

На правах рукописи



Бляхарский Дмитрий Петрович

**Методика моделирования ледниковых поверхностей по данным
беспилотной аэрофотосъемки**

Специальность 25.00.34

Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» на кафедре космического мониторинга и экологии.

Научный руководитель: **Флоринский Игорь Васильевич**
доктор технических наук, Институт математических проблем биологии РАН – филиал Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», отдел перспективных информационных технологий, ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Воронин Евгений Геннадьевич**
доктор технических наук, старший научный сотрудник, филиал АО Ракетно-космический центр, «Прогресс» – Научно-производственное предприятие «ОПТЭКС», служба главного конструктора, заместитель главного конструктора.

Погорелов Анатолий Валерьевич
доктор географических наук, профессор, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Кубанский государственный университет», кафедра геоинформатики, заведующий.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова».

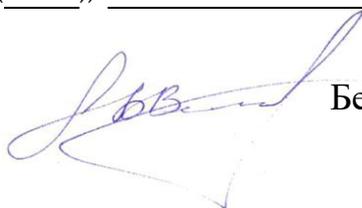
Защита диссертации состоится «17» июня 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 в Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер. 4, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного университета геодезии и картографии:

<http://www.miigaik.ru/upload/iblock/2bc/2bc2ed4514e12819e6b5101be01453ae.pdf>

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Беленко Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 конце 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. В частности, одним из 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. Суетова и Чистов (1993) создали по картографическим материалам мелкомасштабные ЦМР фрагмента поверхности Антарктиды. Etzelmüller и Sollid (1997) ввели понятие ледниковой геоморфометрии и составили по разновременным аэроснимкам 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. (Погорелов, 1999; Etzelmüller, 2000; Книжников и др., 2000, 2002; Rippin et al., 2003; DiMarzio et al., 2005; Racoviteanu et al., 2007; Fox, Cziferszky, 2008; Kääb, 2008; Золотарев, 2009; Vamber et al., 2009; Bhambri, Bolch, 2009; Бойко, 2010; Fretwell et al., 2013; Helm et al., 2014; Семакова, 2017).

Беспилотную аэрофотосъемку ледников впервые применили Hodson et al. (2007). Этот метод и получаемые с его помощью детальные ЦМР использовались для анализа динамики ледников, скорости их движения, изучения ледниковой дренажной сети и пр. (Whitehead et al., 2013; Immerzeel et al., 2014; Ryan et al., 2015; Kraaijenbrink et al., 2016; Jouviet et al., 2017; Wigmore, Mark, 2017; Погорелов и др., 2017; Bash et al., 2018; Петраков и др., 2018).

Нерешенной проблемой беспилотной аэрофотосъемки ледников остается сложность или невозможность выполнения условий планово-высотного обоснования (отсутствие наземных опорных 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 (Chiang et al., 2012; Turner et al., 2014) и профессионального аэрофотосъемочного и геодезического оборудования.

За последние 20 лет в развитии теории и методов геоморфометрии отмечен существенный прогресс (Wilson, Gallant, 2000; Shary et al., 2002; Hengl, Reuter,

2009; Florinsky, 2012, 2016). Однако эти достижения до сих пор не нашли должного применения в гляциологических исследованиях.

Цель исследования: разработать комплексную методику моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки, включающую три основных компонента: полевые геодезические и аэрофотосъемочные работы, камеральную фотограмметрическую 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 проекций 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 комплексную методику при изучение высокогорных ледников Монгольского Алтая и покровных ледников Антарктиды.

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

Практическая значимость работы состоит в возможности использования разработанной комплексной методики при проведении исследований в условиях оледенения Арктики, Антарктики и высокогорья. Результаты исследования были внедрены в ООО «Геоскан» для создания модификаций серийных БАС и программного обеспечения (ПО) 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 ГНСС приемниками 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 применялся БАС мультироторного типа DJI Phantom 4.

Для обработки аэрофотоснимков использовалось ПО 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 ПО Pinnacle 1.0, Trimble Business Center 2.0 и Magnet Office Tools 2.8. Геоморфометрическое моделирование на разных этапах проведено в ПО ArcMap 10.0, ENVI Classic 2.7, MatLab R2008b, LandLord 4.0, QGIS 3.00 и MapInfo Pro 16.0.1.

На защиту выносятся:

Комплексная методика моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки, включающая в себя:

1. Методику беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования.

