соответственно (рис. 4.11). Также граница питания была определена по модели разности ЦМР за июнь и август. Критерием выделения границы питания стали значения разности, равные нулю.

Высота границы фирна была дешифрирована по ортофотоплану по светло-желтым пятнам фирновой зоны и составила 3300–3400 м (рис. 4.11). Также границу фирна можно выделить по модели разницы ЦМР, путем оконтуривания в верховьях ледника участков с наибольшей разницей. Подходы к дешифрированию высоты границы фирна по ортофотоплану и разнице ЦМР дают идентичный результат.

Высоты границы питания, определенные двумя разными методами, имеют незначительные вариации, но, в целом, соответствует друг другу. Основные расхождения связаны с ошибками дешифрирования. Полученные значения высоты границы питания схожи с результатами ранее проведенных исследований на этих ледниках [133, 134].

Характеристики, описывающие динамику ледников, рассчитаны в программном обеспечении ArcMap.

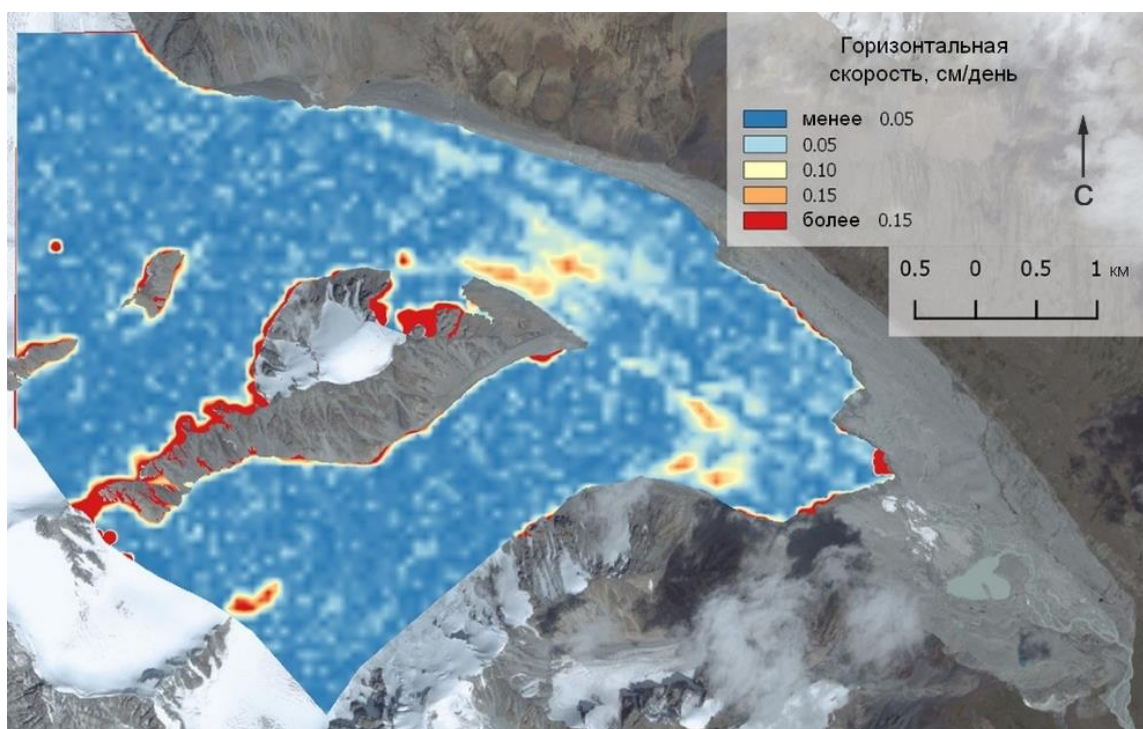


Рисунок 4.9 – Горизонтальная скорость движения поверхности ледника



Рисунок 4.10 – Отступление языка ледника (показано не в масштабе)

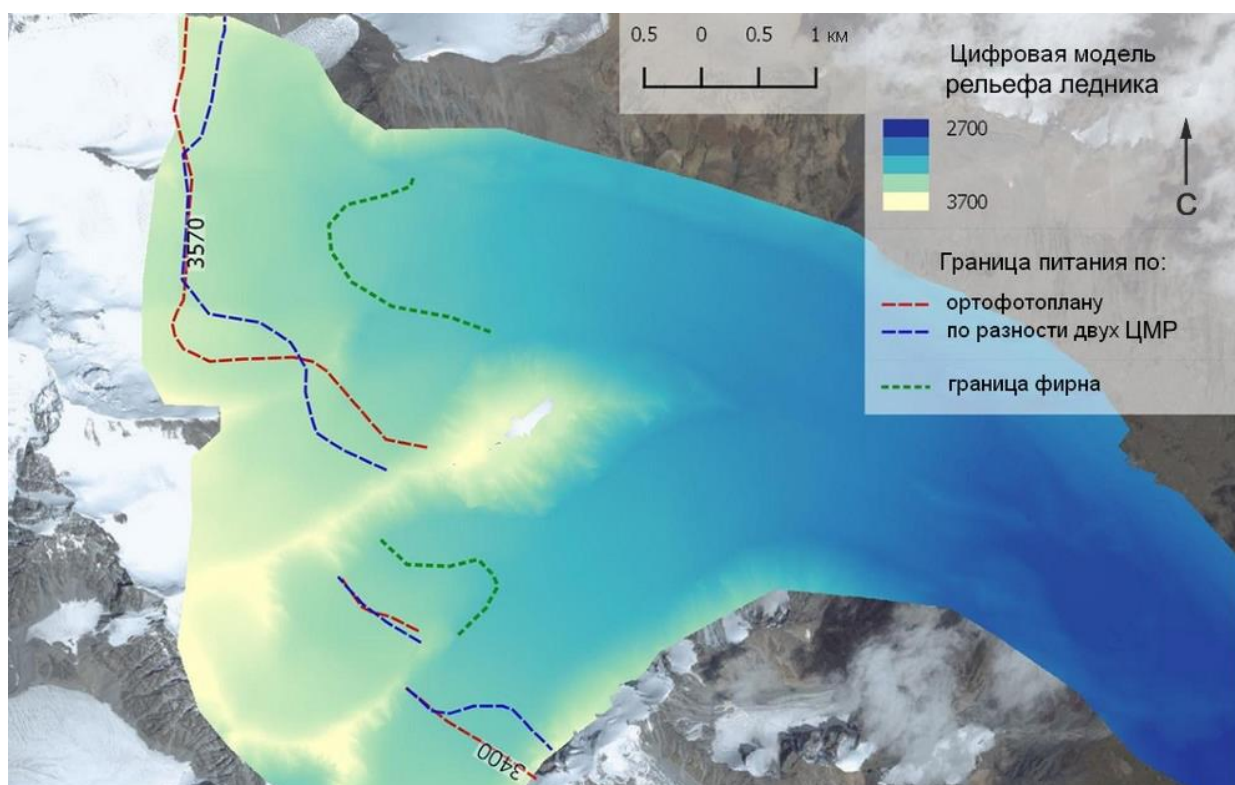


Рисунок 4.11 – Высота границы питания и фирна

Выводы по главе 4

1) Разработан геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик горных ледников. Способ включает следующие основные виды работ: определение маски ледника, расчет модели разности разновременных ЦМР, определение динамических гляциологических характеристик. В результате апробации разработанного способа на ледниках Потанина и Александры (Монголия) были определены следующие основные характеристики этих ледников: объем стаявшего и накопленного снега и льда за сезон активного таяния ледника, с оценкой точности результатов; вертикальная скорость движения ледника; горизонтальная скорость движения ледника; отступление языка ледника; высота границы питания; высота фирновой зоны.

2) Анализ характеристик позволяет выявить закономерности в динамике ледника и наглядно их продемонстрировать. Это хорошо заметно: на карте вертикальной скорости ледников (рис. 4.8), на карте горизонтальной скорости движения ледника (рис. 4.9), на отступление языка ледника (рис. 4.10). Отступление языка ледника и определение высоты границы питания (рис. 4.11) соответствует результатам ранее выполненных исследований.

3) Для верификации определения объема стаявшего снега и льда предложен метод оценки точности расчета объема. В основе метода лежит использование ошибок определения КЦП снимков (точность фототриангуляции по высоте). Представленный метод демонстрирует пригодность используемых материалов и результатов.

4) В ходе экспедиционных исследований выявлены особенности проведения беспилотной аэрофотосъемки горных ледников. Они свидетельствуют о необходимости развивать технические и методические аспекты проведения беспилотных аэрофотосъемочных работ. Это позволит выполнять съемку всей площади ледника, в том числе наиболее труднодоступной части – зоны аккумуляции.

ГЛАВА 5

ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ СПОСОБ ВЫЯВЛЕНИЯ СКРЫТЫХ ЛЕДНИКОВЫХ ТРЕЩИН

В главе изложен разработанный геоморфометрический способ выявления скрытых ледниковых трещин, а также описаны полевые и камеральные исследования, связанные с его разработкой. В § 5.1 рассматривается вопрос изучения покровного оледенения Антарктиды. § 5.2 посвящен исследованиям автора диссертации, проведенным в рамках 62-й РАЭ. Геоморфометрический способ выявления скрытых ледниковых трещин и его верификация рассматриваются в § 5.3.

5.1 Антарктида

5.1.1 Полярные станции

С 1956 г. в Антарктиде действует первая советская круглогодичная полярная станция – Мирный. С этого времени начинается современная история отечественных антарктических экспедиций, которая прошла длительный путь и сохранила преемственность поколений в структуре Комплексной, Советской и Российской антарктических экспедиций [22].

На сегодняшний день в Антарктиде находится 5 постоянно действующих российских полярных станций, 4 из которых расположены в прибрежной полосе: Беллинсгаузен, Новолазаревская, Прогресс и Мирный. Одна станция – Восток – является внутриконтинентальной.

Ее обеспечение осуществляется путем организации санно-гусеничных походов (СГП). Отправной точкой СГП до 2007 г. являлась станция Мирный. С 2007 г. походы отправляются со станции Прогресс.

5.1.2 Покровное оледенение и ледниковые трещины

Использование ДДЗ актуально при изучении покровного оледенения Антарктиды [2].

В Антарктике данные, полученные с БАС, включая ЦМР,

используются для геоморфологических исследований и анализа эволюции поверхности [77, 143, 199, 203]. Экстремальные температуры и метеорологические условия полярных регионов предъявляют особые требования к характеристикам БАС, установленному оборудованию и методам съемки БАС, что нашло отражение в ряде исследований [75, 103, 108, 118, 165]. Однако в них не рассматриваются вопросы, связанные с конструкцией БАС, режимами работы автопилота, выбор стартовой площадки и др. (§ 3.2).

Особого внимание заслуживает проблема проведения аэрофотосъемки, связанная со сложностью и даже невозможностью выполнения условий планово-высотной подготовки (см. § 3.2.6) из-за распространения трещин, либо отсутствия устойчивых неподвижных участков поверхности покровного ледника.

Покровное оледенение и ледники Антарктиды находятся в непрерывном движении, что приводит к постоянным изменениям геометрии поверхности ледников [111, 148, 150, 167]. Такие изменения могут варьировать от медленных до катастрофических.

В результате движения льда на поверхности и в приповерхностном слое ледников постоянно образуются трещины разных размеров [73, 196]. Трещины представляют значительную опасность для исследователей и сотрудников полярных станций. Поэтому в антарктических исследованиях одной из наиболее важных задач является быстрый и безопасный мониторинг трасс СГП, снежно-ледовых взлетно-посадочных полос (ВПП) (аэродромов) и других посещаемых зон для обнаружения открытых трещин, выявления скрытых, а также изучения их динамики.

Особую опасность для исследователей представляют скрытые трещины, имеющие «снежный мост» [63, 93, 94]. На сегодняшний день для оперативного выявления скрытых ледниковых трещин не существует однозначного решения. Выделяют два основных подхода к поиску трещин: наземный и дистанционный.

Наземный подход базируется на изучении ледника геофизическими методами, в основном используется георадарное профилирование. Однако безопасность и эффективность данного метода определения трещин проблематично [32].

Дистанционные методы наблюдения за трещинами начинают свою историю с 1970-х гг. По материалам аэрофотосъемки определяли отдельные открытые трещины на леднике Уиллас (Восточная Антарктида) [73]. Дальнейшие исследования показали высокий потенциал применения данных аэрофотосъемки и космической съемки для нахождения открытых трещин. Наибольшую эффективность для выявления трещин, в том числе и скрытых, показали методы текстурного анализа материалов космической съемки [210]. Однако существует ряд недостатков использования космической съемки в этих целях: 1) низкое пространственное разрешение, которое ограничивает диапазон размеров выявляемых трещин; 2) периодичность выполнения съемки, что оказывает влияние на оперативность получения данных; 3) отсутствие съемки отдаленных от побережья районов Антарктиды.

Процессы движения льда, а также образования и распространения трещин естественным образом отражаются в геометрии поверхности ледника или покровного оледенения. Распределение снежного покрова и сезонное таяние снега способствуют формированию микроформ рельефа ледника, поэтому для выявления анализа и мониторинга этих процессов и явлений могут использоваться ЦМР с высоким пространственным разрешением, созданные фотограмметрическим методом по материалам беспилотной аэрофотосъемки. Такой подход лежит в основе ряда недавних работ. В частности, беспилотная аэрофотосъемка применялась для анализа изменения геометрии ледников и количественного определения движения льда на основе ЦМР в Канадской Арктике [55, 206], Гималаях [123, 135], Шпицбергене [88, 169], Гренландии [70, 128, 171], Альпах [170, 177], Андах [208] и Северном Кавказе [26, 28]. Однако во всех этих случаях использовались наземные опорные точки, что практически неприемлемо в

условиях Антарктики (см. выше). Для гляциологических исследований использование центров проекций, в качестве опорной информации впервые было применено автором работы на Монгольском Алтае [186, § 1.4].

5.2 62-ая РАЭ

5.2.1 Область исследования

Экспедиционное исследование проводилось вблизи холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) (рис. 5.1). Холмы Ларсеманн представляют собой небольшой, свободный ото льда участок площадью около 40 км², расположенный на юго-восточном побережье залива Прюдз (Земля Принцессы Елизаветы) [184]. Этот прибрежный антарктический оазис включает два полуострова – Сторнс и Брокнес, а также четыре небольших полуострова и около 130 островов. Холмы Ларсеманн – один из особо управляемых районов Антарктики [137]. Здесь действуют три круглогодичные полярные станции: Прогресс (Россия), Чжуньшань (Китай) и Бхарати (Индия).

Нами были выбраны 4 района исследования (рис. 5.1):

1) Восточная часть холмов Ларсеманн и прилегающие районы размером около 17 x 7,5 км. Высота над ур. м. варьирует от 0 до 180 м.

2) Аэродром станции Прогресс, расположенный на леднике к югу от холмов Ларсеманн. Размер съемки района аэродрома – около 2500 x 5000 м при высоте от 104 м до 310 м над ур. м.

3) Начальный участок (от 69°27'24" ю.ш., 76°19'04" в.д. до 69°40'40" ю.ш., 76°32'46" в.д.) трассы СГП от станции Прогресс до станции Восток длиной около 30 км и шириной около 3 км. Территория представляет собой заснеженный ледяной покров, поверхность которого постепенно поднимается к югу, примерно от 280 м до 750 м над ур. м.

4) Северо-западная окраина ледника Долк и прилегающая территория. Размер участка около 1000 x 1000 м, высота от 50 до 140 м над ур. м. Ледник Долк представляет собой полярный выводной ледник длиной 15 км,

впадающий в юго-восточную часть залива Прюдз к востоку от холмов Ларсеманн.

Утром 30 января 2017 на северо-западном краю ледника Долк произошло внезапное образование провала – широкой и глубокой впадины на поверхности льда с координатами 69°23'58" ю.ш., 76°24'49" в.д. [95, 96, 163]. Подробное описание этого события представлено в гл. 6.

5.2.2 Аэрофотосъемочные работы

Аэрофотосъемка районов исследования выполнялась с использованием БАС Геоскан 201 с цифровой камерой Sony RX 1 и приемником ГНСС геодезического класса (см. § 2.2.1).

Предварительно было определено пространственное разрешение снимков на основании разрешения будущей ЦМР. В предыдущих исследованиях выявлены две особенности для зависимости пространственного разрешения ЦМР от пространственного разрешения снимков [17, 97]. Во-первых, максимальное разрешение ЦМР не должно превышать 20–30 см. Более детальное разрешение сопровождается появлением высокочастотного шума в ЦМР, который существенно усиливается в морфометрических моделях (см. § 2.3). Во-вторых, среднее соотношение пространственного разрешения снимков и разрешения ЦМР составляет 1:4. Следовательно, пространственное разрешение снимков должно быть не менее 6 см/пиксель.

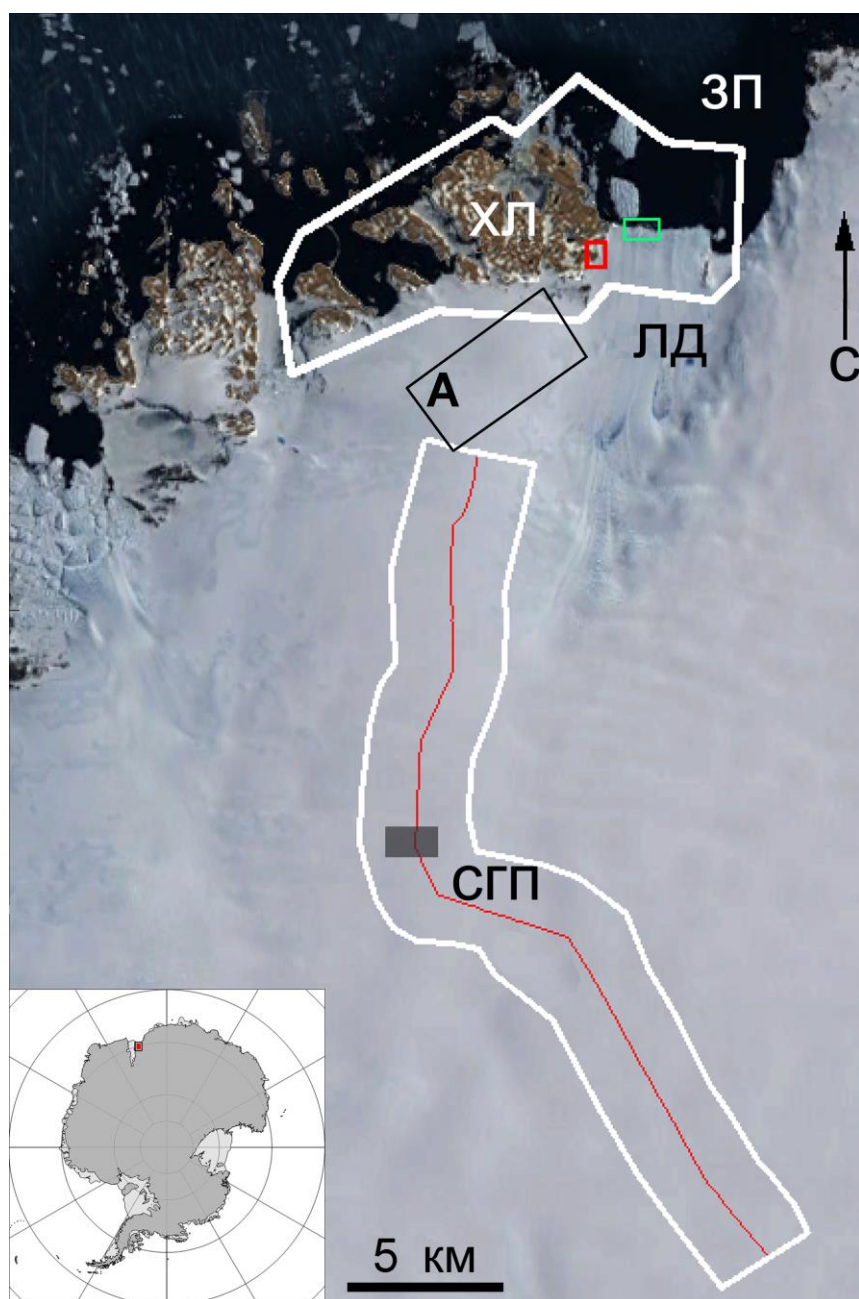


Рисунок 5.1 – Географическое положение района исследования:
 белая рамка ХЛ – восточная часть холмов Ларсеманн (рис. 5.2); зеленая
 рамка – зона больших трещин на северном краю ледника Долк (рис. 5.3);
 черная рамка А – район аэродрома (рис. 5.4); белая рамка СГП – начальный
 участок трассы СГП (красная линия) от станции Прогресс до станции Восток
 (рис. 5.5); серый прямоугольник – район узких трещин, тестовый полигон для
 выявления скрытых трещин (рис. 5.11); красная рамка – район провала в
 леднике Долк (рис. 6.1); ЗП – залив Прюдз; ЛД – ледник Долк
 (использована мозаика Google Earth)

Беспилотная аэрофотосъемка проводилась в январе и феврале 2017 г. [31]. Съемка выполнялась в различных метеорологических условиях, включая ясную солнечную погоду, а также переменную облачность и пасмурную погоду. Температура воздуха колебалась от -1°C до -12°C . Скорость ветра варьировала от 0 м/с до 28 м/с на высоте полета. На побережье и вблизи побережья ветер был северо-восточный. На леднике ветер был южным кatabатическим по утрам и северным в дневное время [62, 63].

Восточная часть холмов Ларсеманн (рис. 5.2а, б) была снята за четыре полета. Основной целью этого исследования было обновление топографической карты [64]. Результаты съемки также использовались для наблюдения больших открытых трещин на северном краю ледника Долк (рис. 5.3а), а также для изучения провала ледника Долк (см. § 6.2).

Район аэродрома (рис. 5.4а) снимался дважды, в середине января и в середине февраля 2017 г. Целью аэрофотосъемок была оценка движения поверхности льда в пределах этой краевой зоны ледникового покрова. Вдоль ВПП было установлено десять металлических вешек для геодезических наблюдений. Расположение вешек см. на рис. 5.4в.

Координаты этих маркированных точек были определены трижды: 23 января, 10 февраля и 17 февраля 2017 г. В качестве наземной базовой станции и ровера использовались приемники Topcon HiPer+ и Topcon HiPer V, соответственно. Кроме того, планировалось использовать результаты этих беспилотных съемок для количественной оценки сезонного таяния снега.

Начальный участок трассы СГП от станции Прогресс до станции Восток (рис. 5.5) был снят дважды, в середине января и начале февраля 2017 г. Во время первой аэрофотосъемки погода была хорошей, но во время второй съемки погодные условия ухудшились. В связи с этим было невозможно завершить вторую аэрофотосъемку всего участка.

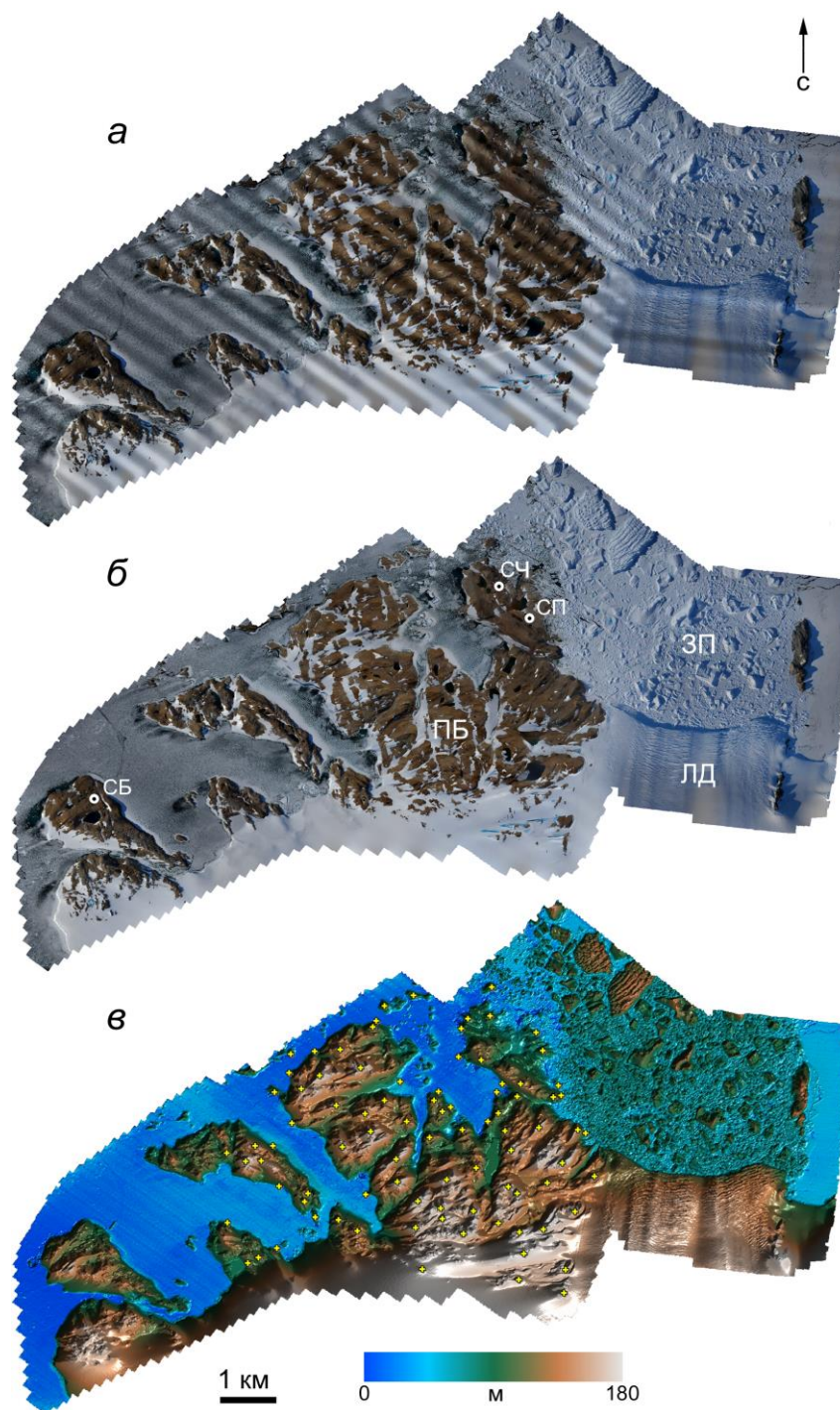


Рисунок 5.2 – Восточная часть холмов Ларсеманн: *а* – начальный ортофотоплан; *б* – ортофотоплан с выравненной оптической плотностью; *в* – высоты с отмывкой рельефа. Расположение см. рис. 5.1 (белая рамка ХЛ). ПБ – полуостров Брокнес, СП – станция Прогресс, СЗ – станция Чжуньшань, СБ – станция Бахарати, ЛД – ледник Долк, ЗП – залив Приюдз. Желтые кресты – контрольные точки на топографической карте [64].

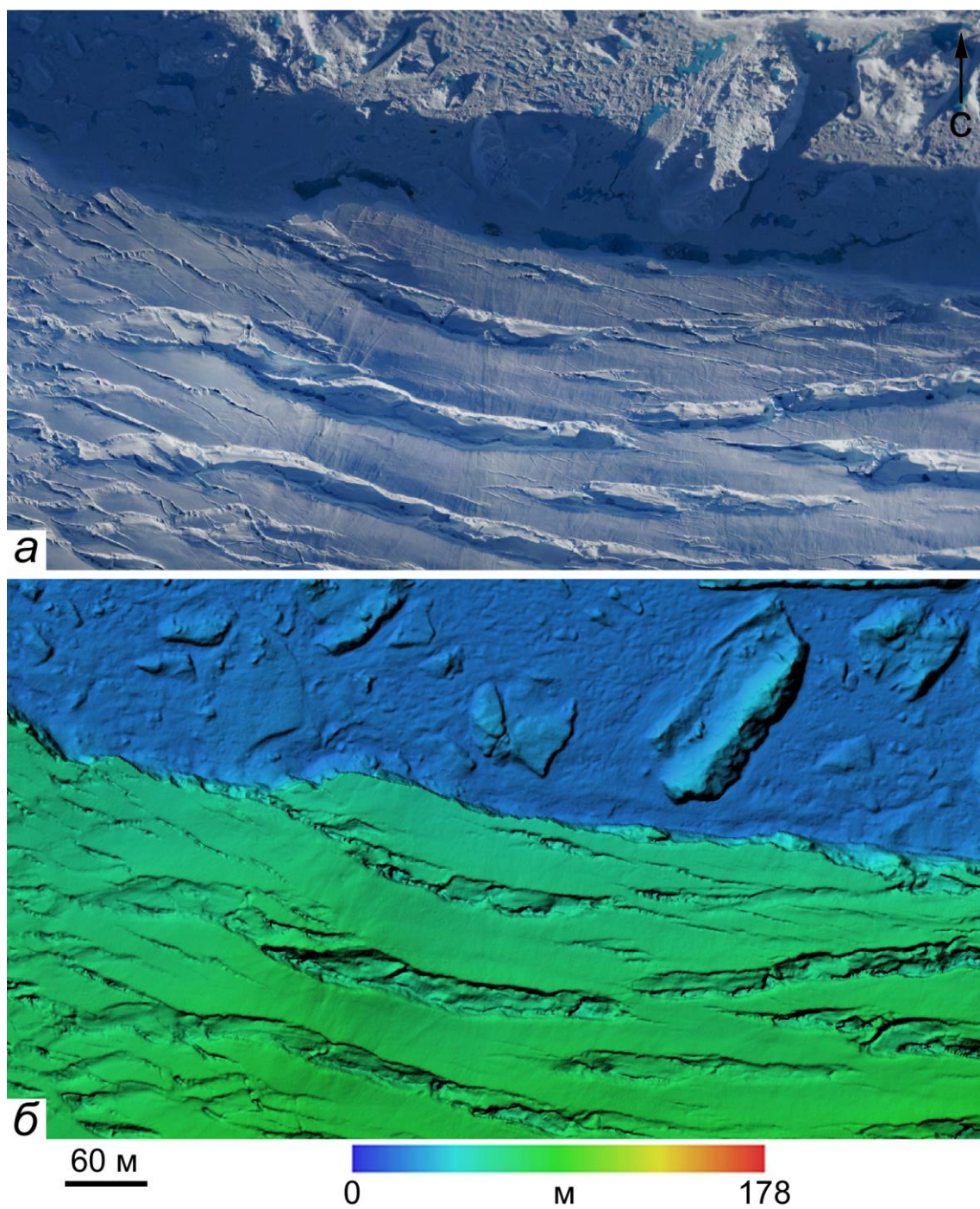


Рисунок 5.3 – Район больших трещин на северном краю ледника Долг:
а – ортофотоплан; *б* – высоты с отмывкой рельефа. Расположение см. рис. 5.1
 (зеленая рамка)

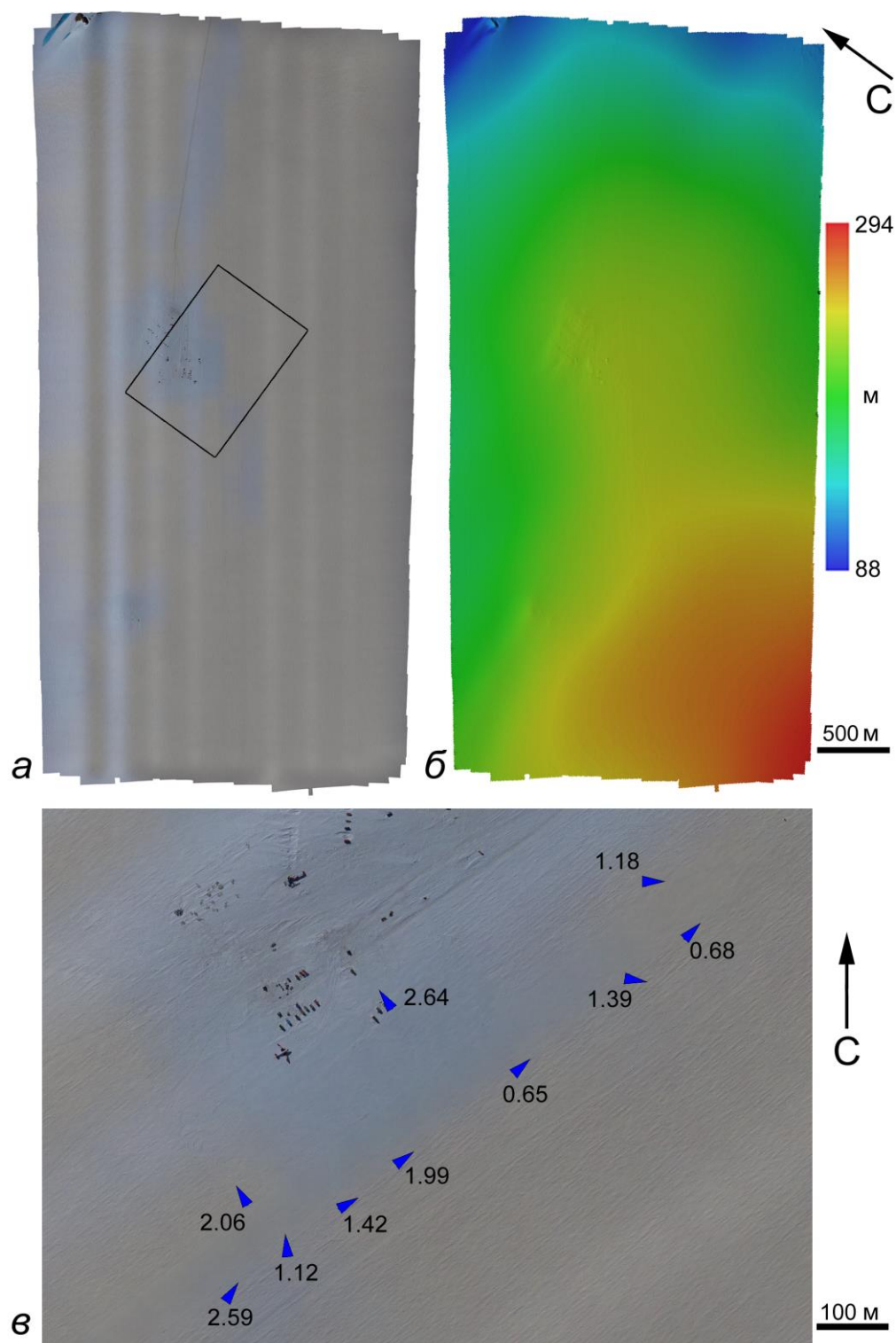


Рисунок 5.4 – Район аэродрома: *a* – ортофотоплан, черная рамка – зона ВПП, см. рис. 5.4в; *б* – высоты с отмывкой рельефа; *в* – движение льда (см) в пределах зоны ВПП; синие стрелки показывают направление движения льда (их положения соответствуют маркированным контрольным точкам).

Расположение см. рис. 5.1 (черная рамка А)

Работы на трассе СГП преследовали три цели. Во-первых, планировалось оценить движение льда на этом участке ледника. Для этого было установлено несколько маркированных контрольных точек, координаты которых были определены трижды: 15–16 января, 1–2 февраля и 18–19 февраля 2017 г. В качестве маркированных точек использовались 17 трехметровых пластиковых вешек и 10 прессованных металлических бочек (рис. 5.6). Расположение точек см. рис. 5.7б. Маркированные точки смещались вместе со льдом, поэтому они использовались только для оценки движения льда. В качестве базовой станции и ровера использовались те же ГНСС-приемники, что и в районе аэродрома. Во-вторых, в районе начального участка трассы СГП находятся несколько узких трещин (шириной >10 м), на которых возможно выработать методику дешифрирования трещин. Это как хорошо дешифрируемые открытые трещины, так и скрытые трещины, накрытые «снежным мостом» (рис. 5.8). В-третьих, район трассы СГП подходит для изучения особенностей снежного микрорельефа (рис. 5.10).

На всех участках аэрофотосъемки наземные контрольные и опорные точки не применялись. В качестве опорной информации использовались центры проекций. В пределах холмов Ларсеманн, в том числе в стабильных и свободных ото льда скалистых районах, администрация станции Прогресс запрещала выполнять работы по установке и маркировке опорных и контрольных точек по соображениям техники безопасности и защиты окружающей среды. На участке трассы СГП это делать было бессмысленно из-за постоянного движения поверхности ледникового покрова.

5.2.3 Камеральная обработка материалов съемки

Обработка результатов съемки проводилась аналогично описанному процессу в § 2.3 и § 4.2.3. Точность фототриангуляции представлена в табл. 5.1. В результате выполненной работы для районов исследования были получены ЦМР высокого разрешения и ортофотопланы.

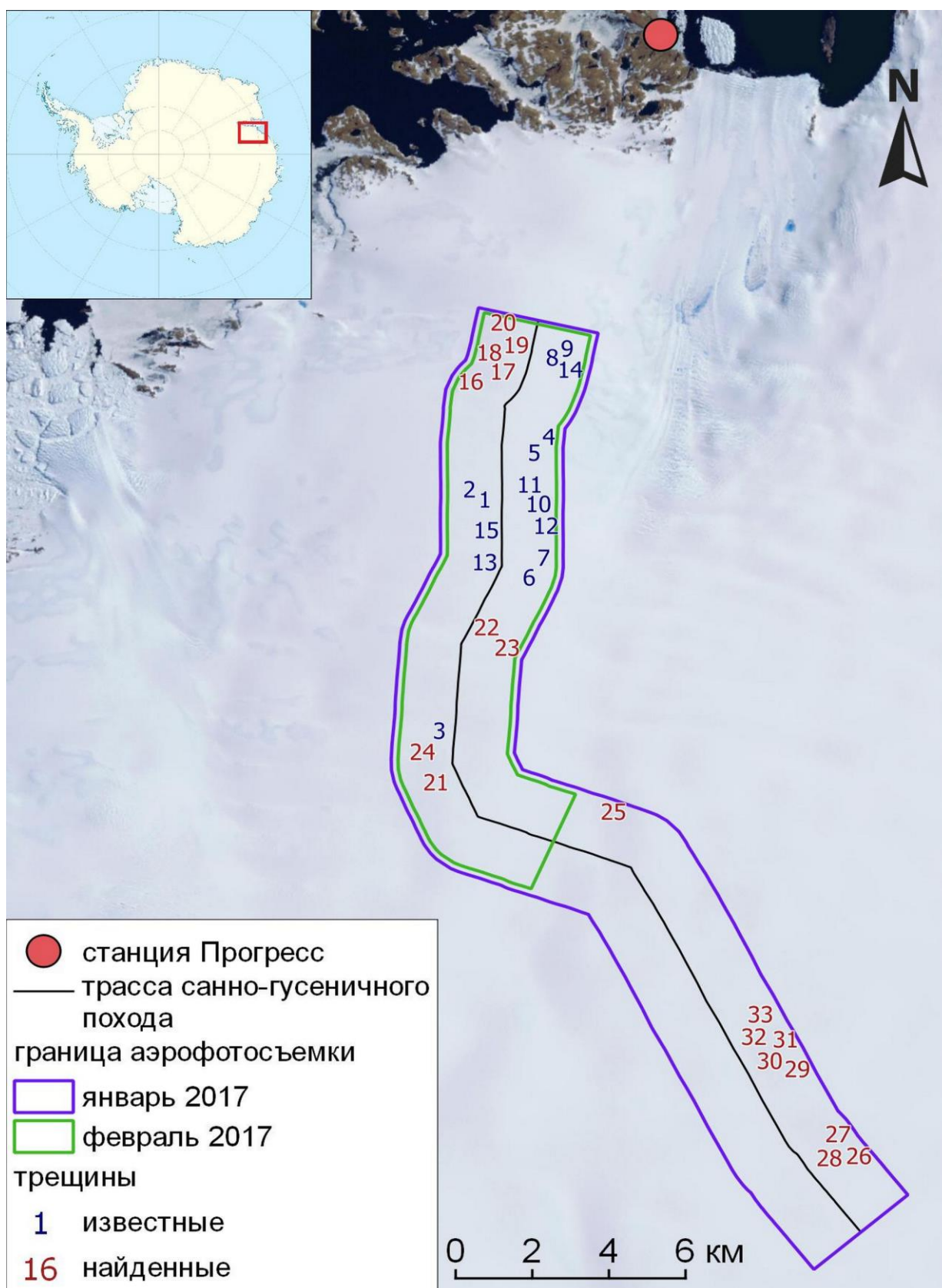


Рисунок 5.5 – Начальный участок трассы СГП и границы аэрофотосъемки
(наложение на мозаику Google Earth)



Рисунок 5.6 – Установка и определение координат маркированных точек на
трассе СГП

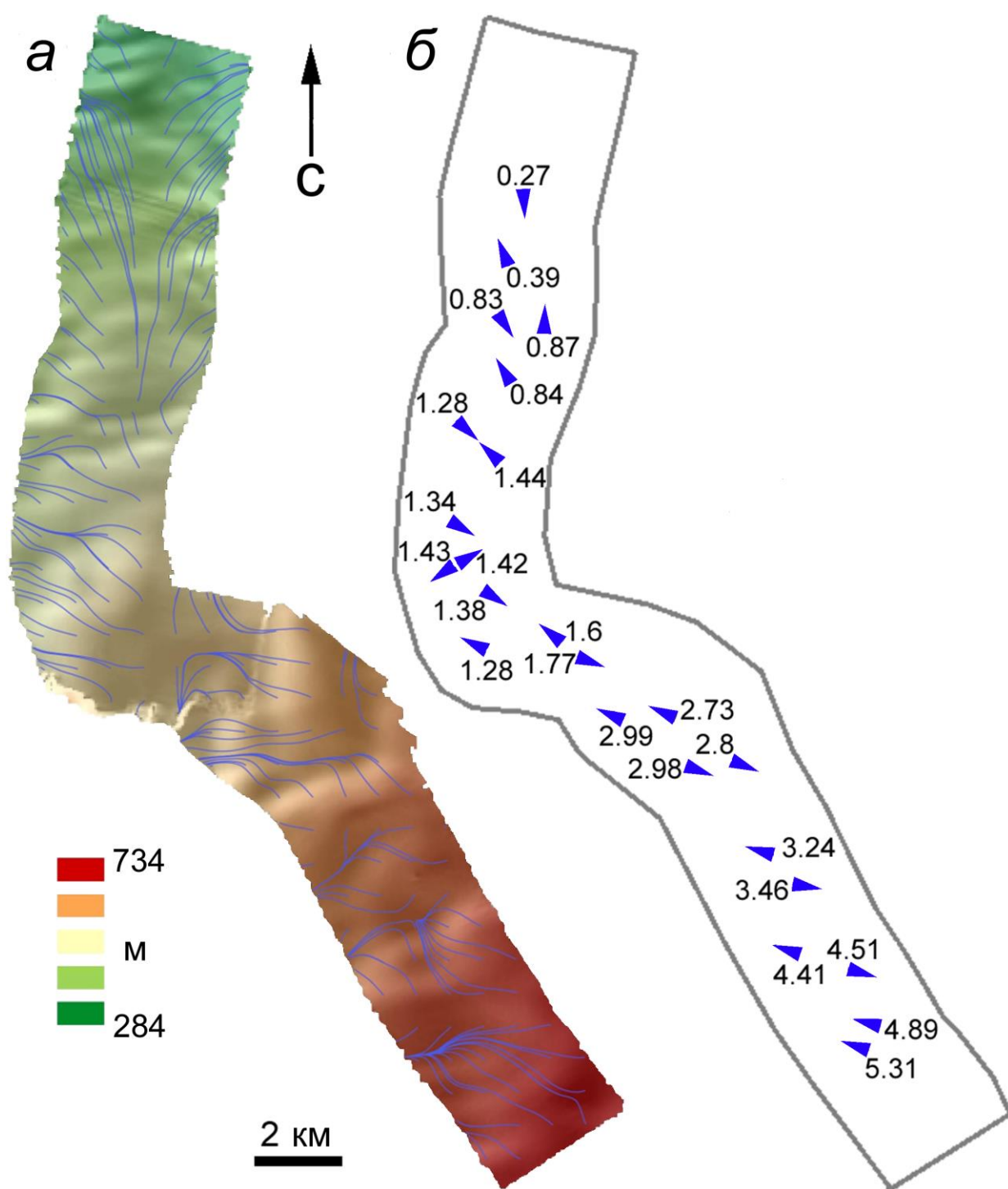


Рисунок 5.7 – Начальный участок трассы СГП:

a – высоты с отмывкой рельефа и линиями тальвегов; *б* – перемещение льда (м); синие стрелки показывают направление движения льда, положение стрелок соответствует маркированным точкам. Расположение участка см. рис. 5.5



Рисунок 5.8 – Пример детального ортофотоплана для трассы СГП. В правой части изображения виден ряд хорошо дешифрируемых, открытых и покрытых снегом узких трещин, ориентированных с ССЗ на ЮЮВ. Наблюдается также система эоловых микроформ снежного рельефа, ориентированная с СВ на ЮЗ

Как видно из табл. 5.1, точность фототриангуляции участка СГП ниже, чем на остальных участках. Это объясняется тем, что использовались снимки, полученные при средней сплошной облачности, имеющие низкую контрастность. Фотограмметрическая обработка подобных снимков выполняется значительно хуже [144].