2. Методику беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников с использованием в качестве опорной информации центров проекций 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, глобальных навигационных спутниковых систем, фотограмметрии, геоморфометрии,

математической статистики и геоинформатики; 4) Применение современного специализированного программного обеспечения.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на международных и национальных конференциях: International Symposium on Glaciology in High-Mountain Asia “IGS-2015” (Kathmandu, Nepal, 2–6 March 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 March 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, USA, 13–17 Aug. 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 был исполнителем проекта РФФИ № 17-37-50011 «Геоморфометрическое моделирование ледникового трещинообразования по данным беспилотной аэрофотосъемки» (2017–2018), а также является исполнителем проекта РФФИ и ГФЕН Китая № 20-51-53016 «Моделирование и анализ эволюции микрорельефа поверхности ледников по данным беспилотной аэрофотосъемки (холмы Ларсеманн, Восточная Антарктида)» (2020–2022).

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

Структура и объем. 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, изложены цель и задачи работы, отмечена научная новизна, приведены защищаемые положения, подчеркнута теоретическая и практическая значимость работы, аргументирована степень достоверности и отмечена апробация результатов исследования, указан личный вклад соискателя.

В первой главе рассмотрена степень разработанности проблемы. Проведен обзор работ по использованию ЦМР и методов геоморфометрии в

гляциологических исследованиях в целом, а также применению беспилотной аэрофотосъемки для целей гляциологии. Кроме того, проведен обзор публикаций по применению в качестве опорной информации центров проекций снимков, а также основных теоретических и методических работ по геоморфометрии.

Во второй главе приведена методика беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования, а также описано исследование по разработке этой методики.

Очевидно, что для создания корректной ЦМР необходимо учитывать технические характеристики БАС, камеры и навигационной системы, а также особенности алгоритмов обработки данных, реализованных в ПО. Геоморфометрическое моделирование накладывает дополнительные требования к точности ЦМР. Это связано с рядом факторов:

1) Расчет локальных морфометрических характеристик (например, уклона и кривизн) основан на вычислениях первой и второй частных производных высоты. Эти расчеты значительно усиливают случайные ошибки и высокочастотный шум в ЦМР, которые незаметны на исходной ЦМР.

2) Расчет нелокальных и комбинированных морфометрических характеристик (напр., водосборной площади и топографического индекса) основан на алгоритмах маршрутизации потоков. В ходе этих вычислений ошибки могут быть накоплены вдоль маршрутов потоков в зависимости от пространственного распределения случайных и систематических ошибок ЦМР.

В ходе исследований сформулированы технологические особенности беспилотной аэрофотосъемки и фотограмметрической обработки для целей геоморфометрического моделирования:

1. Следует использовать камеры с центральным затвором.
2. Использовать камеры с известными параметрами дисторсии объектива, полученными в результате лабораторной и/или полевой калибровки.
3. Размер пикселя КНОП-матрицы должен быть не менее 4×4 мкм.
4. Аэрофотосъемку производить с избыточным перекрытием снимков, например, 70 % и 50 % (продольное и поперечное, соответственно).

5. В труднодоступных районах использовать в качестве опорной информации центры проекций снимков.

6. Частота записи бортового ГНСС-приемника должна быть выше 1 Гц.

7. При фотограмметрической обработке использовать алгоритмы классификации плотного облака точек или фильтрации цифровой модели.

Для разработки методики проведены исследования на территории Заокского геополигона МИИГАиК, которые включали аэрофотосъемочные работы, фотограмметрическую обработку результатов съемки, оценку точности получаемых данных и дальнейшее геоморфометрическое моделирование. В качестве опорной информации использовали центры проекций снимков.

Аэрофотосъемка произведена с использованием БАС Геоскан 101 с полезной нагрузкой в виде цифровой камера Sony RX1 и ГНСС приемника геодезического класса на базе OEM платы Topcon b110. При фотограмметрической обработке применены результаты лабораторной и полевой калибровки камеры.

При камеральной обработке спутниковых наблюдений использовано ПО Pinnacle, при фотограмметрической обработке – ПО Agisoft PhotoScan Professional. В результате фотограмметрической обработки были получены ЦМР на область исследования с пространственным разрешением 1 м и 0,2 м. Средняя ошибка ЦМР составила 0,09 м, для обоих ЦМР.