Для восточной части холмов Ларсеманн (рис. 5.2б) была получена одна ЦМР (рис. 5.2в). Для района аэродрома (рис. 5.4а) получено две ЦМР, соответствующие датам беспилотной аэрофотосъемки середины января и середины февраля 2017 г. (рис. 5б). Для начального участка маршрута СГП также были получены две ЦМР, относящиеся к датам беспилотной аэрофотосъемки середины января и начала февраля 2017 г. рис. 5.7а). Для зоны провала ледника Долк (рис. 5.1, красная рамка) рассчитаны две ЦМР поверхности ледника до и после образования провала.

В качестве системы координат использовали WGS84. Высоты использовались ортометрические, модель геоида 2008 г. (EGM2008).

5.2.4 Оценка точности ЦМР

Оценка точности полученных ЦМР является нетривиальной задачей. Обычно это может быть сделано с использованием эталонной ЦМР или контрольных точек с известными координатами. Проблема выбора количества контрольных точек для беспилотной съемки и ее влияние на точность ЦМР обсуждалась неоднократно [173, 187, 189]. Однако в исследовании было невозможно установить опорные и контрольные точки (см. выше). Кроме того, на районы исследования не существует эталонных ЦМР.

В этой ситуации для ориентировочной оценки точности ЦМР можно использовать наши результаты, полученные с использованием такого же или очень близкого оборудования и программного обеспечения, для территории Заокского геополигона, который включает специально спроектированную сеть контрольных точек (см. гл. 2).

Кроме того, было произведено сравнение ЦМР холмов Ларсеманн (рис. 5.2с) и топографической карты полуострова Брокнес масштаба 1 : 10 000 с сечением рельефа 10 м и системой высот от среднего уровня моря [64]. Согласно легенде карты, ее плановая точность составляет 25 м, то есть 2,5 мм в масштабе карты. Вертикальная точность не указана, но ее можно принять равной $1/4$ – $1/3$ сечения рельефа, то есть 2,5–3,33 м. Очевидно, что эту карту нельзя использовать в качестве контрольного материала для ЦМР, поскольку последняя имеет гораздо более высокое разрешение и точность. Тем не менее, их сравнение представляет определенный интерес из-за отсутствия других, более точных контрольных материалов.

В качестве набора из 89 контрольных точек использовалось 69 отметок высот (высоты свободных ото льда вершин холмов) с карты, а также 20 случайно выбранных точек вдоль горизонталей уреза воды (рис. 5.2с). ЦМР и набор контрольных точек были совмещены и обработаны с использованием программного обеспечения MapInfo Pro 16.0.1. Различия в высотах представлены в табл. 5.2, их значения находятся в пределах

точности карты. Следует обратить внимание, что перепады высот для точек вдоль горизонталей береговой линии выше, чем для отметок высот. Это неудивительно:

1) Береговая линия обозначена плавными горизонталями, а фактические береговые линии характеризуются «фрактальностью» [147].

2) Существует незначительная разница между средним уровнем моря и поверхностью геоида.

3) Аэрофотоснимки показывают, что вдоль береговой линии есть ледяной покров и ледяные глыбы, высота которых может варьировать в пределах нескольких дециметров, а вершины холмов – свободны ото льда.

4) В течение 12 лет карта могла устареть из-за береговой эрозии. Поэтому, эти результаты больше подходят для оценки точности карты, а не ЦМР.

5.2.5 Анализ движения поверхности льда

В районе аэродрома анализ данных показал, что движение льда составляло около 2 см за 25 дней между первой и третьей съемками (рис. 5.46), то есть около 0,08 см в день. Это означает, что зона аэродрома расположена в относительно стабильной части ледового щита. Тем не менее, было невозможно использовать ЦМР аэродрома для количественной оценки сезонного таяния снега. Это связано с тем, что в районе аэродрома высоты поверхности ледяного щита изменились за 25 дней примерно на 20 см, то есть в пределах погрешности измерения. Также между беспилотными съемками произошло два снегопада, которые сделали этот эксперимент бессмысленным.

Произведена оценка скорости движения льда в зоне трассы СГП, где было установлено 27 маркированных точек, которые двигались вместе со льдом. Движение ледяного щита неравномерное и варьировало от 0,28 м до 5,31 м за 31 день между первой и последней съемками, то есть до 0,17 м в день.

Таблица 5.1 – Точность фототриангуляции

Район исследования	Плановая точность (м)		Вертикальная точность (м)
	Х	У	
Холмы Ларсеманн	0,09	0,12	0,08
Аэродром	0,05	0,04	0,03
Трасса СГП	1,9	0,5	0,8
Ледник Долк (провал)	0,05	0,05	0,06

Таблица 5.2 – Разницы высот между ЦМР холмов Ларсеманн и топографической картой п-ова Брокнес по контрольным точкам (м)

Разница	Все контрольные точки	Отметки высот	Точки вдоль уреза воды
Минимальная абсолютная	0.00	0.00	0.65
Максимальная абсолютная	3.31	3.31	1.90
Средняя абсолютная	0.75	0.62	1.26
Среднеквадратическая	0.98	0.88	1.31

Следует отметить, что это движение не однонаправленное (рис. 5.7б), а скорость движения возрастает с удалением на юг. Мониторинг этого участка необходимо проводить каждые 2–3 года.

5.3 Выявления скрытых ледниковых трещин

Утверждение, что все скрытые трещины совершенно незаметны на ортофотоплане – ошибочно. Скорее, их обнаружение затруднено и требует

времени. Это создает потребность в разработке более наглядного и однозначного способа выявления ледниковых трещин, чем дешифрирование ортофотопланов.

У скрытой ледниковой трещины присутствует характерный «снежный мост», который затрудняет ее выявление. Поскольку скрытая трещина содержит в себе полое пространство, снежный мост оседает под действием силы тяжести и образует вытянутое вдоль трещины микропонижение (снежно-ледовая линейная микроструктура), которое может быть шире самой трещины. Это, в свою очередь, должно отразиться в ЦМР высокого разрешения. Следовательно, возможно применение методов геоморфометрического моделирования для анализа ЦМР и выявления скрытых трещин. При этом очевидно, что не все скрытые ледниковые трещины могут быть выявлены при анализе ЦМР.

По результатам экспедиционных исследований 62-ой РАЭ разработан геоморфометрический способ выявления скрытых ледниковых трещин.

5.3.1 Геоморфометрический способ

Разработанный способ выявления скрытых ледниковых трещин основан на геоморфометрическом моделировании с использованием ЦМР сверхвысокого разрешения. На рисунке 5.9 представлена блок-схема геоморфометрического способа.

В качестве исходных данных используются ЦМР ледника, на этапе контроля распознанных трещин применяются ортофотопланы и полевое обследование.

Способ включает следующие основные этапы:

- 1) Расчет ЦМР с различным пространственным разрешением.
- 2) Сглаживание ЦМР для подавления высокочастотного шума.
- 3) Расчет 16-ти морфометрических величин (см. § 5.3.2).
- 4) Контроль распознавания трещин.
- 5) Определение наилучшей морфометрической модели.

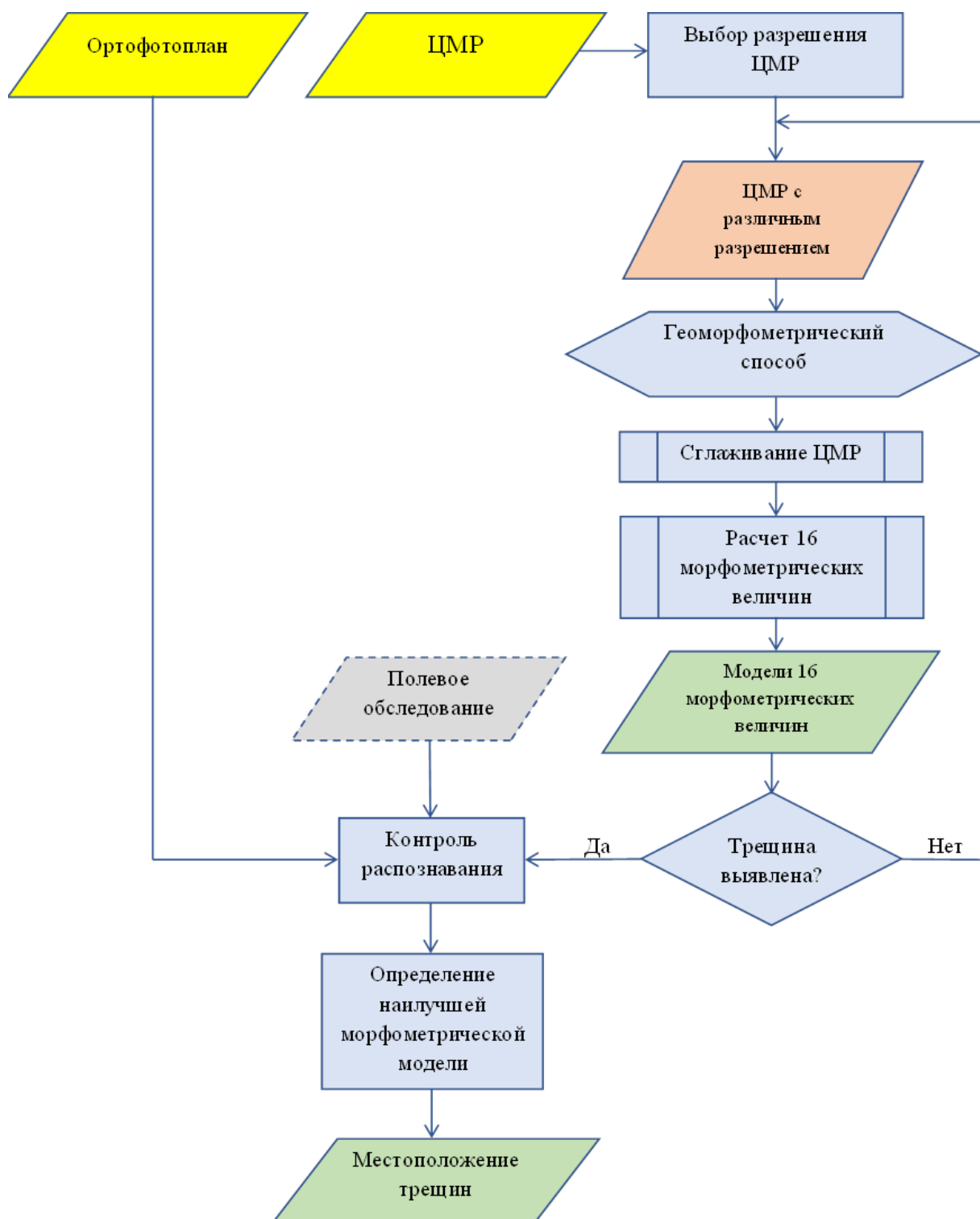


Рисунок 5.9. – Блок-схема геоморфометрического способа выявления скрытых ледниковых трещин

5.3.2 Апробация геоморфометрического способа выявления скрытых ледниковых трещин

На участке трассы СГП был выбран тестовый полигон, в пределах которого имеется две скрытые ледниковые трещины, длинная и короткая.

Обе трещины были обследованы в полевых условиях. В двух местах каждая из трещин была вскрыта, произведены измерения; по соображениям техники безопасности полевые работы по обследованию выявленных трещин были ограничены. Длинная трещина имела ширину около 1,5 м и наблюдаемую глубину более 5 м (рис. 5.10). Короткая трещина имела ширину около 1 м. Трещины были покрыты слоем снега толщиной 20–120 см (рис. 5.10а).

Для тестового полигона были получены ортофотоплан (рис. 5.11а) и три ЦМР ледника с пространственным разрешением 25 см, 50 см и 1 м (рис. 5.11б). Такое разрешение было выбрано по четырем причинам:

1) Учитывая разрешение снимков 6 см, 24–25 см – это максимально детальное разрешение ЦМР, при котором соотношение сигнал/шум еще позволяет проводить геоморфометрическое моделирование (см. § 5.2.2).

2) Чтобы обнаружить трещину шириной 1 м, разрешение ЦМР должно быть не менее 25 см. Это связано с первым следствием теоремы Котельникова: чтобы сохранить информацию об элементах рельефа с типичными плановыми размерами λ в ЦМР, следует использовать шаг сетки ЦМР $w \leq \lambda/(2n)$, где $n \geq 2$ [91, с. 105].

3) Разрешение более 1 м не имеют смысла, поскольку узкие трещины будут располагаться между точками ЦМР.

4) Разрешение 50 см завершает ряд выбранных значений.

Для подавления высокочастотного шума ЦМР были сглажены 1–3 раза с помощью средневзвешенного фильтра (скользящее окно 3 x 3).

В итоге, по сглаженным ЦМР были рассчитаны модели 16 морфометрических величин, включая G , экспозицию склона, 12 кривизн (k_h , k_v , k_{min} , k_{max} , средняя, Гауссова, несферичность, разность, избыточная

вертикальная, избыточная горизонтальная, кольцевая и аккумуляционная), а также *СА* и дисперсивную площадь. Каждая из этих величин описывает определенное свойство топографической поверхности (их определения, формулы и интерпретации даны в Прил. 1).

Нами использовался большой набор переменных, потому что априори неизвестно, как именно скрытые трещины отражаются в геометрии ледника. Уклон, экспозиция и кривизны были рассчитаны с использованием одного из алгоритмов, основанных на аппроксимации частных производных конечными разностями (метод Эванса), а водосборная и дисперсивная площади были рассчитаны с использованием одного из алгоритмов маршрутизации потоков (метод Мартца – де Янга) [91, гл. 4]. Использовалось программное обеспечение LandLord (см. § 2.4).

Обе скрытые, занесенные снегом трещины не могут быть легко визуально обнаружены на ортофотоплане и карте высот тестового полигона (рис. 5.11). В то же время, морфометрические величины, рассчитанные по ЦМР с разрешением 1 м, выявляли длинную трещину (рис. 5.12). Карты всех величин, так или иначе, отображают эту трещину, потому что она отражается в геометрии поверхности ледника.

Однако разные величины обладают различной способностью выявлять трещину, так как конкретная морфометрическая величина описывает особенности рельефа в соответствии с ее физическим, математическим и геоморфологическим смыслом (см. Прил. 1) [91, гл. 2]. Трещина лучше всего выявляется с помощью горизонтальной кривизны и минимальной кривизны (рис. 5.12а, в).

Ширина выявленной трещины составляет 1,5 м (рис. 5.12а), ширина вытянутого вдоль трещины микропонижения, зафиксированного в ЦМР, должна составлять 5–6 м. В противном случае эта линейная микроструктура не была бы выявлена по моделям с разрешением 1 м из-за первого следствия теоремы Котельникова (см. выше).

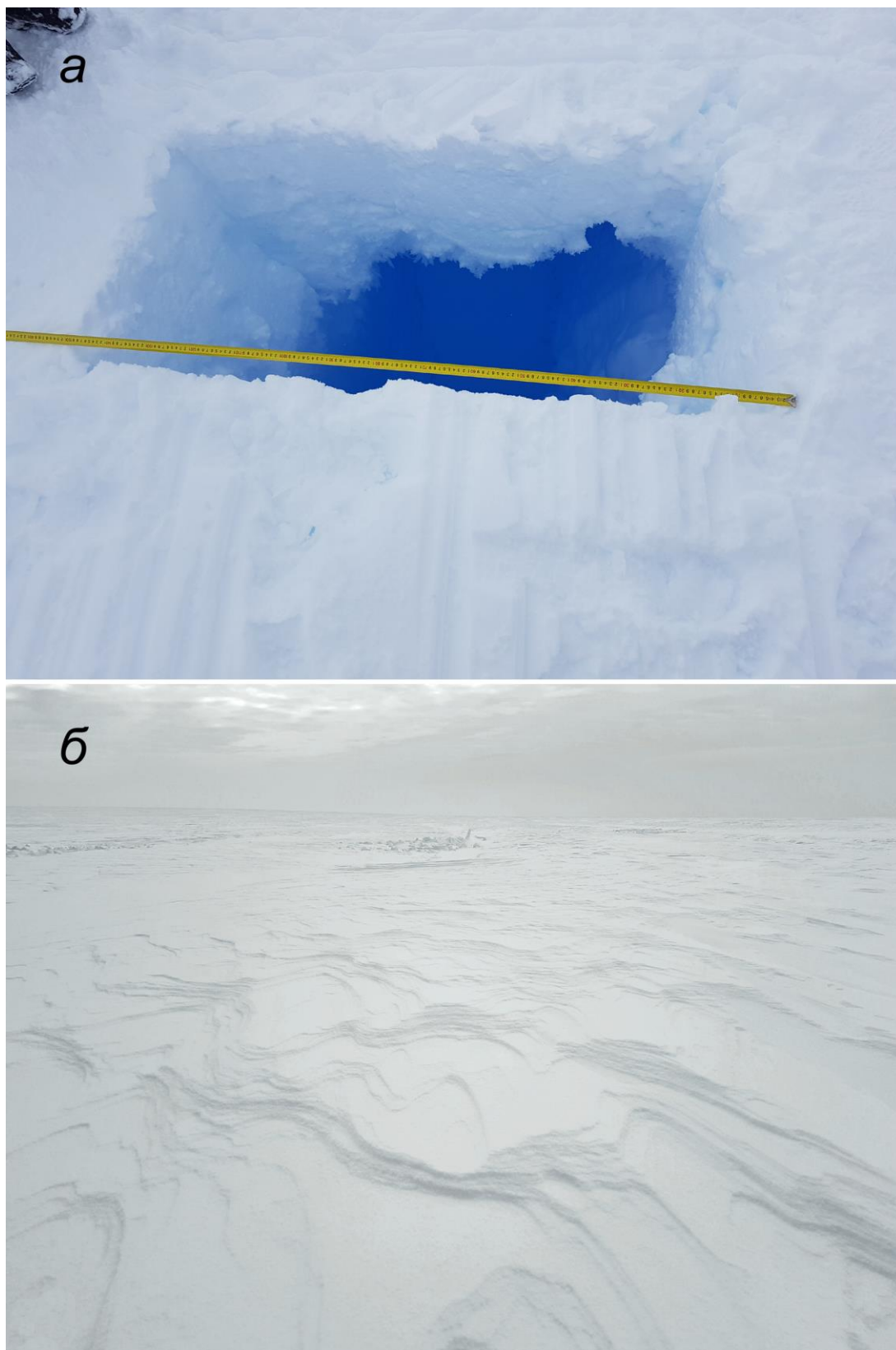


Рисунок 5.10 – Тестовый полигон:

а – вскрытая часть длинной трещины; *б* – снежный микрорельеф

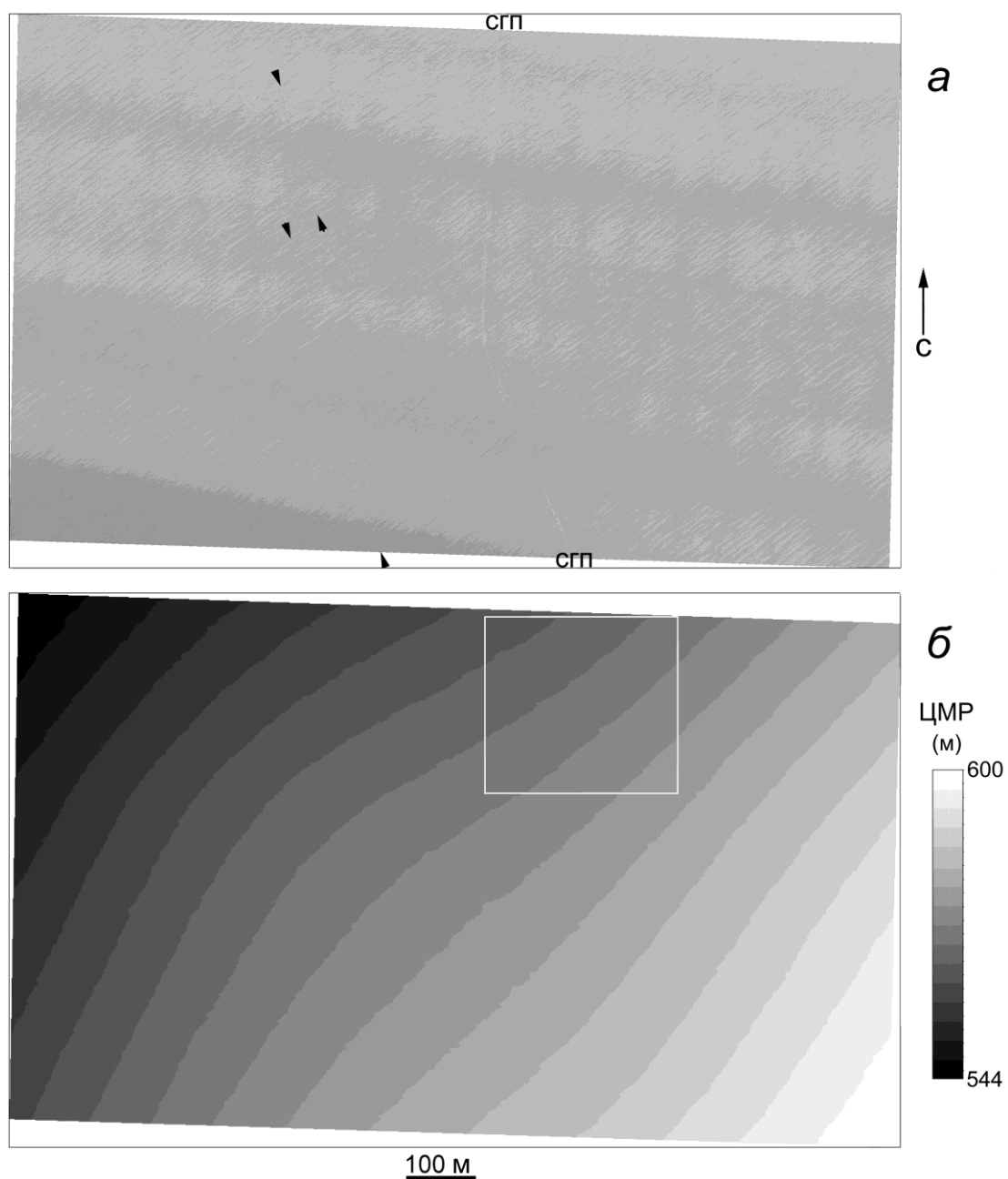


Рисунок 5.11 – Тестовый полигон с трещинами:

а – ортофотоплан; *б* – высоты (пространственное разрешение 1 м). Стрелки показывают скрытые трещины; СГП – трасса санно-гусеничная похода (кривая с севера на юг); белая рамка – фрагмент, используемый для иллюстрации шума и артефактов в ЦМР с разрешением 25 см (см. рис. 5.13).
Расположение см. рис. 5.1 (серый прямоугольник)

Короткая трещина не обнаруживается на морфометрической карте с разрешением 1 м (рис. 5.12), потому что она более узкая, чем длинная трещина, и может располагаться между узлами матрицы ЦМР.

Трасса СГП также выделяется морфометрическими величинами (рис. 5.12), так как она представляет собой наезженную, утрамбованную гусеницами вездеходов дорогу, окруженную снежной целиной, т.е. узкое и длинное техногенное микропонижение на поверхности ледника.

Расчет морфометрических величин по ЦМР тестового полигона с разрешением 25 и 50 см не позволил выявить обе скрытые трещины. Эти ЦМР включают мириады высокочастотных паттернов, соответствующих как элементам микрорельефа (рис. 5.10б), так и шуму/артефактам. Последние являются следствием особенностей формирования и фотограмметрической обработки изображений яркой снежно-ледовой поверхности с высоким разрешением.

Полученные по этим ЦМР морфометрические карты практически не читаются (рис. 5.13). К наиболее выраженным артефактам относятся взаимно линейные структуры кардинальных направлений, соответствующие краям снимков. Эти артефакты могут быть следствием остаточных ошибок фотограмметрической обработки (фототриангуляции, построения плотного облако точек). Адекватно убрать шумы и артефакты невозможно. Хорошо известно, что фильтрация/сглаживание не только подавляет шум, но также изменяет полезный сигнал. Если отношение сигнал/шум достаточно велико (как в случае ЦМР с разрешением 1 м), это не является серьезной проблемой и скрытая трещина может быть обнаружена. Однако для ЦМР с разрешением 25 и 50 см уровни сигнала и шума сопоставимы, а сглаживание «в равной степени» устраняет как элементы шума, так и полезного сигнала.

Ортофотоплан (рис. 5.11а) отображает много снежных, вытянутых паттернов эолового происхождения (небольшие заструги), которые тянутся с юго-запада на северо-восток, перпендикулярно местному направлению катаболического ветра. Эоловые формы микрорельефа поверхности ледника

(рис. 5.10б) также можно увидеть на картах k_h , k_v и СА (рис. 5.12а, б, г).

Карта k_v выявляет систему снежных микротеррас, вытянутых с юго-запада на северо-восток (рис. 5.12б), также перпендикулярных локальному стоковому ветру. На картах k_h и СА (рис. 5.12а, г) видна система снежных эоловых микро-«потоков», простирающихся с юго-востока на северо-запад, сверху вниз, параллельно местному стоковому ветру. Таким образом, ЦМР высокого разрешения ледника могут быть использованы и при изучении эоловых процессов распределения снега и льда.

5.3.3 Верификация геоморфометрического способа выявления ледниковых трещин

5.3.3.1 Текстурные признаки Харалика

В начале § 5.3 было высказано предположение, что скрытая ледниковая трещина может быть найдена по ДДЗ сверхвысокого разрешения, так как вдоль трещины образуется вытянутое микропонижение, которое можно выявить при анализе ЦМР.

С другой стороны, ледниковые трещины нарушают структуру поверхности. Это может быть выражено в изменении ее текстурных характеристик. Также можно предположить, что применение методов текстурного анализа, а именно расчет текстурных характеристик Харалика [115] можно использовать при выявлении скрытых ледниковых трещин. Подобный метод ранее применялся при выявлении ледниковых трещин по материалам космической съемки [210].

Таким образом, для выявления скрытых ледниковых трещин можно использовать два способа: 1) на основе расчета морфометрических величин; 2) на основе расчета текстурных характеристик Харалика. Так как последний способ имеет достаточно долгую историю применения при анализе и обработке изображений, в том числе – ДДЗ, его можно применить для оценки эффективности геоморфометрического способа.

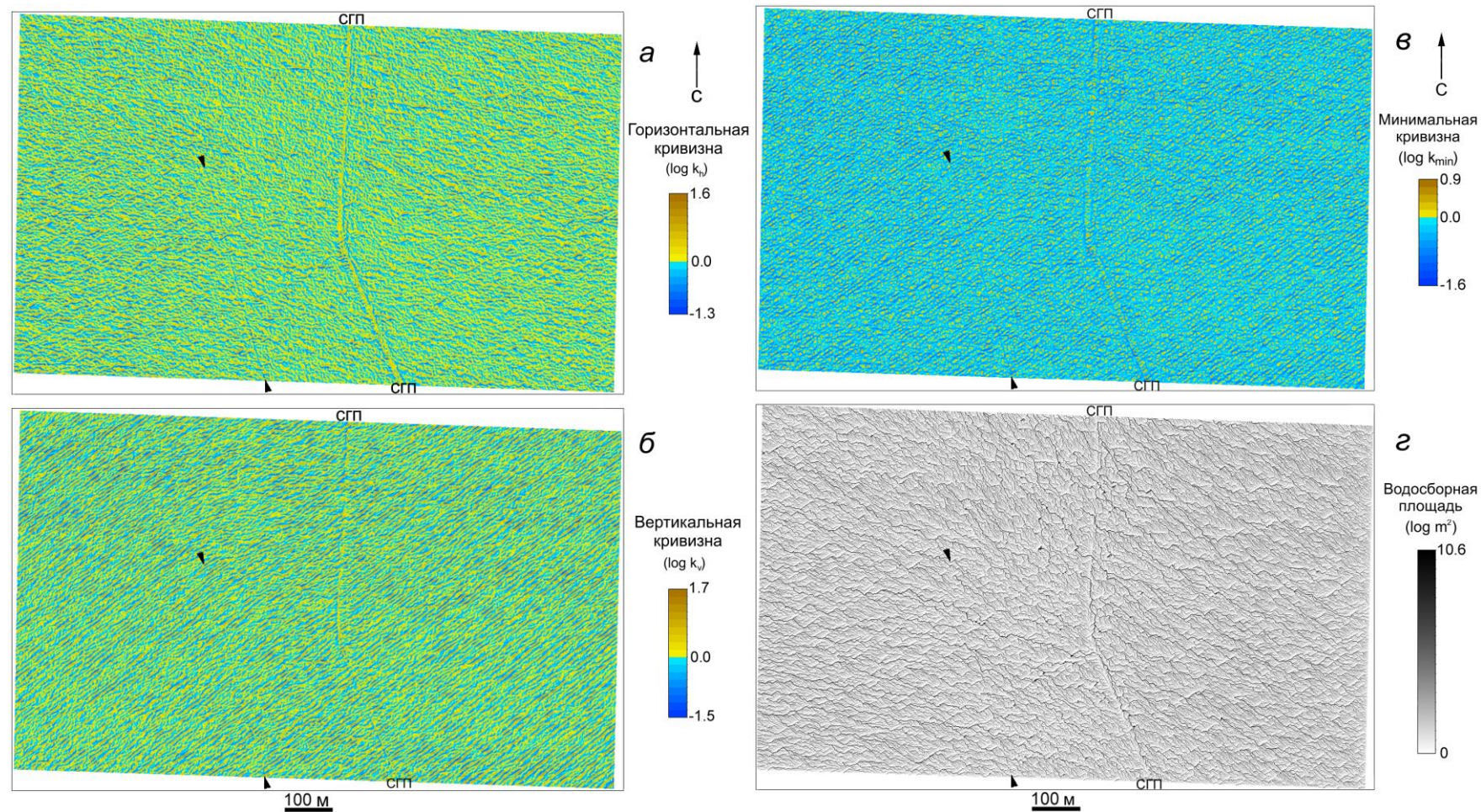


Рисунок 5.12 – Геоморфометрические величины на тестовый полигон (рассчитаны по ЦМР с разрешением 1 м):

$a - k_h$; $б - k_v$; $в - k_{min}$; $г - CA$. Стрелки показывают выявленную длинную трещину; СГП – трасса СГП

С этой целью выполнено автоматизированное выявление ледниковых трещин на участках, где трещины были распознаны визуально по разновременным ортофотопланам и набору снимков. Для этого было выделено 15 трещин (см. рис. 5.5). У каждой трещины по ортофотоплану были измерены длина и ширина (табл. 5.3). Скрытые трещины на ортофотоплане выглядят неодинаково. Условно, все трещины разделены на две категории: заметные и слабо-различимые.

На некоторых трещинах проводились полевые обследования – вскрытие «снежного моста». По технике безопасности полевые обследования проводились на ближайших к трассе трещинах.

Подобно расчету морфометрических характеристик, для двух трещин был проведен расчет текстурных признаков Харалика [115] в программном обеспечении QGIS. Были рассчитаны следующие 11 текстурных признаков: второй угловой момент, контрастность, корреляция, дисперсия, гомогенность, среднее значение суммы, дисперсия суммы, суммарная энтропия, энтропия, дисперсия разности, разность энтропий. Более детальное описание текстурных признаков представлено в Приложение 2. Расчет проводился по четырем направлениям (0° , 45° , 90° , 135°).

Размер скользящего окна был выбран 3 x 3 пикселя, размер между элементами 1 пиксель, количество уровней квантования равнялось 256. ЦМР для расчетов была разделена на участки с перепадом высот 30 м, который подбирался эмпирически [2]. Наибольшую информативность для обнаружения трещин показали 2 характеристики: гомогенность и контраст. Эти показатели взаимообратные, поэтому далее в расчетах использовалась только гомогенность.

Разные направления при расчете гомогенности подчеркивают формы микрорельефа различной ориентации. Преимущественное положение выбранных трещин таково, что они выделяются при углах 45° и 0° , но это не исключает использование направлений 90° и 135° .

В отличие от морфометрических величин, гомогенность не так

чувствительна к высокочастотному шуму фотограмметрической обработки и может свободно использоваться на ЦМР с пространственным разрешением 50 и 25 см. При этом, разбиение на блоки по перепаду высоты следует уменьшать (с перепадом высот до 10 м).

В результате расчет гомогенности на ЦМР с разрешением 25 см позволил распознать трещины шириной менее 1 м.

Таблица 5.3 – Характеристики трещин

Номер трещины	Длина, м	Ширина, м	Категория
1	123	1,5	слабо-различимая
2	77	1,5	слабо-различимая
3	883	2	слабо-различимая
4	191	3	заметная
5	170	5	заметная
6	913	7	слабо-различимая
7	476	8	слабо-различимая
8	117	0,5	заметная
9	99	0,6	слабо-различимая
10	644	5	слабо-различимая
11	247	7	слабо-различимая
12	501	2	слабо-различимая
13	300	3	слабо-различимая
14	155	0,6	заметная
15	139	2	слабо-различимая

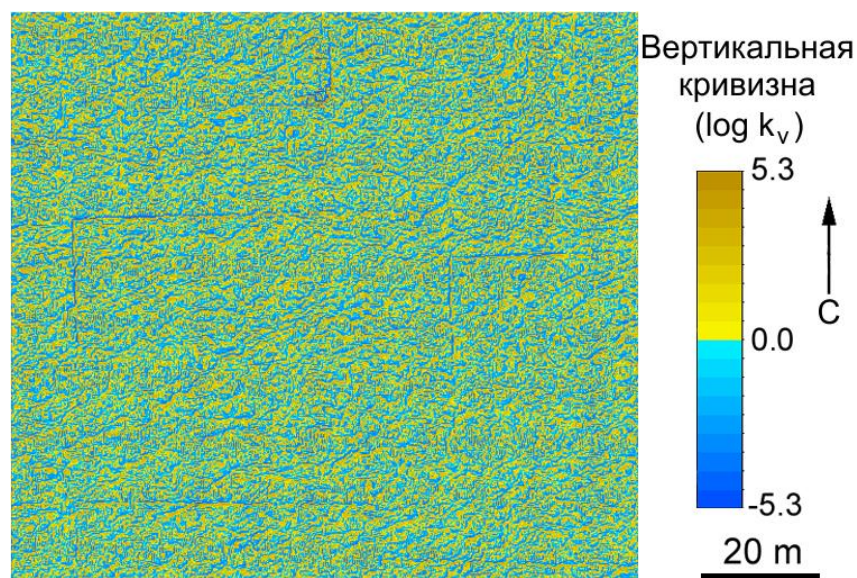


Рисунок 5.13 – Вертикальная кривизна на тестовый полигон (ЦМР с разрешением 25 см). Расположение см. рис. 5.11

5.3.3.2 Оценка эффективности двух способов

Для сравнения двух способов – геоморфометрического и текстурного – использовалась ЦМР с разрешением 1 м. На рис. 5.14 демонстрируется пример отображения трещины на ортофотоплане, ЦМР, карте k_h и карте гомогенности.

Оценку эффективности используемых способов производили на основании вероятности выявления трещин каждым способом, т.е. при условии распознавания каким-либо способом всех 15 трещин, вероятность равнялась 1. В табл. 5.4 представлена подробная информация о выявлении скрытых трещин различными величинами/характеристиками.

С помощью геоморфометрического способа удалось обнаружить 9 из 15 трещин. Применение текстурных характеристик Харалика дало сопоставимый результат: выявлено 10 из 15 трещин. Как и предполагалось, абсолютно все трещины выявлены быть не могут.

Гомогенность показала лучший результат по сравнению с k_h и k_{min} . Однако трещина № 1 была определена только k_h . Следовательно, сравниваемые способы дополняют друг друга.

Вероятность выявления трещин геоморфометрическим способом составляет 0,60; способом текстурных характеристик Харалика – 0,66. Вероятность выявления трещин при совместном использовании двух способов составляет 0,73.

Следует отметить, что среди 15 тестовых трещин, 3 трещины имели ширину менее 1 м (табл. 5.3). В соответствии с первым следствием теоремы Котельникова (см. § 5.3.1), эти трещины априори нельзя было выявить по ЦМР с разрешением 1 м. Следовательно, общее количество трещин необходимо уменьшить до 12-ти (исключить 3 трещины с шириной менее 1 м).

В результате уменьшения общего количества трещин происходит очевидное повышение вероятности: для морфометрических величин до 0,75; а для текстурных характеристик Харалика – до 0,83. Совместное использование обоих способов приводит к повышению вероятности распознавания до 0,91.

Также можно провести сравнение двух способов относительно друг друга. Среди 9-ти трещин, выявленных геоморфометрически, текстурный анализ Харалика позволил выделить 8 трещин; соответственно, вероятность составляет 0,89. С другой стороны, среди 10-ти трещин, распознанных текстурным анализом Харалика, геоморфометрически найдено 8 трещин, т.е. вероятность составляет 0,80.

Высокие значения вероятности (0,80 и 0,89) свидетельствуют о достоверности предположения (см. § 5.3.3.1), что оба способа могут использоваться для выявления скрытых ледниковых трещин.

При дальнейшем анализе ЦМР на всей площади начального участка трассы СГП были выявлены новые скрытые трещины. Обнаружено 18 трещин длиной от 80 м до 1 км, средняя ширина составила 10 м, зафиксированы координаты центроида каждой трещины (табл. 5.5) Расположение вновь выявленных скрытых трещин см. рис. 5.5. Детальное изображение выявленных трещин представлено на рис. 5.15.

Таблица 5.4 – Выявление скрытых трещин разными способами (1 – определена, 0 – не определена)

Номер трещины	Длина, м	Ширина, м	Величины/характеристики		
			k_h	k_{min}	Гомогенность
1	123	1,5	1	0	0
2	77	1,5	1	1	1
3	883	2	1	1	1
4	191	3	1	1	1
5	170	5	1	1	1
6	913	7	0	0	1
7	476	8	1	1	1
8	117	0,5	0	0	0
9	99	0,6	0	0	0
10	644	5	1	1	1
11	247	7	1	1	1
12	501	2	0	1	1
13	300	3	0	0	0
14	155	0,6	0	0	0
15	139	2	0	0	1

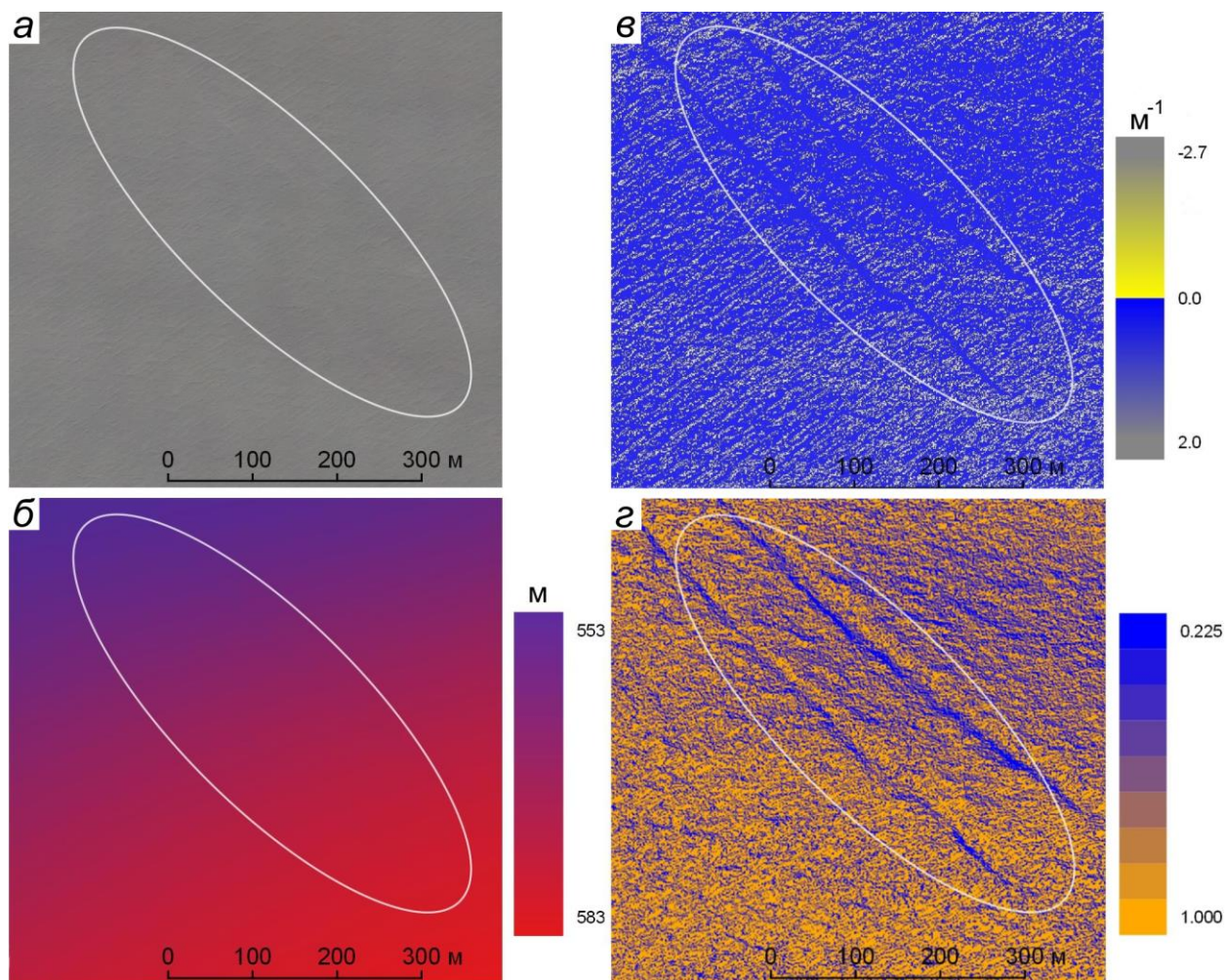


Рисунок 5.14 – Примеры отображения трещин:
a – ортофотоплан, *б* – высоты, *в* – k_h , *г* – гомогенность. Овал показывает положение двух трещин

Таблица 5.5 – Характеристики выявленных скрытых трещин

Номер трещины	Длина, м	Ширина, м	Широта, ю.ш.	Долгота, в.д.
16	319	8	69,46525	76,26893
17	185	6	69,46396	76,28075
18	285	7	69,4626	76,27525
19	85	5	69,46041	76,28082
20	120	2	69,46023	76,28308
21	322	12	69,57285	76,25495
22	1115	10	69,53393	76,28528
23	930	15	69,54094	76,31048
24	175	7	69,56875	76,25538
25	640	20	69,57085	76,37607
26	619	11	69,65806	76,55022
27	232	12	69,65868	76,54793
28	190	12	69,66001	76,54977
29	437	13	69,63652	76,46882
30	423	10	69,63779	76,4677
31	812	15	69,63578	76,46726
32	169	10	69,63518	76,47282
33	471	10	69,63314	76,47313