Геоморфометрическое моделирование проведено с помощью универсального спектрально-аналитического метода (рис. 1), в основе которого – ортогональные разложения высокого порядка с использованием полиномов Чебышева I рода с последующим суммированием Фейера. Расчеты проведены в ПО Matlab R2008b и LandLord.

В ходе апробации технологических особенностей, анализ морфометрических карт с разрешением 0,2 м (рис. 1а) показал, что они корректно отображают особенности микрорельефа территории.

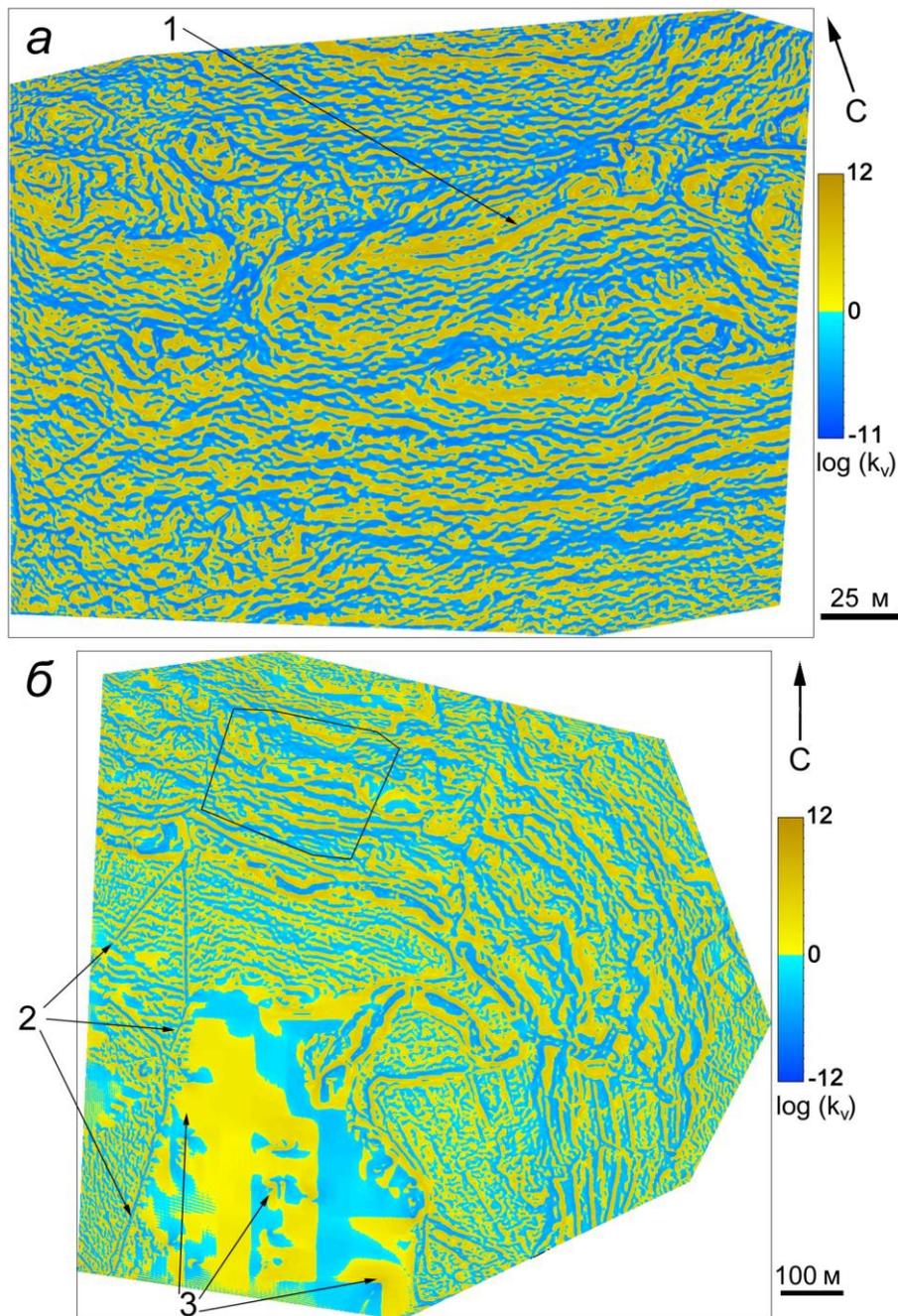


Рисунок 1 – Заокский геополигон МИИГАиК, вертикальная кривизна:
a – тестовый участок (разрешение ЦМР 0,2 м), *б* – область исследования
(разрешение ЦМР 1 м). Черная рамка обозначает тестовый участок. Стрелками
показаны артефакты (1 – тропа, 2 – дороги, 3 – лес)

В частности, горизонтальная кривизна выявляет структуры микропотоков, а вертикальная кривизна выявляет микротеррасы (рис. 1*a*). Отдельно стоящие деревья и кустарники были эффективно удалены с помощью автоматической классификации плотного облака точек.