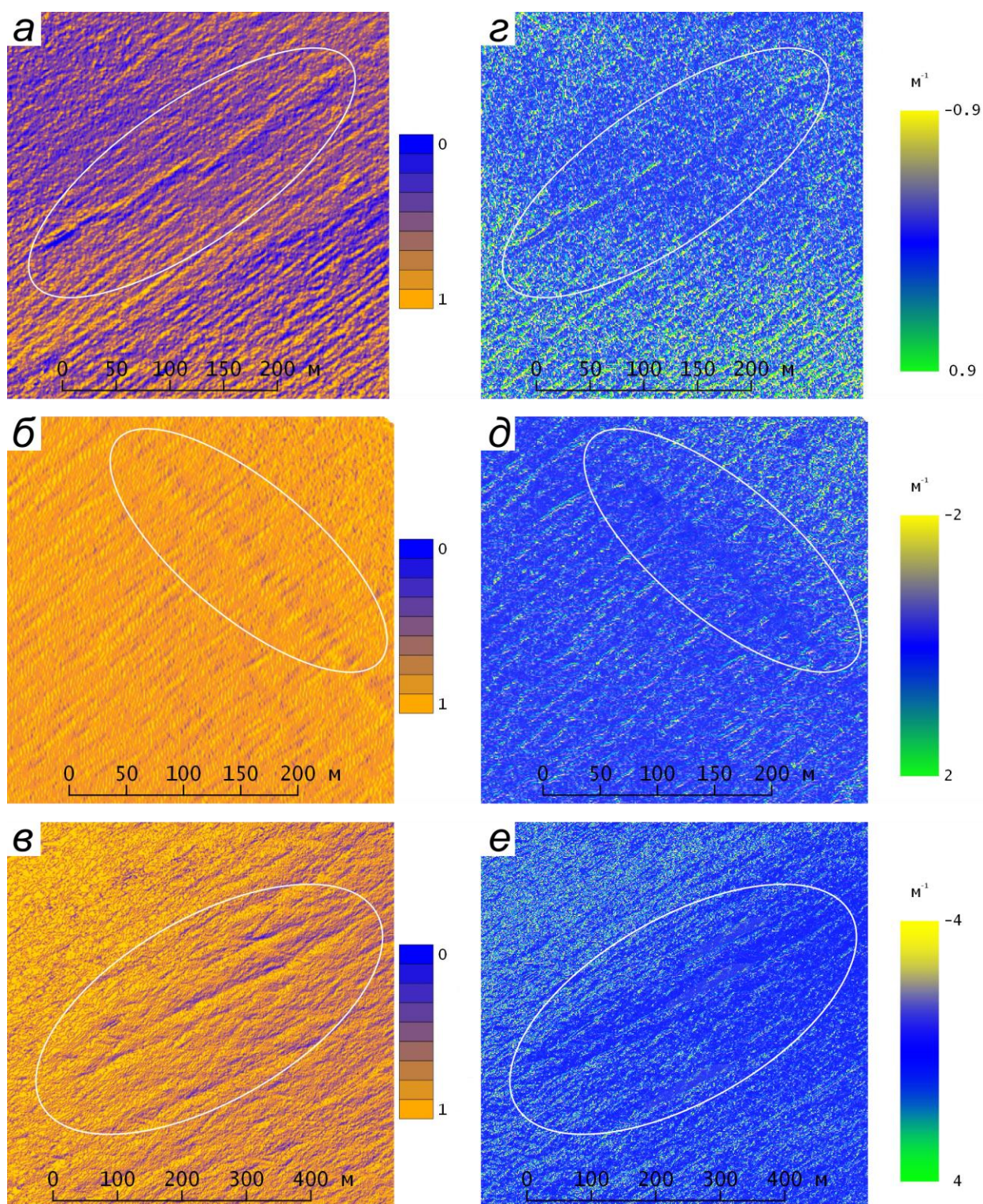


Рисунок 5.15 – Примеры выявленных трещин:

а, б, в – однородность; *г, д, е* – k_h . Овал показывает положение трещины. *а, г* – трещина № 16; *б, д* – трещина № 25; *в, е* – трещины № 31–32. Расположение трещин см. рис. 5.5

Выводы по главе 5

1) Произведена оценка движения льда в районе ВПП аэродрома станции Прогресс и начального участка трассы СГП. Район аэродрома находится на относительно стабильном участке ледника. В то же время начальный участок трассы СГП демонстрирует плавное увеличение скорости движения на юг до 17 см/день. Подобные скорости движения приводят к образованию новых трещин. Следовательно, необходимо организовывать постоянный мониторинг начального участка трассы СГП каждые 2–3 года.

2) В условиях приполярного сплошного оледенения Антарктиды, типичной ситуацией является невозможность выполнения условий планово-высотной подготовки в контексте использования опорных и контрольных точек. Это вызвано соображениями техники безопасности и невозможностью определить стабильные участки на ледяном щите. Использование в качестве опорной информации центров проекций требует разработки независимого метода оценки точности. В основе такого метода может использоваться точность фототриангуляции и проведения специального проверочного полета.

3) Разработан геоморфометрический способ выявления скрытых ледниковых трещин (рис. 5.9). Данный вид трещин представляет наибольшую опасность для исследователей и сотрудников полярных станций. В основе способа находится геоморфометрическое моделирование 16 величин по ЦМР сверхвысокого разрешения. Наилучший результат в выявлении скрытых трещин достигнут при использовании 2-х моделей морфометрических величин – горизонтальной и минимальной кривизн.

4) Выполнена верификация геоморфометрического способа выявления скрытых ледниковых трещин с использованием текстурного анализа Харалика.

5) Произведена оценка эффективности применения разработанного геоморфометрического способа на примере 15 тестовых трещин. Вероятность распознавания скрытых трещин составила 0,75.

ГЛАВА 6

КАТАСТРОФИЧЕСКОЕ ПРОСЕДАНИЕ НА ЛЕДНИКЕ ДОЛК (ВОСТОЧНАЯ АНТАРКТИДА)

В главе описано изучение катастрофического проседания в леднике Долк (Восточная Антарктида) с использованием материалов беспилотной аэрофотосъемки. В § 6.1 сообщается о редкости природных явлений, связанных с образованием больших провалов в ледниках. § 6.2 посвящен полевым и камеральным работам, выполненным в ходе исследования. Оригинальная интерпретация механизма катастрофического проседания в леднике Долк предложена в § 6.3.

6.1 Провалы и ледники

Быстрые и глубокие проседания больших площадей на ледниках являются редкими и слабо изученными явлениями, которые могут быть связаны с поверхностными, внутриледниковыми и подледниковыми гидрологическими процессами [61, 113, 150]. Мониторинг и исследование подобных событий важен для более глубокого понимания процессов, происходящих в криосфере, а также для обеспечения безопасности гляциологов и полярных исследователей, работающих на ледниках. Однако эти явления объективно трудно наблюдать и изучать из-за невозможности предсказать время и место проседания. В связи с этим, и подобные события, и их описание практически не упоминаются в научной литературе, за исключением т.н. «ледяных котлов» в Исландии, вызванных подледной геотермальной и вулканической активностью [61, 87].

Беспилотная аэрофотосъемка – лучшее решение для изучения подобных явлений из-за их внезапности, быстрого развития и обычной удаленности от инфраструктуры.

6.2 Исследование на леднике Долк

Исследование проводилось в районе холмов Ларсеманн (Восточная

Антарктида). На рис. 5.1 показана зона катастрофического проседания (красная рамка).

Утром 30 января 2017 произошло неожиданное проседание ледника Долк. На северо-западной части ледника, с координатами 69°23'58" ю.ш., 76°24'49" в.д., очень быстро образовалась широкая и глубокая ледяная впадина [163].

В рамках аэрофотосъемочных работ 62-ой РАЭ была проведена съемка восточной части холмов Ларсеманн, включая зону проседания ледника площадью около 7,5 км² (рис. 6.1а). Подробное описание аэрофотосъемочных работ 62-ой РАЭ представлено в § 5.2.

Зона проседания ледника была обследована дважды, 20 января и 9 февраля 2017 г, т.е. за десять дней до события и через десять дней после события. Первая съемка зоны проседания была выполнена случайно. Основной целью первой съемки было обновление топографической карты восточной части холмов Ларсеманн. Второй съемка была организована целенаправленно.

Во время аэрофотосъемки северо-западной окраины ледника Долк погода была солнечной. Температура воздуха колебалась от –1°С до –5°С. Ветер северо-восточный, скорость 0–5 м/с на высоте полета 310–350 м над ур. м. Аэрофотосъемка состояла из 20 и 30 полетных маршрутов, включая 1594 и 1011 снимков для первой и второй съемки, соответственно. В первой съемке продольное и поперечное перекрытия составляло 70% и 50%, соответственно. Такие значения обеспечивали тройное перекрытие снимков, гарантирующее отсутствие фотограмметрических «дыр», а также рациональное проведение аэрофотосъемки, предназначенной для топографического картографирования. Вторая съемка проводилась во взаимно перпендикулярных направлениях (крест на крест), оба перекрытия составляли около 85%. Аэрофотоснимки имели среднее пространственное разрешение 6 см/пиксель.

Обработка материалов съемки описана в § 2.3 и § 4.2.3. Точность

фототриангуляции представлена в табл. 5.1. Были получены разновременные наборы данных, состоящие из ЦМР (рис. 6.1*в, г* и рис. 6.3*а*) и ортофотоплана (рис. 6.1*а, б* и рис. 6.3*б, в*) на зону проседания ледника.

Кроме того, руководителем станции Прогресс А.В. Миракиным была проведена беспилотная видеосъемка зоны проседания через час после события (рис. 6.2*б*). Видеосъемка производилась с использованием БАС мультироторного типа DJI Phantom 4, оснащенного видеокамерой.

Для моделирования разрушенной внутриледниковой пещеры (полости), на месте которой образовался провал (рис. 6.4), была рассчитана разность двух ЦМР: ЦМР до события (рис. 6.1*в*) и ЦМР после события (рис. 6.1*г*). Для этих целей было использовано программное обеспечение QGIS. Перед моделированием полости была оценена точность совмещения двух ЦМР с использованием 7 соответствующих точек, которые удалось распознать на обоих наборах данных. В качестве соответствующих точек были выбраны камни на свободных ото льда скалах и элементы ближайших к провалу строений. Ошибки совмещения двух ЦМР в плане (X , Y), по высоте (Z) и стандартное отклонение составили: $X = 0,006 \pm 0,050$ м, $Y = -0,020 \pm 0,058$ м, $Z = 0,056 \pm 0,141$ м.

В ходе моделирования для территории между озером Боулдер и заливом Прюдз (рис. 6.3) была рассчитана русловая сеть поверхностного стока ледника по ЦМР, полученной до обрушения купола внутриледниковой полости (рис. 6.3*а*). При этом использовалась стандартная последовательность процедуры подобных расчетов [149]: 1) гидрологическая коррекция ЦМР путем заполнения впадин; 2) расчет СА по скорректированной ЦМР с помощью алгоритма маршрутизации потоков; 3) выявление русловой сети путем задания пороговых значений СА. Расчеты производились на программном обеспечении SAGA [156].

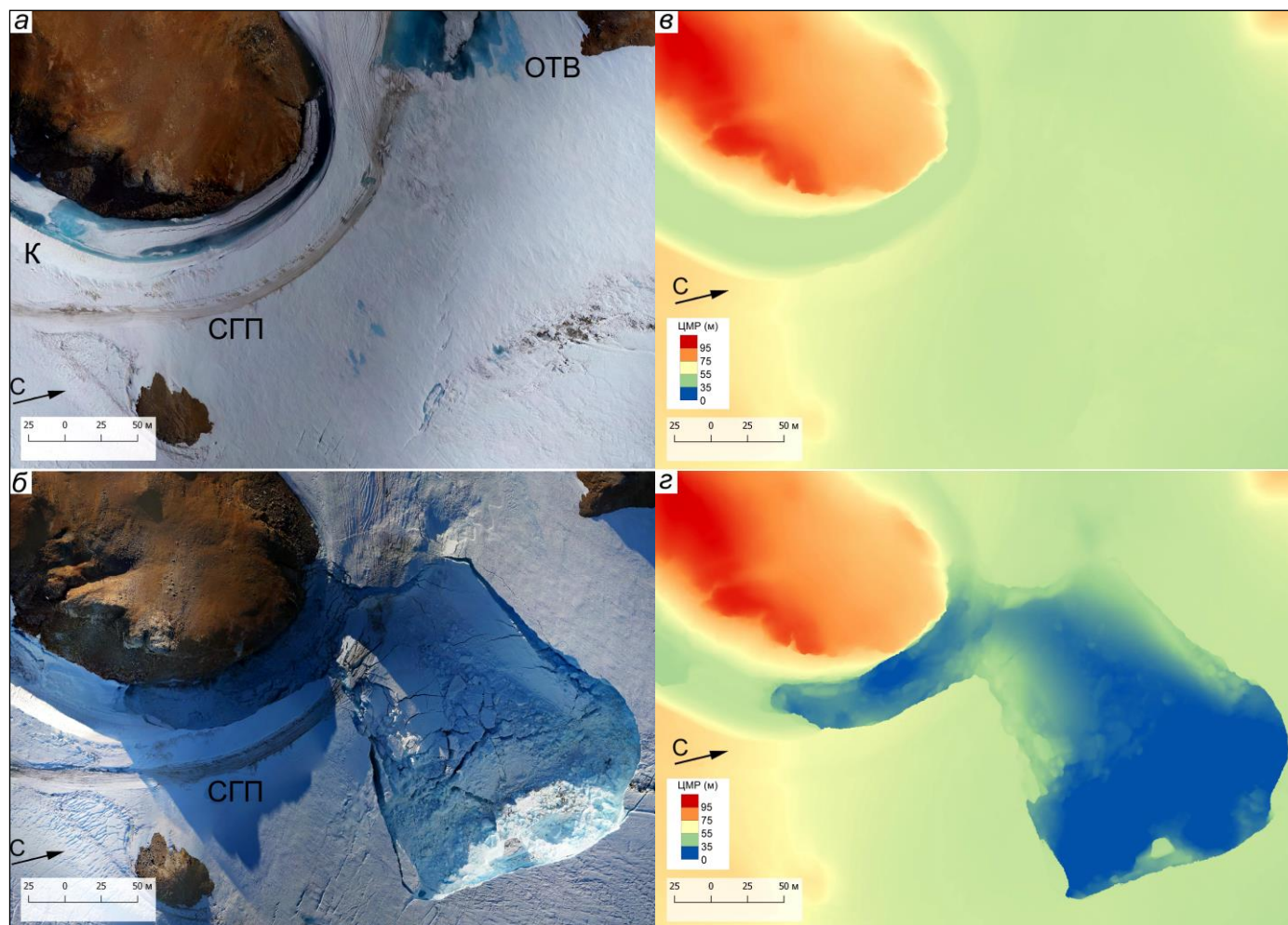


Рисунок 6.1 – Зона проседания в леднике Долк: Ортофотоплан (*а* и *б*) и высоты (*в* и *з*): 10 дней до события (*а* и *в*) и 10 дней после события (*б* и *з*). ОТВ – озеро талой воды, СГП – трасса СГП. Расположение см. рис. 5.1 (красная рамка)

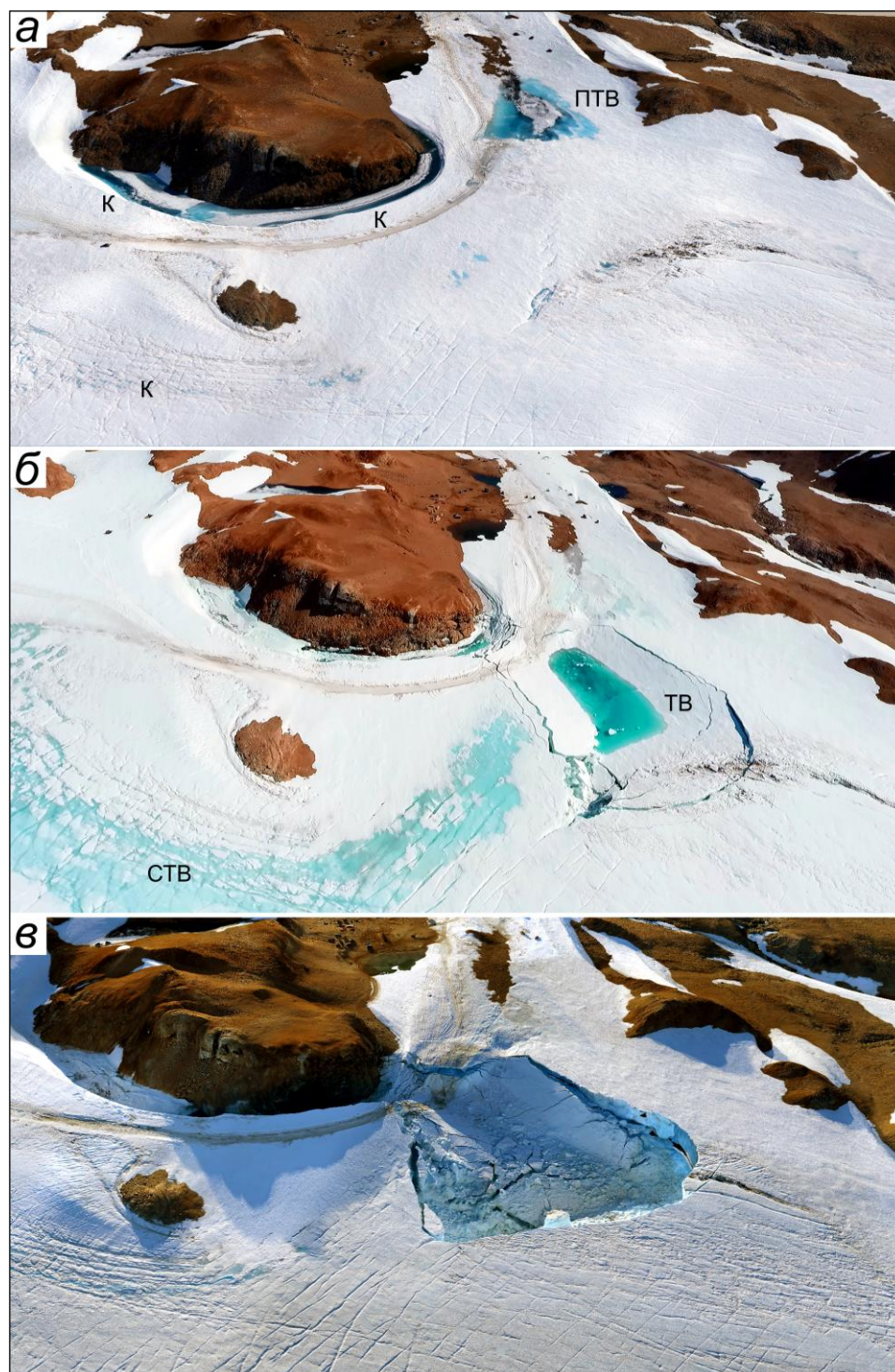


Рисунок 6.2 – Зона проседания в леднике Долг, перспективные изображения: *а* – 10 дней до события; *б* – 1 ч после события; *в* - 10 дней после события. К – дренажный канал, ОТВ – озеро талой воды, СТВ – интенсивный сток талой воды из оз. Боулдер, ТВ – талая вода на куполе пещеры. Изображения *а* и *в* получены с аэрофотоснимков БАС Геоскан 201. Изображение *б* – кадр из видео, сделанного БАС DJI Phantom 4

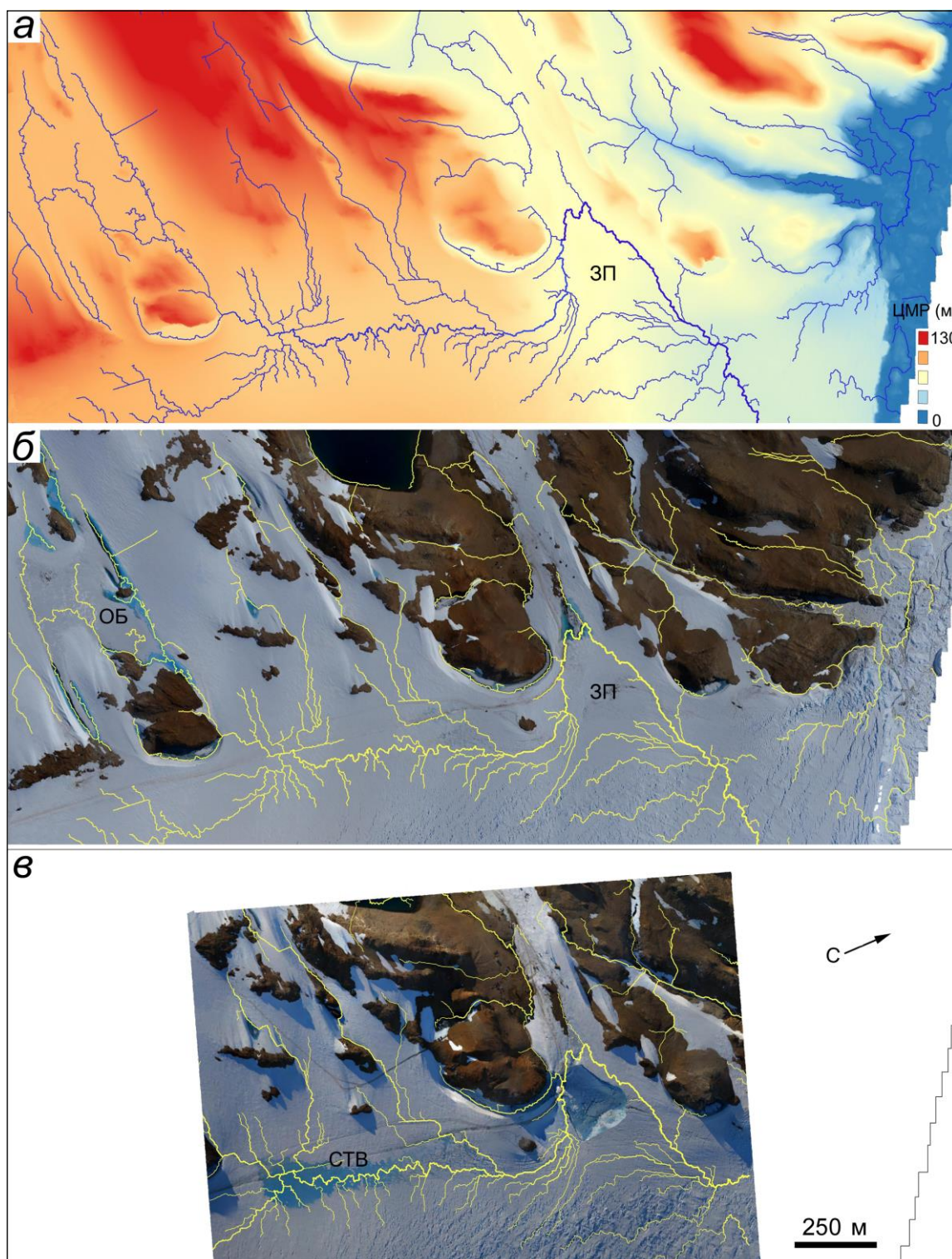


Рисунок 6.3 – Территория между оз. Боулдер и зал. Прюдз с зоной провала. Русловая сеть поверхностного стока (синие и желтые линии) наложены на: карту высот – **a** и ортофотоплан – **б**, полученные за 10 дней до события, и на ортофотоплан, полученный через 10 дней после события – **в**. ЗП – зона провала; ОБ – оз. Боулдер; СТВ – остатки стока талой воды из оз. Боулдер

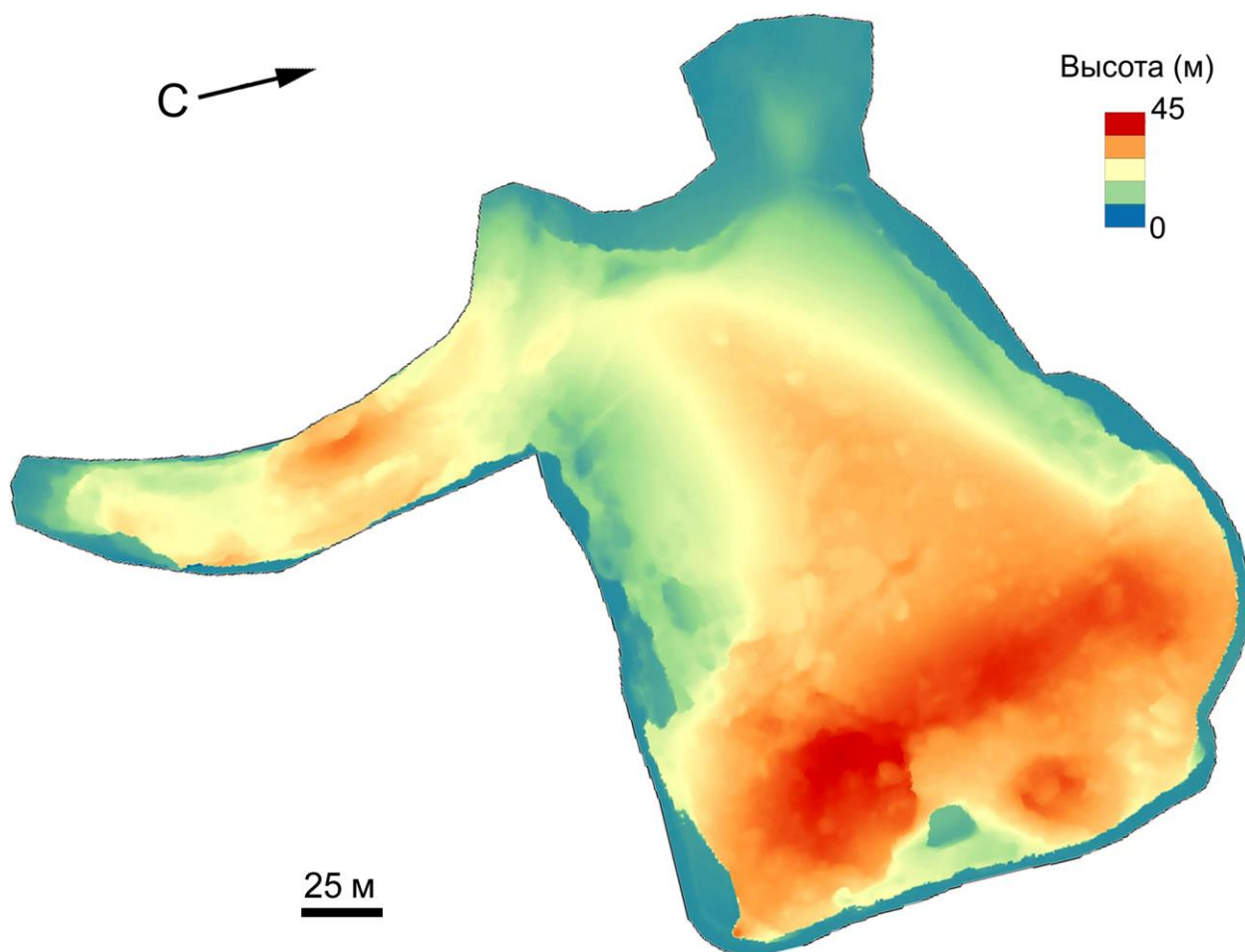


Рисунок 6.4 – Модель внутриледниковой полости до обрушения

6.3 Интерпретация катастрофического проседания

Пространственные данные на зону обрушения ледника (рис. 6.1) наглядно демонстрируют результаты проседания. Провал вписывается в прямоугольник с размерами 183 x 220 м, а его площадь достигла 40 000 м². Максимальная глубина впадины составила 43 м. Приблизительный объем внутриледниковой полости (рис. 6.4) до обрушения составлял около 885 000 м³.

На рис. 6.2 показано развитие просадки ледника. На снимке, сделанном через час после события (рис. 6.2б), видно, что купол внутриледниковой полости обрушился под тяжестью талой воды, которая вытекает из оз. Боулдер (см. подробности ниже). На снимке, сделанном через

десять дней после события, можно найти только остатки этого потока (рис. 6.2в).

На рис. 6.3 показана русловая сеть поверхностного стока ледника между оз. Боулдер и заливом Прюдз, пересекающая зону проседания в леднике Долк.

С.В. Попов и соавт. [163] предположили, что проседание в леднике Долк может быть результатом подледниковых паводков из оз. Боулдер, которое описывается исландским термином – йокульлауп [61, 154]. В рамках 63 РАЭ (2017/2018 гг.) в зоне обрушения и вблизи нее проводились полевые работы, в том числе георадиолокационное профилирование [29, 30]. Авторы интерпретировали некоторые элементы георадиолокационных изображений, как внутриледниковые каналы, соединяющие озеро Боулдер с зоной обрушения. Однако никаких других реальных доказательств этой гипотезы пока не найдено.

Анализ представленных выше данных позволил нам предложить другой, более простой механизм проседания в леднике. Предполагаемая цепочка событий выглядит следующим образом:

- 1) Внутриледниковая пещера (полость) (рис. 6.4) с тонким куполом существовала (задолго) до события. Ледниковые и подледниковые пещеры являются характерными объектами ледников [114]. Пещера образовалась на краю ледника между свободными ото льда скальными образованиями (рис. 6.1–6.3), таким образом, она была изолирована от непрерывного движения ледника Долк в сторону залива Прюдз.

- 2) Существовал канал поверхностного и приповерхностного заснеженного стока талой воды из оз. Боулдер, расположенного в 1,5 км к югу от зоны проседания (рис. 6.3б). Существенно, что этот канал от оз. Боулдер до залива Прюдз огибал ледниковую пещеру (рис. 6.3). Это может свидетельствовать о том, что канал соответствовал приповерхностной системе трещин вокруг купола пещеры.

- 3) За десять дней до события сотрудниками станции Прогресс

наблюдались многочисленные небольшие потоки талой воды между оз. Боулдер и будущей зоной обрушения. Примерно за день до этого события из оз. Боулдер начался интенсивный сток талой воды. Эта вода переполнила уже существовавший канал (рис. 6.2б). Объем воды и скорость ее течения были слишком велики; вода не успевала стекать в сторону залива Прюдз и, как следствие, начала накапливаться на куполе внутриледниковой полости. Это привело к первоначальному обрушению ее купола (рис. 6.2б). После этого талая вода стекла в образовавшуюся на поверхности ледника впадину из небольшого озера талой воды, расположенного к северо-западу от впадины, между свободными ото льда скалами (см. рис. 6.1а, б и рис 6.2а, б). Спустя несколько дней талая вода, скопившаяся на куполе пещеры, завершила обвал пещеры (см. рис. 6.2б, в). В итоге, образовалась обширная и глубокая ледяная депрессия.

Выводы по главе 6

1) Исследование демонстрирует возможности применения БАС для аэрофотосъемки и мониторинга в труднодоступных и опасных районах, при изучении редких природных явлений в суровых условиях полярных регионов.

2) Катастрофическое проседание ледника Долк в 2017 г. представляет научный интерес в контексте изучения эволюции ледников. Полученные с помощью БАС данные свидетельствуют о том, что гидрологические процессы на поверхности льда могут приводить к быстрому и глубокому проседанию большой площади ледников, без вовлечения подледниковых или внутриледниковых потоков воды из подледниковых озер, а также подледниковой геотермальной или вулканической деятельности. Этот вывод может быть перенесен на другие районы, поскольку данное событие, по-видимому, не является специфическим для ледника Долк и Антарктики в целом.

3) Образование провала в леднике разрушило участок трассы СГП от станций Прогресс (Россия) и Чжуньшань (Китай) до аэродрома (рис. 6.1а, б). За несколько часов до обвала по этому участку проехало несколько транспортных средств. Таким образом, изучение подобных явлений важно для обеспечения безопасности людей в Антарктиде, а также на покровных и горных ледниках в других регионах. Очевидна необходимость использования БАС для мониторинга в реальном времени санно-гусеничных трасс.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная методика моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки, которая включает три основных компонента: полевые работы, камеральную обработку полученных материалов и геоморфометрический анализ данных. В разработанную методику входят следующие разделы:

1. Методика беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования.
2. Методика проведения беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников с использованием в качестве опорной информации центров проекции снимков.
3. Геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик по данным разновременной беспилотной аэрофотосъемки (расчет и анализ горизонтальной и вертикальной скорости течения ледника, динамики языка ледника, динамики границы питания и фирновой зоны, а также объема растаявшего снега и льда).
4. Геоморфометрический способ выявления ледниковых трещин по данным беспилотной аэрофотосъемки.

Разработанная методика была успешно апробирована при изучении высокогорных ледников Монгольского Алтая и покровных ледников Антарктики. Ее применение позволило, в частности, исследовать и интерпретировать редкое природное явление – катастрофическое проседание участка ледника Долк (Восточная Антарктида) в январе 2017 г.

Разработанная методика рекомендуется для использования при проведении исследований в области гляциологии и смежных дисциплин в условиях полярного и горного оледенения.

Развитие темы исследования, в ближайшей перспективе, может позволить оценить динамику процессов трещинообразования. Для этого потребуется существенно расширить разновременной набор данных и дополнить его данными наземных геофизических измерений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бляхарский Д.П. Особенности проведения аэрофотосъемочных работ горных и покровных ледников с использованием беспилотных воздушных судов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. – № 6. – С. 650–661.
2. Бляхарский Д.П., Ишалина О.Т., Тюрин С.В. Дешифрирование скрытых ледниковых трещин по материалам беспилотной аэрофотосъемки в районе станции Прогресс (Восточная Антарктида) // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2020. – Т. 64. – № 1. – С. 45–53.
3. Бляхарский Д.П., Волгушева Н.Э., Казаков Э.Э. Мониторинг ледников в сезон абляции с использованием беспилотных аэрофотосъемочных комплексов на примере ледников Потанина и Александры, горный массив Табын-Богдо-Ола (Монголия) // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2019. – Т. 63. – № 2. – С. 168–179.
4. Бойко Е.С. Микрорельеф как фактор формирования снежного покрова в горах: по материалам воздушного лазерного сканирования. – Автореф, к.г.н. – Краснодар: Кубанский государственный университет, 2010. – 24 с.
5. Волгушева Н.Э., Бляхарский Д.П. Расчет различных характеристик ледника в сезон абляции по данным беспилотной аэрофотосъемки с использованием геоинформационных технологий на примере ледников Потанина и Александры // Материалы XVIII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри. – Секции 1–3. – Нерюнгри: СВФУ, 2017. – С. 144–148.
6. Гельман Р.П., Алейников А.А. Цифровая фотокамера как инструмент для измерения скорости движения льда на ледниках // Геодезия и картография. – 2006. – № 7. – С. 25–30.
7. Геоскан 101 Геодезия: [сайт]. – СПб.: Геоскан, 2019. URL:<https://www.geoscan.aero/ru/products/geoscan101/geo>.

8. Геоскан 201 Геодезия: [сайт]. – СПб.: Геоскан, 2019. – <https://www.geoscan.aero/ru/products/geoscan201/geo>.
9. Иноземцев Д.П. Автоматизированная аэрофотосъемка с помощью программно-аппаратного комплекса «GeoScan-PhotoScan» // САПР и ГИС автомобильных дорог. – 2014. – № 1 (2). – С. 46–51.
10. Золотарев Е.А. Эволюция оледенения Эльбруса. Картографо-аэрокосмические технологии гляциологического мониторинга. – М.: Научный мир, 2009. – 235 с.
11. Книжников Ю.Ф. Исследования движения льда горных ледников стереофотограмметрическим методом. – М.: Наука, 1973. – 120 с.
12. Книжников Ю.Ф., Балдина Е.А., Гельман Р.Н. Фотограмметрические технологии мониторинга горных ледников // Геодезия и картография. – 2008. – № 7. – С. 43–51.
13. Книжников Ю.Ф., Гельман Р.П., Поповнин В.В., Жуков В.В. Полевые исследования горных ледников: метрические возможности стереоснимков, полученных цифровыми фотокамерами // Материалы гляциологических исследований. – 2002. – Вып. 92. – С. 216–222.
14. Книжников Ю.Ф., Золотарев Е.А., Кравцова В.И., Харьковец Е.А. Дистанционный мониторинг горных ледников: изменения технологии за последние 50 лет (на примере Эльбруса) // Материалы гляциологических исследований. – 2000. – № 89. – С. 58–64.
15. Коваленко Н.В., Петраков Д.А., Алейников А.А., Аристов К.А., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Черноморец С.С. Гляциологический мониторинг ледника Колка в 2002-2014 гг // Вестник Владикавказского научного центра. – 2015. – Т. 15. – № 4. – С. 43-50.
16. Курков В.М. Опыт работы по тестированию аэрофотосъемочных комплексов на испытательном полигоне МИИГАиК // Геопространственные технологии и сферы их применения (10-я Международная научно-практическая конференция, Москва, 14–15 окт. 2014 г.). – М.: Проспект, 2014. – С. 34–48.

17. Курков В.М., Бляхарский Д.П., Флоринский И.В. Применение беспилотной аэрофотосъемки для геоморфометрического моделирования // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – Т. 60. – № 6. – С. 69–77.

18. Курков В.М., Смирнов А.В., Иноземцев Д.П. Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском геополигоне» МИИГАиК // Геопрофи. – 2014. – № 4. – С. 55–61.

19. Курков В.М., Скрыпицына Т.Н., Журавлев Д.В., Шлотцауер У., Кобзев А.А., Князь В.А., Мишке К. Комплексное обследование археологических памятников с использованием воздушного и наземного зондирования // Экология, экономика, информатика. – Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2018. – С. 151–158.

20. Курков В.М., Чибуничев А.Г., Гречищев А.В. Тестирование аэрофотосъемочных комплексов на испытательном полигоне МИИГАиК при внедрении инновационных технологий в топографо-геодезическое производство // Экология, экономика, информатика. – Т. 3: Геоинформационные технологии и космический мониторинг. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2015. – С. 71–81.

21. Лобанов А.Н. Фотограмметрия. – 2-е изд., перераб. доп. – М.: Недра, 1984. – 552 с.

22. Лукин В.В. Российская антарктическая экспедиция на рубеже веков, Связь времен и поколений // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2014. – Т. 99. – № 1. – С. 22–39.

23. Михайлов А.П., Чибуничев А.Г. Фотограмметрия. – М.: МИИГАиК, 2016. – 293 с.

24. Михайлов А.П., Эдгар Рубен М.А., Мануэль де Хесус П.В. О применении цифровых фотокамер со шторно-щелевым затвором для выполнения аэрофотосъемки с легкомоторных и беспилотных летательных аппаратов // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2013. – № 4. – С.

30–32.

25. Отгонбаяр Д. Современное оледенение Монгольского Алтая (на примере хребтов Мунххайрхан, Сутай, горного узла Цамбагарав). – Барнаул: Бизнес-Коннект, 2013. – 141 с.

26. Петраков Д.А., Аристов К.А., Алейников А.А., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Коваленко Н.В., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Быстрое восстановление ледника Колка (Кавказ) после гляциальной катастрофы 2002 года // Криосфера Земли. – 2018. – Т. 22. – № 1. – С. 58–71.

27. Погорелов А.В. Исследование структуры снегозапасов в горном бассейне и их оценка с применением цифровых моделей рельефа // Материалы гляциологических исследований. – 1999. – Вып. 86. – С. 160–164.

28. Погорелов А.В., Бойко Е.С., Петраков Д.А., Киселев Е.Н. Динамика ледника Фишт (Западный Кавказ) в 1909–2015 гг // Лед и снег. – 2017. – Т. 57. – № 4. – С. 498–506.

29. Попов С.В., Боронина А.С., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Дешевых Г.А. Гидрологические, гляцио-геофизические и геодезические инженерные изыскания в восточной части полуострова Брокнес (Восточная Антарктида, район станции Прогресс) в сезон 63-й РАЭ // Российские полярные исследования. – 2018. – № 1. – С. 24–26.

30. Попов С.В., Боронина А.С., Пряхина Г.В., Григорьева С.Д., Суханова А.А., Тюрин С.В. Прорывы ледниковых и подледниковых озер в районе холмов Ларсеманн (Восточная Антарктида) в 2017–2018 гг // Геориск. – 2018. – Т. 12. – № 3. – С. 56–67.

31. Попов С.В., Пряхин С.С., Бляхарский Д.П., Белков А.Д., Кузнецов В.Л., Кашкевич М.П., Тюрин С.В. Основные результаты инженерных изысканий в районе станций Мирный, Прогресс и полевой базы Молодежная, Восточная Антарктида, в сезон 62-й РАЭ (2016/17 г.) // Проблемы Арктики и Антарктики. – 2017. – Т. 114 – № 4. – С. 86–97.

32. Попов С. В., Поляков С.П. Георадарное лоцирование трещин в районе российских антарктических станций Прогресс и Мирный (Восточная

Антарктида) в сезон 2014/15 года // Криосфера Земли. – 2016. – Т. XX. – № 1. – С. 90–98.

33. Раков Д.Н., Никитин В.Н., Шевчук С.О. Использование неметрических цифровых камер при выполнении аэрогеофизических исследований // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2015. – Т. 4. – № 1. – С. 71–78.

34. Руководство по работе с наземной станцией управления для комплекса Геоскан самолетного типа GeoScan Planner 2.5 Версия 2017.09. – СПб.: Геоскан, 2017. – 117 с.

35. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan Professional Edition, версия 3.4. – СПб.: Agisoft, 2018. – 136 с.

36. Сапожников В.В. По Русскому и Монгольскому Алтаю. – М.: Географгиз, 1949. – 580 с.

37. Семакова Э.Р., Семаков Д.Г. О возможности использования методов дистанционного зондирования Земли при расчетах гляциологических показателей для горных районов Узбекистана // Лед и снег. – 2017. – Т. 57. – № 2. – С. 185–199.

38. Семенов А.Е., Крюков Е.В., Рыкованов Д.П., Семенов Д.А. Практическое применение технологий компьютерного зрения в решении задач распознавания, восстановления 3D, сшивки карт, точного целеуказания, счисления пути и навигации // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – Т. 104 – № 3. – С. 92–102.

39. Суетова И.А., Чистов С.В. Исследования динамики льда Антарктиды с помощью ЭВМ-моделирования // Геодезия и картография. – 1993. – № 3. – С. 45–50.

40. Сыромятина М.В., Курочкин Ю.Н., Чистяков К.В., Аюурзана Ч. Современное состояние и изменения ледников горного массива Табын-Богдо-Ола (Монголия) // Лед и снег. – 2014. – Т. 54. – № 3. – С. 31–38.

41. Флоринский И.В. Иллюстрированное введение в геоморфометрию // Альманах «Пространство и время». – 2016. – Т. 11. – Вып. 1. – С. 1–20.

42. Черноморец С.С., Петраков Д.А., Алейников А.А., Беккиев М.Ю., Висхаджиева К.С., Докунин М.Д., Калов Р.Х., Кидяева В.М., Крыленко В.В., Крыленко И.В., Крыленко И.Н., Рец Е.П., Савернюк Е.А., Смирнов А.М. Прорыв озера Башкара (Центральный Кавказ, Россия) 1 сентября 2017 года // Криосфера Земли – 2018 – Т. 22. – № 2. – С. 70–80.

43. Чибуничев А.Г., Курков В.М., Говоров А.В., Смирнов А.В., Михалин В.А. Исследование точности фототриангуляции с использованием различных методов лабораторной и полевой калибровки // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2016. – № 2. – С. 42–47.

44. Чибуничев А.Г., Михайлов А.П., Старшов В.В. Автоматическое построение плотного облака точек по множеству снимков на основе полуглобального метода отождествления соответственных точек // Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 2. – С. 14–18.

45. Aber J.S., Marzloff I., Ries J. Small-format aerial photography: principles, techniques and geoscience applications. – Amsterdam: Elsevier, 2010. – 266 p.

46. Agishtein M.E., Migdal A.A. Smooth surface reconstruction from scattered data points // Computers and Graphics. – 1991. – V. 15. – № 1. – P. 29–39.

47. Anders N., Masselink R., Keesstra S. Towards digital terrain modeling with unmanned aerial vehicles and SfM point clouds // Geophysical Research Abstracts. – 2015. – V. 17. – EGU2015-12881.

48. Anders N., Masselink R., Keesstra S., Suomalainen J. High-res digital surface modeling using fixed-wing UAV-based photogrammetry // Proceedings of Geomorphometry 2013, Nanjing, China, 16–20 Oct. 2013. – № O-2.

49. Anders N., Seijmonsbergen A., Masselink R., Keesstra S. Ground point filtering of UAV-based photogrammetric point clouds // Geophysical Research Abstracts. – 2016. – V. 18. – EGU2016-17966.

50. Anders N., Smith M., Cammeraat E., Keesstra S. Reproducibility of UAV-based photogrammetric surface models // Geophysical Research Abstracts. –

2016. – V. 18. – EGU2016-17977.

51. Ayoub F., Leprince S., Avouac J.-P. User's guide to COSI-CORR co-registration of optically sensed images and correlation. – Pasadena: California institute of technology, 2014. – 48 p.

52. Bamber J.L., Ekholm S., Krabill W.B. A new, high-resolution digital elevation model of Greenland fully validated with airborne laser altimeter data // Journal of Geophysical Research. – 2001. – V. 106. – № B4. – P. 6733–6745.

53. Bamber J.L., Gomez-Dans J.L., Griggs J.A. A new 1 km digital elevation model of the Antarctic derived from combined satellite radar and laser data – Part 1: Data and methods // Cryosphere. – 2009. – V. 3. – № 1. – P. 101–111.