На морфометрических картах с разрешением 1 м (рис. 1*б*) хорошо виден

полигональный артефакт на юго-западе. Он связан с зоной сплошной древесной растительности. Такие артефакты невозможно устранить без вспомогательных данных о рельефе, полученных с помощью наземной топографической съемки. Также можно увидеть несколько ярко выраженных линейных артефактов (следы дорог и троп). Данные артефакты возникают из-за ступенчатого изменения высоты вдоль краев дорог и троп.

В третьей главе рассмотрена методика проведения беспилотной аэрофотосъемки горных и покровных ледников с использованием в качестве исходной информации центров проекций снимков. Методика является результатом четырех экспедиционных исследований, и включают в себя следующие основные положения:

1) Предполетная подготовка. Предусматривает изучение различных картографических материалов и функционала ПО планирования полетного задания. На область исследования необходимы материалы дистанционного зондирования широкого масштабного ряда. Следует изучить доступность и формат использования публичных веб-картографических сервисов. Особое внимание уделить эргономике интерфейса и набору инструментов ПО планирования полетного задания. Необходимо предусмотреть возможность изменения полетного задания непосредственно во время полета БАС.

2) Анализ тактико-технических характеристик БАС. Служит для грубой оценки возможного использования БАС для картографирования горных и покровных ледников. Практика показывает, что некоторые характеристики искусственно занижены, а фактические значения их предельных величин выше. Следует обратить внимание на максимально допустимую скорость ветра при использовании БАС (15–20 м/с), неблагоприятное влияние отрицательной температуры воздуха, продолжительность полета при сильном ветре (от 10 м/с).

3) Выбор стартовой площадки. Необходимо рассматривать анализ картографических материалов. В горной местности следует учитывать технические характеристики БАС, рельеф, транспортную доступность и наличие источника чистой пресной воды. При съемке покровных ледников транспортная доступность имеет первостепенное значение, передвижение по

леднику представляет наибольшую опасность для исследователей.

4) Анализ конструктивных особенностей БАС. Необходимо обратить внимание на самые опасные этапы полета: взлет и посадка. Тип используемой катапульты, возможность ее работы при отрицательной температуре. Также следует рассмотреть тип конструкции планера и его аэродинамические свойства при сильной ветровой нагрузке. При полетах выше 3000 м над уровнем моря – рассмотреть значения критического угла атаки и/или предельно допустимой скорости полета.

5) Изучение основных режимов работы автопилота и принципа работы запрограммированных команд. При проведении полетов в условиях критических нагрузок необходимо оперативное вмешательство в полет. Следует изучить возможность принудительной смены режимов работы автопилота (прекращение полета, возврат на маршрут). При воздушных потоках вертикальной направленности использование ручного управления.

6) Планово-высотная подготовка аэрофотосъемки. Должна быть спланирована и выполнена с учетом скорости движения ледников.

7) Учет погодных условий. Сильный ветер, воздушные потоки вертикальной направленности, низкие температуры, разреженный воздух, низкая облачность и обледенение создают ряд проблем, но не ограничивают использование БАС полностью. Сильный ветер существенно уменьшает продолжительность полета. В горной местности, возможно, летать под нижней кромкой облаков, при покровном оледенении – только в солнечную погоду. Влияние обледенения можно уменьшить за счет обработки БАС противообледенительными жидкостями.

В четвертой главе изложен геоморфометрический способ определения динамических гляциологических характеристик горных ледников по данным разновременной беспилотной аэрофотосъемки, а также описано исследование по разработке и апробации этого способа.

Способ основан на расчете и анализе модели разности ЦМР и состоит из следующих основных этапов:

1) Создание маски поверхности ледников по ортофотоплану.

2) Выделение ЦМР ледников по маске.

3) Создание слоя разницы ЦМР между периодами съемки (рис. 2). Период съемки подбирают в зависимости от режимов питания ледников и возможности проведения экспедиционных исследований.

4) Расчет среднесуточной вертикальной скорости изменения ледников по разнице ЦМР и периоду времени между съемками.