54. Bartier P.M., Keller C.P. Multivariate interpolation to incorporate thematic surface data using inverse distance weighting (IDW) // Computers and Geosciences. – 1996. – V. 22. – № 7. – P. 795–799.

55. Bash E.A., Moorman B.J., Gunther A. Detecting short-term surface melt on an Arctic glacier using UAV surveys // Remote Sensing. – 2018. – V. 10. – № 10. – # 1547.

56. Bemis S.P., Micklethwaite S., Turner D., James M.R., Akciz S., Thiele S.T., Bangash H.A. Ground-based and UAV-based photogrammetry: a multi-scale, high-resolution mapping tool for structural geology and paleoseismology // Journal of Structural Geology. – 2014. – V. 69. – Pt. A. – P. 163–178.

57. Berthier E., Arnaud Y., Kumar R., Ahmad S., Wagnon P., Chevallier P. Remote sensing estimates of glacier mass balances in the Himachal Pradesh (Western Himalaya, India) // Remote Sensing of Environment. – 2007. – V. 108. – № 3. – P. 327–338.

58. Bhambri R., Bolch T. Glacier mapping: a review with special reference to the Indian Himalayas // Progress in Physical Geography. – 2009. – V. 33. – № 5. – P. 672–704.

59. Bhambri R., Bolch T., Chaujar R.K. Mapping of debris-covered

glaciers in the Garhwal Himalayas using ASTER DEMs and thermal data // International Journal of Remote Sensing. – 2011. – V. 32. – № 23. – P. 8095–8119.

60. Bhardwaj A., Sam L., Akanksha, Martín-Torres F.J., Kumar R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: present applications and future prospects // Remote Sensing of Environment. – 2016. – V. 175. – P. 196–204.

61. Björnsson H. Subglacial lakes and jökulhlaups in Iceland // Global and Planetary Change. – 2003. – V. 35. – № 3–4. – P. 255–271.

62. Bliakharskii D., Florinsky I. Unmanned aerial survey for modelling glacier topography in Antarctica: first results // Proceedings of the 4th International conference on geographical information systems theory, applications and management (GISTAM 2018), 17–19 March 2018, Funchal, Portugal. – Setúbal: Scitepress, 2018. – P. 319–326.

63. Bliakharskii D.P., Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N. Modelling glacier topography in Antarctica using unmanned aerial survey: assessment of opportunities // International Journal of Remote Sensing. – 2019. – V. 40. – № 7. – P. 2517–2541.

64. Broknes Peninsula, Larsemann Hills. Environment management map, scale 1:10,000. – Kingston: Department of the environment and heritage, Australian Antarctic division, 2005. – 1 chart.

65. Brunier G., Fleury J., Anthony E.J., Gardel A., Dussouillez P. Close-range airborne structure-from-motion photogrammetry for high-resolution beach morphometric surveys: examples from an embayed rotating beach // Geomorphology. – 2016. – V. 261. – P. 76–88.

66. Cajthaml J. Polynomial georeferencing method for old map series // SGEM 2013: Proceedings of 13th International multidisciplinary scientific geoconference, 16–22 June 2013, Albena, Bulgaria. – Sofia, 2013. – V. 1. – P. 859–866.

67. Carrivick J.L., Smith M.W., Quincey D.J. Structure from motion in the geosciences. – Chichester: Wiley, 2016. – 197 p.

68. Chen T., Catrysse P.B., El Gamal A., Wandell B.A. How small should

pixel size be? // *Proceedings of SPIE*. – 2000. – V. 3965. – P. 451–459.

69. Chen S., Wang Y., Chen F. A study of differential GPS positioning accuracy // *ICMMT 2002: Proceedings of the 3rd International conference on microwave and millimeter wave technology*, 17–19 Aug. 2002, Beijing, China. – New York: IEEE, 2002. – P. 361–364.

70. Chudley T.R., Christoffersen P., Doyle S.H., Abellan A., Snooke N. High accuracy UAV photogrammetry of ice sheet dynamics with no ground control // *Cryosphere*. – 2019. – V. 13. – № 3. – P. 955–968.

71. Chiang K.W., Tsai M.L., Chu C.H. The development of an UAV borne direct georeferenced photogrammetric platform for ground control point free applications // *Sensors*. – 2012. – V. 12. – № 7. – P. 9161–9180.

72. Clapuyt F., Vanacker V., van Oost K. Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on structure-from-motion algorithms // *Geomorphology*. – 2016. – V. 260. – P. 4–15.

73. Colgan W., Rajaram H., Abdalati W., McCutchan C., Mottram R., Moussavi M.S., Grigsby S. Glacier crevasses: observations, models, and mass balance implications // *Reviews of Geophysics*. – 2016. – V. 54. – № 1. – P. 119–161.

74. Colomina I., Molina P. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: a review // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – V. 92. – P. 79–97.

75. Crocker R.I., Maslanik J.A., Adler J.J., Palo S.E., Herzfeld U.C., Emery W.J. A sensor package for ice surface observations using small unmanned aircraft systems // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2011. – V. 50. – № 4. – P. 1033–1047.

76. D'Oleire-Oltmanns S., Marzloff I., Peter K.D., Ries J.B. Unmanned aerial vehicle (UAV) for monitoring soil erosion in Morocco // *Remote Sensing*. – 2012. – V. 4. – № 11. – P. 3390–3416.

77. Dąbski M., Zmarz A., Pabjanek P., Korczak-Abshire M., Karsznia I., Chwedorzewska K.J. UAV-based detection and spatial analyses of periglacial

landforms on Demay Point (King George Island, South Shetland Islands, Antarctica) // *Geomorphology*. – 2017. – V. 290. – P. 29–38.

78. DiMarzio J.P., Brenner A.C., Fricker H.A., Schutz B.E., Shuman C.A., Zwally H.J. Digital elevation models of the Antarctic and Greenland ice sheets from ICESat // American Geophysical Union, Fall Meeting 2005. – # C51B-0276.

79. Dowling T.I., Gallant J.C. High resolution DEMs from unmanned aerial vehicles // 20th International congress on modelling and simulation, 1–6 Dec. 2013, Adelaide, Australia. – Modelling and simulation society of Australia and New Zealand. – P. 1603–1609.

80. Eisenbeiß H. UAV photogrammetry. – Zurich: Institut für geodäsie und photogrammetrie, eidgenössische technische hochschule, 2009. – 199 p.

81. Eltner A., Schneider D. Analysis of different methods for 3D reconstruction of natural surfaces from parallel-axes UAV images // *Photogrammetric Record*. – 2015. – V. 30. – № 151. – P. 279–299.

82. Eltner A., Kaiser A., Castillo C., Rock G., Neugirg F., Abellán A. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments // *Earth Surface Dynamics*. – 2016. – V. 4. – № 2. – P. 359–389.

83. Etzelmüller B. On the quantification of surface changes using grid-based digital elevation models (DEMs) // *Transactions in GIS*. – 2000. – V. 4. – № 2. – P. 129–143.

84. Etzelmüller B., Björnsson H. Map analysis techniques for glaciological applications // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2000. – V. 14. – № 6. – P. 567–581.

85. Etzelmüller B., Sollid J.L. Glacier geomorphometry – An approach for analysing long-term glacier surface changes using grid-based digital elevation models // *Annals of Glaciology*. – 1997. – V. 24. – P. 135–141.

86. Evans I.S. General geomorphometry, derivations of altitude, and descriptive statistics // *Spatial Analysis in Geomorphology*. – London: Methuen, 1972. – P. 17–90.

87. Evatt G.W., Fowler A.C. Cauldron subsidence and subglacial floods // *Annals of Glaciology*. – 2007. – V. 45. – P. 163–168.
88. Ewertowski M.W., Tomczyk A.M., Evans D.J.A., Roberts D.H., Ewertowski W. Operational framework for rapid, very-high resolution mapping of glacial geomorphology using low-cost unmanned aerial vehicles and structure-from-motion approach // *Remote Sensing*. – 2019. – V. 11. – # 65.
89. Florinsky I.V. Errors of signal processing in digital terrain modelling // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2002. – V. 16. – № 5. – P. 475–501.
90. Florinsky I.V. Computation of the third-order partial derivatives from a digital elevation model // *International Journal of Geographical Information Science*. – 2009. – V. 23. – № 2. – P. 213–231.
91. Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. – 2nd ed. – Amsterdam: Academic Press, 2016. – 486 p.
92. Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry // *Progress in Physical Geography*. – 2017. – V. 41. – № 6. – P. 723–752.
93. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P. Crevasse detection by geomorphometric modelling of data from unmanned aerial survey // *Theory and methods of polar science: Proceedings of International youth scientific conference on the polar geodesy, glaciology, hydrology and geophysics, 17–19 May 2018, St. Petersburg*. – St. Petersburg, 2018. – P. 247–255.
94. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P. Detection of crevasses by geomorphometric treatment of data from unmanned aerial surveys // *Remote Sensing Letters*. – 2019. – V. 10. – № 4. – P. 323–332.
95. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P. The 2017 catastrophic subsidence in the Dǎlk Glacier, East Antarctica: unmanned aerial survey and terrain modelling // *Remote Sensing Letters*. – 2019. – V. 10. – № 4. – 333–342.
96. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P., Popov S.V., Pryakhin S.S. The 2017 catastrophic subsidence in the Dǎlk Glacier: unmanned aerial survey and digital terrain analysis // *PeerJ Preprints*. – 2018. – V. 6. – e27064v1. – 4 p.

97. Florinsky I.V., Kurkov V.M., Bliakharskii D.P. Geomorphometry from unmanned aerial surveys // Transactions in GIS. – 2018. – V. 22. – № 1. – P. 58–81.
98. Florinsky I.V., Pankratov A.N. A universal spectral analytical method for digital terrain modeling // International Journal of Geographical Information Science. – 2016. – V. 30. – № 12. – P. 2506–2528.
99. Fonstad M.A., Dietrich J.T., Courville B.C., Jensen J.L., Carbonneau P.E. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement // Earth Surface Processes and Landforms. – 2013. – V. 38. – № 4. – P. 421–430.
100. Fox A.J., Cziferszky A. Unlocking the time-capsule of historic aerial photography to measure changes in Antarctic Peninsula glaciers // Photogrammetric Record. – 2008. – V. 23. – № 121. – P. 51–68.
101. Fox A.J., Gooch M.J. Automatic DEM generation for Antarctic terrain // Photogrammetric Record. – 2001. – V. 17. – № 98. – P. 275–290.
102. Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., et al. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // Cryosphere. – 2013. – V. 7. – № 1. – P. 375–393.
103. Funaki M., Hirasawa N. Outline of a small unmanned aerial vehicle (Ant-Plane) designed for Antarctic research // Polar Science. – 2008. – V. 2. – № 2. – P. 129–142.
104. Funaki M., Higashino S. I., Sakanaka S., Iwata N., Nakamura N., Hirasawa N., Kuwabara M. Small unmanned aerial vehicles for aeromagnetic surveys and their flights in the South Shetland Islands, Antarctica // Polar Science – 2014. – V. 8. – № 4. – P. 342–356.
105. Gabrlik P., La Cour-Harbo A., Zalud L., Janata P. Calibration and accuracy assessment in a direct georeferencing system in UAS photogrammetry // International Journal of Remote Sensing. – 2018. – V. 39. – № 15–16. – P. 4931–4959.
106. Gandolfi S., Tavasci L., Poluzzi L. Improved PPP performance in

regional networks // GPS Solutions. – 2016. – V. 20. – № 3. – P. 485–497.

107. Gao Y., Shen X. A new method for carrier-phase-based precise point positioning // Navigation. – 2002. – V. 49. – № 2. – P. 109–116.

108. Goetzendorf-Grabowski T., Rodzewicz M. Design of UAV for photogrammetric mission in Antarctic area // Journal of Aerospace Engineering. – 2017. – V. 231. – № 9. – P. 1660–1675.

109. Gómez-Gutiérrez Á., de Sanjosé-Blasco J.J., Lozano-Parra J., Berenguer-Sempere F., de Matías-Bejarano J. Does HDR pre-processing improve the accuracy of 3D models obtained by means of two conventional SfM-MVS software packages? The case of the Corral del Veleta Rock Glacier // Remote Sensing. – 2015. – V. 7. – № 8. – P. 10269–10294.

110. Graham R., Koh A. Digital aerial survey: theory and practice. – Latheronwheel: Whittles Publishing, 2002. – 247 p.

111. Groh A., Ewert H., Rosenau R., Fagiolini E., Gruber C., Floricioiu D., Abdel Jaber W., Linow S., Flechtner F., Eineder M., Dierking W., Dietrich R. Mass, volume and velocity of the Antarctic ice sheet: present-day changes and error effects // Surveys in Geophysics. – 2014. – V. 35. – № 6. – P. 1481–1505.

112. Gross J.W., Heumann B.W. A statistical examination of image stitching software packages for use with unmanned aerial systems // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2016. – V. 82. – № 6. – P. 419–425.

113. Gudmundsson M.T., Sigmundsson F., Björnsson H. Ice–volcano interaction of the 1996 Gjálp subglacial eruption, Vatnajökull, Iceland // Nature. – 1997. – V. 389. – № 6654. – P. 954–957.

114. Gulley J.D., Fountain A.G. Glacier caves // Encyclopedia of caves. – 2nd ed. – Amsterdam: Academic Press. – 2012. – P. 353–357.

115. Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I. Textural features for image classification // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. – 1973. – V. SMC-3. – № 6. – P. 610–621.

116. Helm V., Humbert A., Miller H. Elevation and elevation change of

Greenland and Antarctica derived from CryoSat-2 // Cryosphere. – 2014. – V. 8. – № 4. – P. 1539–1559.

117. Hengl T., Reuter H.I. (Eds.), Geomorphometry: concepts, software, applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – 796 p.

118. Higashino S., Funaki M., Hirasawa N., Hayashi M., Nagasaki S. Development and operational experiences of UAVs for scientific research in Antarctica // Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering. – 2013. – V. 65. – P. 159–173.

119. Hirschmüller H. Stereo processing by semiglobal matching and mutual information // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2008. – V. 30. – № 2. – P. 328–341.

120. Hodson A., Anesio A. M., Ng F., Watson R., Quirk J., Irvine-Fynn T., Sattler B. A glacier respire: Quantifying the distribution and respiration CO₂ flux of cryoconite across an entire Arctic supraglacial ecosystem // Journal of Geophysical Research. – 2007. – V. 112. – # G04S36.

121. Hugenholtz C.H., Whitehead K., Brown O.W., Barchyn T.E., Moorman B.J., LeClair A., Riddell K., Hamilton T. Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model // Geomorphology. – 2013. – V. 194. – P. 16–24.

122. Hugenholtz C. H, Brown O., Walker J., Barchyn T., Nesbit P., Kucharczyk M., Myshak S. Spatial accuracy of UAV-derived orthoimagery and topography: comparing photogrammetric models processed with direct georeferencing and ground control points // Geomatica. – 2016. – V. 70. – № 1. – P. 21–30.

123. Immerzeel W.W., Kraaijenbrink P.D.A., Shea J.M., Shrestha A.B., Pellicciotti F., Bierkens M.F.P., de Jong S.M. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles // Remote Sensing of Environment. – 2014. – V. 150. – P. 93–103.

124. Inoue J., Curry J., Maslanik J. Application of Aerosondes to melt-

pond observations over Arctic sea ice // Journal of Atmospheric and Oceanic Technology. – 2008. – V. 25. – № 2. – P. 327–334.

125. James M.R., Robson S. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks // Earth Surface Processes and Landforms. – 2014. – V. 39. – № 10. – P. 1413–1420.

126. Jeziorska J., Mitasova H., Petrasova A., Petras V., Divakaran D., Zajkowski T. Overland flow analysis using time series of sUAS-derived elevation models // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 3. – № 8. – P. 159–166.

127. Johnson K., Nissen E., Saripalli S., Arrowsmith J.R., McGarey P., Scharer K., Williams P., Blisniuk K. Rapid mapping of ultrafine fault zone topography with structure from motion // Geosphere. – 2014. – V. 10. – № 5. – P. 969–986.

128. Jouvét G., Weidmann Y., Seguinot J., Funk M., Abe T., Sakakibara D., Seddik H., Sugiyama S. Initiation of a major calving event on the Bowdoin Glacier captured by UAV photogrammetry // Cryosphere. – 2017. – V. 11. – P. 911–921.

129. Kääb A. Glacier volume changes using ASTER satellite stereo and ICESat GLAS laser altimetry. A test study on Edgeøya, Eastern Svalbard // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – V. 46. – № 10. – P. 2823–2830.

130. Kääb A., Huggel C., Fischer L., Guex S., Paul F., Roer I., Salzmann N., Schläefli S., Schmutz K., Schneider D., Strozzi T., Weidmann Y. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains: an overview // Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2005. – V. 5. – № 4. – P. 527–554.

131. Kadnichansky S. A., Kurkov M. B., Kurkov V. M., Chibunichev A. G., Trubina L. K. Results of researches on photogrammetric calibration of the SONY CYBER-SHOT DSC-RX1RM2 camera // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 2–3

December 2019, Strasbourg, France. – 2019. – V. XLII-2/W18. – P. 73–77.

132. Kadota T., Davaa G., Kalsan P., Namgur D., Ohata T. Glaciological research in the Mongolian Altai, 2003–2009 // *Bulletin of Glaciological Research*. – 2011. – V. 29. – P. 41–50.

133. Konya K., Kadota T., Davaa G., Yabuki H., Ohata T. Meteorological and ablation features of Potanin Glacier, Mongolian Altai // *Bulletin of Glaciological Research*. – 2010. – V. 28. – P. 7–16.

134. Konya K., Kadota T., Nakazawa F., Davaa G., Purevdagva K., Yabuki H., Ohata T. Surface mass balance of the Potanin Glacier in the Mongolian Altai Mountains and comparison with Russian Altai glaciers in 2005, 2008, and 2009 // *Bulletin of Glaciological Research*. – 2013. – V. 31. – P. 9–18.

135. Kraaijenbrink P.D.A., Meijer S.W., Shea J.M., Pellicciotti F., De Jong S.M., Immerzeel W.W. Seasonal surface velocities of a Himalayan glacier derived by automated correlation of unmanned aerial vehicle imagery // *Annals of Glaciology*. – 2016. – V. 57. – № 71. – P. 103–113.

136. Kršák B., Blišťan P., Paulíková A., Puškárová P., Kovanič L., Palková J., Zelizňáková V. Use of low-cost UAV photogrammetry to analyze the accuracy of a digital elevation model in a case study // *Measurement*. – 2016. – V. 91. – P. 276–287.

137. Larsemann Hills, East Antarctica: Antarctic specially managed area management plan. Measure 15 // *Antarctic treaty consultative meeting (ATCM) XXXVII final report*. – 2014. – P. 277–309.

138. Leitão J.P., Moy de Vitry M., Scheidegger A., Rieckermann J. Assessing the quality of digital elevation models obtained from mini unmanned aerial vehicles for overland flow modelling in urban areas // *Hydrology and Earth System Sciences*. – 2016. – V. 20. – № 4. – P. 1637–1653.

139. Leuschen C., Hale R., Keshmiri S., Yan J. B., Rodriguez-Morales F., Mahmood A., & Gogineni S. UAS-based radar sounding of the polar ice sheets // *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*. – 2014. – V. 2. – № 1. – P. 8–17.

140. Li Z., Zhu Q., Gold C. Digital terrain modeling: principles and methodology. – New York: CRC Press, 2005. – 323 p.

141. Lindsay J.B., Evans M.G. The influence of elevation error on the morphometrics of channel networks extracted from DEMs and the implications for hydrological modelling // *Hydrological Processes*. – 2008. – V. 22. – № 11. – P. 1588–1603.

142. Lucieer A., de Jong S.D., Turner D. Mapping landslide displacements using structure from motion (SfM) and image correlation of multi-temporal UAV photography // *Progress in Physical Geography*. – 2014. – V. 38. – № 1. – P. 97–116.

143. Lucieer A., Turner D., King D.H., Robinson S.A. Using an unmanned aerial vehicle (UAV) to capture micro-topography of Antarctic moss beds // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2014. – V. 27. – Pt. A. – P. 53–62.

144. Luhmann T., Robson S., Kyle S., Boehm J. (Eds.) Close-range photogrammetry and 3D imaging. – 2nd ed. – Berlin: De Gruyter, 2013. – 684 p.

145. Magnet Office Tools user manual 1.0. – Topcon positioning systems, 2012. – 185 p.

146. Mancini F., Dubbini M., Gattelli M., Stecchi F., Fabbri S., Gabbianelli G. Using unmanned aerial vehicles (UAV) for high-resolution reconstruction of topography: the structure from motion approach on coastal environments // *Remote Sensing*. – 2013. – V. 5. – № 12. – P. 6880–6898.

147. Mandelbrot B. How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension // *Science*. – 1967. – V. 156. – № 3775. – P. 636–638.

148. Martín-Español A., Zammit-Mangion A., Clarke P.J., Flament T., Helm V., King M.A., Luthcke S.B., Petrie E., Rémy F., Schön N., Wouters B., Bamber J.L. Spatial and temporal Antarctic ice sheet mass trends, glacio-isostatic adjustment, and surface processes from a joint inversion of satellite altimeter, gravity, and GPS data // *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*. – 2016. –

V. 121. – № 2. – P. 182–200.

149. Martz L.W., de Jong E. CATCH: a Fortran program for measuring catchment area from digital elevation models // Computers and Geosciences. – 1988. – V. 14. – № 5. – P. 627–640.

150. Menzies J. (Ed.) Modern and past glacial environments. – Rev. student ed. – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. – 543 p.

151. Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // Hydrological Processes. – 1991. – V. 5. – № 1. – P. 3–30.

152. Nagarajoo K., Fah C.S. Significant of Earth's magnetic field and ionospheric horizontal gradient to GPS signals // 2013 IEEE International conference on space science and communication (IconSpace), 1–3 July 2013, Melaka, Malaysia. – New York: IEEE. – 2013. – P. 110–114.

153. Nex F., Remondino F. UAV for 3D mapping applications: a review // Applied Geomatics. – 2013. – V. 6. – № 1. – P. 1–15.

154. Nye J.F. Water flow in glaciers: jökulhlaups, tunnels and veins // Journal of Glaciology. – 1976. – V. 17. – № 76. – P. 181–207.