5) Определение границы питания по разнице ЦМР (переход между положительными и отрицательными значениями разности). С целью контроля граница питания дешифрована визуально, по ортофотоплану.

6) Выполнение анализа отступления языка ледников (рис. 3).

7) Расчет горизонтальной скорости движения ледников методом корреляции разновременных ортофотопланов.

8) Определение объема расхода массы снега и льда по разнице ЦМР и среднему значению плотности льда (характеристика является приблизительной и не учитывает ряда дополнительных параметров).

Апробация способа выполнена на ледниках Потанина и Александры (Западная Монголия). В рамках двух экспедиций, с применением методики, представленной в гл. 3, была проведена аэрофотосъемка: в начале сезона таяния ледников (июнь) и конце сезона таяния (август). В качестве опорной информации использовались центры проекций снимков. Геодезическое сопровождение съемки выполнено с учетом контроля возможного смещения в нивально-гляциальной зоне ледника. Заложено несколько геодезических пунктов. Определено изменение взаимного положения пунктов между собой за разные периоды наблюдения. Использование опорных и контрольных точек планово-высотной подготовки аэрофотосъемки не предполагалось. С целью оценки точности фототриангуляции на скалах и боковых моренах измерены соответствующие точки для определения взаимного положения двух наборов данных. Средняя ошибка составила 0,26 м. Расчет динамических гляциологических характеристик был произведен в ПО ArcMap, QGIS, COSSI-Corr.

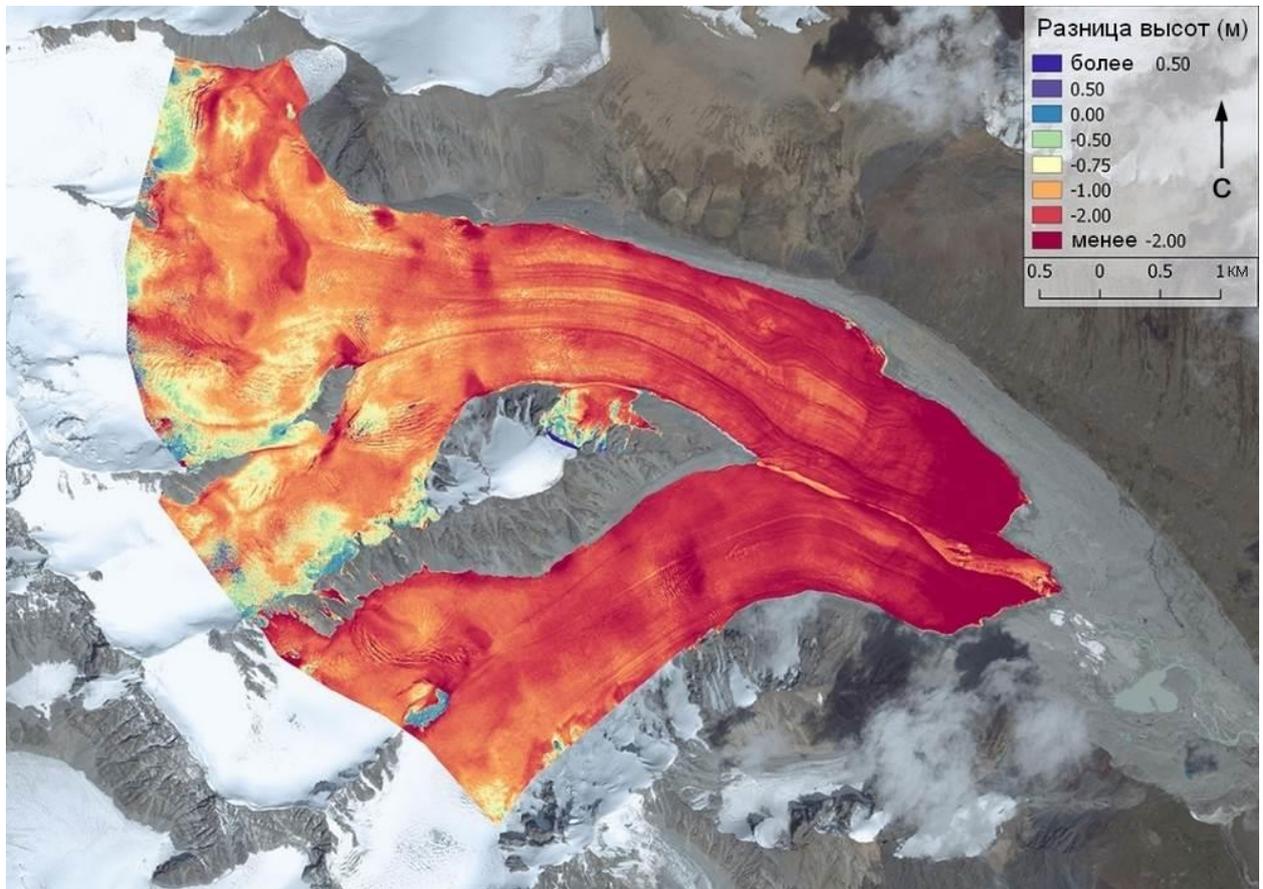


Рисунок 2 – Изменение поверхности ледников за сезон абляции



Рисунок 3 – Отступление языка ледников за сезон абляции

Апробация разработанного способа позволила выявить неравномерность горизонтальной и вертикальной скорости движения разных участков ледников. В частности, среднее отступление языка ледников составило 10–15 м; местами отступления не произошло совсем, так как бронированный лед тает медленнее.

В пятой главе изложен геоморфометрический способ выявления ледниковых трещин по данным беспилотной аэрофотосъемки, а также описано исследование по разработке и апробации этого способа.

В гляциологических исследованиях одной из важных задач является быстрый и безопасный мониторинг местности для обнаружения открытых трещин, выявления скрытых трещин (накрытых «снежным мостом»), а также изучения их динамики. По материалам дистанционного зондирования можно уверенно дешифровать открытые трещины. Единого подхода к выявлению скрытых трещин не существует. Это связано с наличием «снежного моста», который затрудняет их выявление. Поскольку скрытая трещина содержит в себе полое пространство, снежный мост оседает под действием силы тяжести и образует прогиб, который может быть выявлен при анализе микрорельефа территории. Была выдвинута гипотеза о возможности применения геоморфометрического моделирования для выявления скрытых трещин.

Для ее подтверждения в рамках 62-ой РАЭ в окрестностях полярной станции Прогресс было проведено исследование по применению БАС и геоморфометрического моделирования для оперативного выявления ледниковых трещин. Разработанный в результате способ выявления скрытых ледниковых трещин включает следующие основные этапы работы:

- 1) Расчет ЦМР с различным пространственным разрешением.
- 2) Сглаживание ЦМР для подавления высокочастотного шума.
- 3) Расчет 16-ти морфометрических величин (экспозиция и крутизна, 12 кривизн, водосборная и дисперсивная площади) для каждой ЦМР.
- 4) Контроль распознавания трещин.
- 5) Определение наилучшей морфометрической модели.

Для верификации разработанного способа, с его помощью проведено выявление ледниковых трещин на участках, где эти объекты были распознаны

визуально по ортофотопланам и снимкам. Визуально выделено 15 трещин. У каждой из них по ортофотоплану были измерены длина и ширина. Часть визуально дешифрированных трещин были обследованы в полевых условиях.