155. Oerlemans J. Glaciers and climate change. – Lisse: A.A. Balkema publishers, 2001. – 160 p.

156. Olaya V., Conrad O. Geomorphometry in SAGA // Geomorphometry: concepts, software, applications. – Amsterdam: Elsevier, 2009. – P. 293–308.

157. Pajares G. Overview and current status of remote sensing applications based on unmanned aerial vehicles (UAVs) // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 2015. – V. 81. – № 4. – P. 281–329.

158. Peppas M.V., Mills J.P., Moore P., Miller P.E., Chambers J.E. Accuracy assessment of a UAV-based landslide monitoring system // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – V. 41. – № B5. – P. 895–902.

159. Petras V., Petrasova A., Jeziorska J., Mitsova H. Processing UAV and LIDAR point clouds in Grass GIS // International Archives of the

Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2016. – V. XLI. – Pt. B7. – P. 945–952.

160. Pfeifer N., Glira P., Briese C. Direct georeferencing with on board navigation components of light weight UAV platforms // International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2012. – V. 39. – № B7. – P. 487–492.

161. Podgórski J., Kinnard C., Pętliski M., Urrutia R. Performance assessment of TanDEM-X DEM for mountain glacier elevation change detection // Remote Sensing. – 2019. – V. 11. – № 2. – # 187.

162. Pope A., Murray T., Luckman A. DEM quality assessment for quantification of glacier surface change // Annals of Glaciology. – 2007. – V. 46. – P. 189–194.

163. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dălk Glacier, East Antarctica // Ice and Snow. – 2017. – V. 57. – № 3. – P. 427–432.

164. Racoviteanu A.E., Manley W.F., Arnaud Y., Williams M.W. Evaluating digital elevation models for glaciologic applications: an example from Nevado Coropuna, Peruvian Andes // Global and Planetary Change. – 2007. – V. 59. – № 1–4. – P. 110–125.

165. Raymond C.A., Behar A.E. An uninhabited aerial vehicle (UAV) concept for low-altitude geophysical exploration in Antarctica // American Geophysical Union, Spring meeting. – 2004. – # U24A-06.

166. Reshetyuk Y., Mårtensson S.-G. Generation of highly accurate digital elevation models with unmanned aerial vehicles // Photogrammetric Record. – 2016. – V. 31. – № 154. – P. 143–165.

167. Rignot E., Mouginot J., Scheuchl B. Ice flow of the Antarctic ice sheet // Science. – 2011. – V. 333. – № 6048. – P. 1427–1430.

168. Rippin D.M., Willis I., Arnold N., Hodson A., Moore J., Kohler J., Björnsson H. Changes in geometry and subglacial drainage of Midre Lovénbreen, Svalbard, determined from digital elevation models // Earth Surface Processes and

Landforms. – 2003. – V. 28. – № 3. – P. 273–298.

169. Rippin D.M., Pomfret A., King N. High resolution mapping of supra-glacial drainage pathways reveals link between micro-channel drainage density, surface roughness and surface reflectance // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2015. – V. 40. – № 10. – P. 1279–1290.

170. Rossini M., Di Mauro B., Garzonio R., Baccolo G., Cavallini G., Mattavelli M., De Amicis M., Colombo R. Rapid melting dynamics of an alpine glacier with repeated UAV photogrammetry // *Geomorphology*. – 2018. – V. 304. – P. 159–172.

171. Ryan J.C., Hubbard A.L., Box J.E., Todd J., Christoffersen P., Carr J.R., Holt T.O., Snooke N. UAV photogrammetry and structure from motion to assess calving dynamics at Store Glacier, a large outlet draining the Greenland ice sheet // *Cryosphere*. – 2015. – V. 9. – № 1. – P. 1–11.

172. Semakova E., Bühler Y. TerraSAR-X/TanDEM-X data for natural hazards research in mountainous regions of Uzbekistan // *Journal of Applied Remote Sensing*. – 2017. – V. 11. – № 3. – # 036024.

173. Shahbazi M., Sohn G., Théau J., Menard P. Development and evaluation of a UAV-photogrammetry system for precise 3D environmental modeling // *Sensors*. – 2015. – V. 15. – № 11. – P. 27493–27524.

174. Shahbazi M., Théau J., Ménard P. Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management // *GIScience & Remote Sensing*. – 2014. – V. 51. – № 4. – P. 339–365.

175. Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures // *Mathematical Geology*. – 1995. – V. 27. – № 3. – P. 373–390.

176. Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // *Geoderma*. – 2002. – V. 107. – № 1–2. – P. 1–32.

177. Seier G., Kellerer-Pirklbauer A., Wecht M., Hirschmann S., Kaufmann V., Lieb G.K., Sulzer W. UAS-based change detection of the glacial

and proglacial transition zone at Pasterze Glacier, Austria // *Remote Sensing*. – 2017. – V. 9. – # 549.

178. Smith M.J., Chandler J., Rose J. High spatial resolution data acquisition for the geosciences: kite aerial photography // *Earth Surface Processes and Landforms*. – 2009. – V. 34. – № 1. – P. 155–161.

179. Smith M.W., Carrivick J.L., Quincey D.J. Structure from motion photogrammetry in physical geography // *Progress in Physical Geography*. – 2016. – V. 40. – № 2. – P. 247–275.

180. Solbøa S., & Storvolda R. Mapping Svalbard glaciers with the Cryowing UAS // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2013. – V. XL-1/W2. – P. 373–374.

181. Snavely N., Seitz S.M., Szeliski R. Modeling the world from internet photo collections // *International Journal of Computer Vision*. – 2008. – V. 80. – № 2. – P. 189–210.

182. Sona G., Pinto L., Pagliari D., Passoni D., Gini R. Experimental analysis of different software packages for orientation and digital surface modelling from UAV images // *Earth Science Informatics*. – 2014. – V. 7. – № 2. – P. 97–107.

183. Spring T. Uncertainty comparison of digital elevation models derived from different image file formats. – B.Sc. Thesis. – Gävle: University of Gävle, Faculty of engineering and sustainable development, 2014. – 39 p.

184. Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica // *Australian Journal of Earth Sciences*. – 1989. – V. 36. – № 2. – P. 219–241.

185. Suomalainen J., Anders N., Iqbal S., Roerink G., Franke J., Wenting P., Hünninger D., Bartholomeus H., Becker R., Kooistra L. A lightweight hyperspectral mapping system and photogrammetric processing chain for unmanned aerial vehicles // *Remote Sensing*. – 2014. – V. 6. – № 11. – P. 11013–11030.

186. Syromyatina M.V., Kurochkin Y.N., Bliakharskii D.P., Chistyakov

K.V. Current dynamics of glaciers in the Tavan Bogd Mountains (Northwest Mongolia) // *Environmental Earth Sciences*. – 2015. – V. 74. – № 3. – P. 1905–1914.

187. Tahar K.N., Ahmad A., Akib W.A.A.W.M., Mohd W.M.N.W. Assessment on ground control points in unmanned aerial system image processing for slope mapping studies. *International Journal of Scientific & Engineering Research*. – 2012. – V. 3. – № 11. – P. 1–10.

188. Teasley S.P., Hoover W.M., Johnson C.R. Differential GPS navigation // *PLANS'80: Position location and navigation symposium*, 8–11 Dec. 1980, Atlantic City, USA. – New York: IEEE, 1980. – P. 9–16.

189. Tonkin T.N., Midgley N.G. Ground-control networks for image based surface reconstruction: an investigation of optimum survey designs using UAV derived imagery and structure-from-motion photogrammetry // *Remote Sensing*. – 2016. – V. 8. – № 9. – # 786.

190. Toth C., Józków G. Remote sensing platforms and sensors: a survey // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2016. – V. 115. – P. 22–36.

191. Trabant D.C., Hawkins D.B. Glacier ice-volume modeling and glacier volumes on Redoubt Volcano, Alaska. – *USGS Water-Resources Investigations Rep. 97-4187*. – 1997. – 29 p.

192. Trimble business center user manual 1.10. – Trimble, 2006. – 366 p.

193. Turner D., Lucieer A., Watson C. An automated technique for generating georectified mosaics from ultra-high resolution unmanned aerial vehicle (UAV) imagery, based on structure from motion (SfM) point clouds // *Remote Sensing*. – 2012. – V. 4. – № 5. – P. 1392–1410.

194. Turner D., Lucieer A., Wallace L. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2014. – V. 52. – № 5. – P. 2738–2745.

195. Uysal M., Toprak A.S., Polat N. DEM generation with UAV photogrammetry and accuracy analysis in Sahitler hill // *Measurement*. – 2015. –

V. 73. – P. 539–543.

196. Van der Veen C. J. Crevasses on glaciers // Polar Geography. – 1999. – V. 23. – № 3. – P. 213–245.

197. Veregin H. The effects of vertical error in digital elevation models on the determination of flow-path direction // Cartography and Geographic Information Systems. – 1997. – V. 24. – № 2. – P. 67–79.

198. Verhoeven G. Taking computer vision aloft – archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan // Archaeological Prospection. – 2011. – V. 18. – № 1. – P. 67–73.

199. Vieira G., Mora C., Pina P., Bandeira L., Hong S.G. Geomorphology and vegetation mapping the ice-free terrains of the Western Antarctic Peninsula region using very high resolution imagery from an UAV // American Geophysical Union, Fall meeting. – 2014. – # C31A–0274.

200. Walter M., Niethammer U., Rothmund S., Joswig M. Joint analysis of the Super-Sauze (French Alps) mudslide by nanoseismic monitoring and UAV-based remote sensing // First Break. – 2009 – V. 27 – № 8. – P. 53–60.

201. Watts A.C., Ambrosia V.G., Hinkley E.A. Unmanned aircraft systems in remote sensing and scientific research: classification and considerations of use // Remote Sensing. – 2012. – V. 4. – № 6. – P. 1671–1692.

202. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. ‘Structure-from-motion’ photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications // Geomorphology. – 2012. – V. 179. – P. 300–314.

203. Westoby M.J., Dunning S.A., Woodward J., Hein A.S., Marrero S.M., Winter K., Sugden D.E. Interannual surface evolution of an Antarctic blue-ice moraine using multi-temporal DEMs // Earth Surface Dynamics. – 2016. – V. 4. – № 2. – P. 515–529.

204. Whitehead K., Hugenholtz C.H. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges // Journal of Unmanned Vehicle Systems. – 2014. – V. 2. – № 3. – P. 69–85.

205. Whitehead K., Hugenholtz C.H., Myshak S., Brown O., LeClair A., Tamminga A., Barchyn T.E., Moorman B., Eaton B. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications // *Journal of Unmanned Vehicle Systems*. – 2014. – V. 2. – № 3. – P. 86–102.

206. Whitehead K., Moorman B.J., Hugenholtz C.H. Lowcost, on-demand aerial photogrammetry for glaciological measurement // *Cryosphere*. – 2013. – V. 7. – № 6. – P. 1879–1884.

207. Wilson J.P., Gallant J.C. (Eds.). *Terrain analysis: principles and applications*. – New York: Wiley, 2000. – 479 p.

208. Wigmore O., Mark B. Monitoring tropical debris-covered glacier dynamics from high-resolution unmanned aerial vehicle photogrammetry, Cordillera Blanca, Peru // *Cryosphere*. – 2017. – V. 11. – P. 2463–2480.

209. Xiao F., Farrell J.E., Wandell B. Psychophysical thresholds and digital camera sensitivity: the thousand photon limit // *Proceedings of SPIE*. – 2005. – V. 5678. – P. 75–84.

210. Xu T., Yang W., Liu Y., Zhou C., Wang Z. Crevasse detection in Antarctica using ASTER images // *Image Analysis and Recognition*. – 2011. – V. 6754. – P. 370–379.

211. Yun M.H., Kim J., Seo D., Lee J., Choi C. Application possibility of smartphone as payload for photogrammetric UAV system // *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2012. – V. 39. – Pt. B4. – P. 349–352.

212. Zhu A-X., Burt J.E., Smith M., Wang R., Gao J. The impact of neighbourhood size on terrain derivatives and digital soil mapping // *Advances in Digital Terrain Analysis*. – Berlin: Springer, 2008. – P. 333–348.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Определения, формулы и интерпретации морфометрических величин [91,92,175,176]

Название	Обозначение , единицы измерения	Формула	Определение и краткая интерпретация
<i>Локальные морфометрические величины. Атрибуты форм</i>			
Минимальная кривизна	$k_{min}, \text{м}^{-1}$	$k_{min} = H - M$	Кривизна главного сечения с наименьшим значением кривизны в данной точке топографической поверхности. $k_{min} > 0$ соответствует холмам, $k_{min} < 0$ относится к долинам.
Максимальная кривизна	$k_{max}, \text{м}^{-1}$	$k_{max} = H + M$	Кривизна главного сечения с наибольшей кривизной в данной точке топографической поверхности. $k_{max} > 0$ соответствует гребням, $k_{max} < 0$ относится к замкнутым понижениям.

Средняя кривизна	$H, \text{ м}^{-1}$	$H = \frac{1}{2}(k_{\min} + k_{\max}) = \frac{1}{2}(k_h + k_v) = -\frac{(1+q^2)r - 2pqs + (1+p^2)t}{2\sqrt{(1+p^2+q^2)^3}}$	Полусумма кривизн любых двух ортогональных нормальных сечений в данной точке топографической поверхности. H представляет два механизма накопления веществ, под действием гравитацией – сходимости и относительное замедление потоков – с равными весами.
Гауссова кривизна	$K, \text{ м}^{-2}$	$K = k_{\min} k_{\max} = \frac{rt - s^2}{(1+p^2+q^2)^2}$	Произведение максимальной и минимальной кривизн. Согласно «<i>Teorema egregium</i>», K поверхности сохраняет свои значения после изгибания поверхности, если изгибание произошло без растяжений, сжатий и разрывов.

Несферичность	$M, \text{м}^{-1}$	$M = \frac{1}{2}(k_{\max} - k_{\min}) = \sqrt{H^2 - K}$	Полуразность максимальной и минимальной кривизн. $M = 0$ на сфере. Значения M показывают степень несферичности формы топографической поверхности в данной точке.
<i>Локальные морфометрические величины. Атрибуты потоков</i>			
Крутизна склона	$G, \text{градусы}$	$G = \text{arctg} \sqrt{p^2 + q^2}$	Угол между тангенциальной и горизонтальной плоскостями в данной точке топографической поверхности. Определяет скорость потоков, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием гравитации.
Экспозиция склона	$A, \text{градусы}$	$A = \text{arctg} \left(\frac{q}{p} \right)$	Угол, отсчитываемый по часовой стрелке, между направлением на север и проекцией внешней нормали на горизонтальную

			плоскость в данной точке топографической поверхности. Определяет направление потоков, перемещающихся вдоль земной поверхности под действием гравитации и, совместно с крутизной – освещенность склона.
Вертикальная кривизна	$k_v, \text{м}^{-1}$	$k_v = - \frac{p^2 r + 2 p q s + q^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$	Кривизна нормального сечения земной поверхности плоскостью, включающей вектор ускорения силы тяжести в данной точке топографической поверхности. Мера относительного замедления и ускорения гравитационных потоков. Наземные и внутрипочвенные латеральные потоки замедляются там, где $k_v < 0$, и ускоряются там, где $k_v > 0$.

Горизонтальная кривизна	$k_h, \text{м}^{-1}$	$k_h = -\frac{q^2 r - 2 p q s + p^2 t}{(p^2 + q^2) \sqrt{1 + p^2 + q^2}}$	Кривизна нормального сечения земной поверхности плоскостью, которое ортогонально сечению с вертикальной кривизной в данной точке топографической поверхности. Мера сходимости и расхождения потока. Гравитационные наземные и внутрипочвенные латеральных потоки сходятся там, где $k_h < 0$, и расходятся там, где $k_h > 0$.
----------------------------	----------------------	---	---

Разностная кривизна	$E, \text{м}^{-1}$	$E = \frac{1}{2}(k_v - k_h) = \frac{(q^2 r - 2 p q s + p^2 t)(1 + p^2 + q^2) - (p^2 r + 2 p q s + q^2 t)}{2(p^2 + q^2)\sqrt{(1 + p^2 + q^2)^3}}$	Полуразность вертикальной и горизонтальной кривизн. Сравнивая два механизма накопления веществ, вызванных гравитацией (аккумуляция), E показывает, в какой степени относительное замедление потоков выше, чем сходимость потоков в данной точке топографической поверхности.
Избыточная горизонтальная кривизна	$k_{he}, \text{м}^{-1}$	$k_{he} = k_h - k_{\min} = M - E$	Разность горизонтальной и минимальной кривизн. k_{he} показывает насколько k_h больше $k_{\min}$ в данной точке.
Избыточная вертикальная кривизна	$k_{ve}, \text{м}^{-1}$	$k_{ve} = k_v - k_{\min} = M + E$	Разность вертикальной и минимальной кривизн. k_{ve} показывает, насколько k_v больше

			k_{min} в данной точке.
Аккумуляционная кривизна	$K_a, \text{м}^{-2}$	$K_a = k_h k_v = \frac{(q^2 r - 2 p q s + p^2 t)(p^2 r + 2 p q s + q^2 t)}{[(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)]^2}$	Произведение горизонтальной и вертикальной кривизн. Отображает аккумуляцию потоков в данной точке топографической поверхности.
Кольцевая кривизна	$K_r, \text{м}^{-2}$	$K_r = k_{he} k_{ve} = M^2 - E^2 = \left[\frac{(p^2 - q^2)s - pq(r - t)}{(p^2 + q^2)(1 + p^2 + q^2)} \right]^2$	Произведение избыточной горизонтальной и избыточной вертикальной кривизн. Описывает степень извилистости потоков.
<i>Нелокальные морфометрические величины</i>			
Водосборная площадь	$CA, \text{м}^2$	—	Площадь замкнутой фигуры, сформированной отрезком горизонтали в данной точке топографической поверхности и двумя линиями тока, приходящими на концы этого отрезка с вышележащих участков. Мера

			площади вышележащих участков, которые могут дренироваться через данную точку поверхности.
Дисперсивная площадь	$DA, \text{ м}^2$	—	Площадь замкнутой фигуры, образованная отрезком горизонтали в данной точке топографической поверхности и двумя линиями тока, уходящими с концов этого отрезка вниз по склону. Мера площади нижележащих участков, которых могут достигать потоки, прошедшие через данную точку поверхности.
<i>Солярные морфометрические величины</i>			
Отражательная способность	$R, -$	$R = \frac{1 - p \cos \theta / \tan \psi - q \sin \theta / \tan \psi}{\sqrt{1 + p^2 + q^2} \sqrt{1 + (\cos \theta / \tan \psi)^2 + (\sin \theta / \tan \psi)^2}}$	Мера яркости освещаемой поверхности.
<i>Комбинированные морфометрические величины</i>			
Топографичес-	$TI, -$	$TI = \ln(CA/\text{tg } G)$	Логарифм отношения водосборной

кий индекс			площади и крутизны склона в данной точке топографической поверхности. Мера степени аккумуляции потока.
Индекс мощности потока	$SI, -$	$SI = \ln(CA \cdot \operatorname{tg} G)$	Логарифм произведения водосборной площади и крутизны склона в данной точке топографической поверхности. Мера SI используется для описания потенциальной эрозионной силы потоков.

$$r = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, t = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}, s = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}, p = \frac{\partial z}{\partial x}, q = \frac{\partial z}{\partial y}, z = f(x, y), \text{ где } z - \text{высота, } x \text{ и } y - \text{декартовы координаты.}$$

θ и ψ – азимут и высота Солнца

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Текстурные признаки Харалика [115]

Название	Формула расчета	Определение
Второй угловой момент	$f_1 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (p(i, j))^2$	Является мерой гомогенности снимка.
Контрастность	$f_2 = \sum_{n=0}^{N_g-1} n^2 \left(\sum_{\substack{i=1 \\ i-j =n}}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) \right)$	Определяется величиной локальных вариаций яркости изображения. С увеличением количества локальных вариаций, возрастает контраст снимка.
Корреляция	$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i, j) p(i, j) - \mu_x \mu_y}{\sigma_x \sigma_y}$ где $\mu_x, \mu_y, \sigma_x, \sigma_y$ средние значения и стандартные отклонения $p_x(i) = \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j)$ и $p_y(j) = \sum_{i=1}^{N_g} p(i, j)$	Служит мерой линейных зависимостей оттенков серого на изображении.
Дисперсия	$f_4 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} (i - \mu)^2 p(i, j)$	Определяет вариации яркости относительно среднего значения.

Момент обратной разности (гомогенность)	$f_5 = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} \frac{1}{1 + (i - j)^2} p(i, j)$	Признак связан с контрастностью, отражает степень разброса элементов матрицы яркостной зависимости относительно главной диагонали.
Среднее значение суммы	$f_6 = \sum_{i=2}^{2N_g} i p_{x+y}(i)$ где $p_{x+y}(i) = \underbrace{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j)}_{i+j=k}$ для $k = 2, 3, \dots, 2N_g$	Отражает преобладание соседнего расположения пикселей, которые в совокупности имеют высокую яркость.
Дисперсия суммы	$f_7 = \sum_{i=2}^{2N_g} (i - f_6)^2 p_{x+y}(i)$	Является мерой вариации яркости относительно суммарного среднего.
Суммарная энтропия	$f_8 = - \sum_{i=2}^{2N_g} p_{x+y}(i) \log(p_{x+y}(i))$	Определяется мерой статистической теории информации и выражает неравномерность распределения яркостных свойств снимка.
Энтропия	$f_9 = - \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j) \log p(i, j)$	Отражает неравномерность (хаотичность) текстуры.

Дисперсия разности	$f_{10} = \sum_{i=2}^{N_g-1} (i - f_{11})^2 p_{x-y}(i)$ где $p_{x-y}(i) = \underbrace{\sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} p(i, j)}_{ i-j =k}$ для $k = 0, 3, \dots, N_g - 1$	Показывает отличие вектора $p_{x-y}(i)$ от среднего значения вектора $p_{x-y}(i)$.
Разность энтропий	$f_{11} = - \sum_{i=0}^{N_g-1} p_{x-y}(i) \log(p_{x-y}(i))$	Является мерой неравномерности (хаотичности) вектора $p_{x-y}(i)$.

192 $p(i, j)$ – это запись (i, j) в нормализованной матрице пространственной зависимости серого тона, N_g – количество уровней квантования серого в изображение.