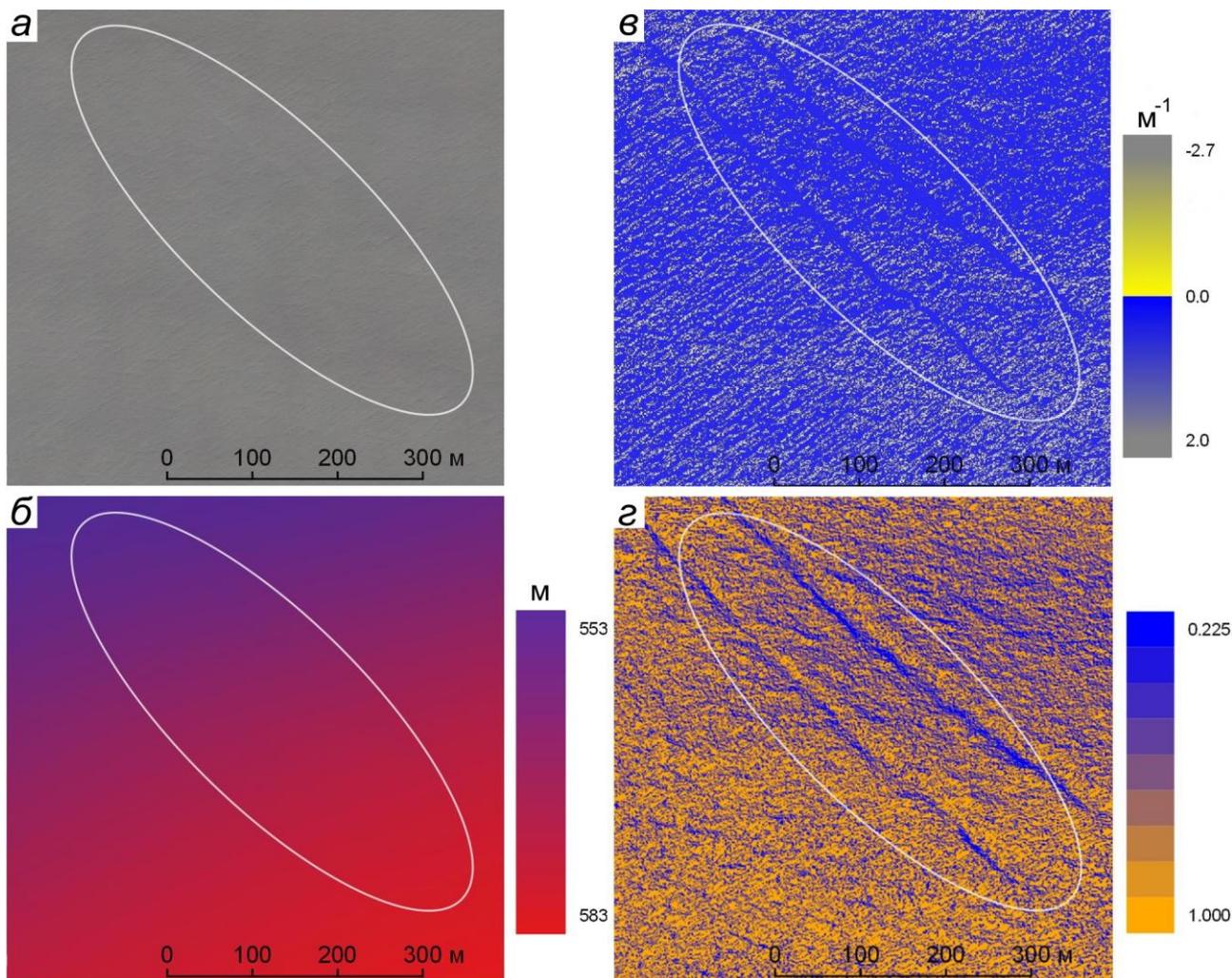


Рисунок 4 – Пример отображения ледниковых трещин:

а – ортофотоплан, *б* – ЦМР, *в* – горизонтальная кривизна и *г* – гомогенность.

Овал показывает положение двух трещин. На ортофотоплане и ЦМР трещины не читаются

Кроме того, был проведен сравнительный анализ эффективности разработанного способа с одним из классических и популярных методов обработки изображений – текстурным анализом Харалика: по ЦМР участков с визуально дешифрированными трещинами были рассчитаны 11 текстурных характеристик (корреляция, контраст, энтропия, гомогенность и др.).

Применение разработанного геоморфометрического способа позволило выявить 9 из 15 трещин. Наилучшие результаты дали расчет и визуализация 2-х

морфометрических характеристик: горизонтальной и минимальной кривизны (рис. 4). Вероятность распознавания составила 0,75. Применение текстурного анализа Харалика дало сопоставимый результат: было выявлено 10 из 15 трещин. Наибольшую информативность для обнаружения трещин показали 2 текстурные характеристики: гомогенность и контраст (рис. 4).

Апробация разработанного способа на участке трассы санно-гусеничного похода (СГП) позволила выявить 18 новых трещин. Длина трещин варьирует от 80 до 1000 м, средняя ширина составила 10 м.

В шестой главе описано исследование катастрофического проседания ледовой поверхности на леднике Долк (Восточная Антарктида) в январе 2017 г. и дана его интерпретация.

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. Утром 30 января 2017 произошло неожиданное проседание участка ледника Долк: на северо-западной окраине ледника за несколько минут была образована широкая и глубокая ледяная впадина (рис. 5).

Аэрофотосъемка области провала произведена 20 января и 9 февраля 2017, т.е. за 10 дней до события и через 10 дней после события (рис. 5). За день до события и через час после события выполнена воздушная видеосъемка, направленная на изучение стока талой воды озера Боулдер (южнее и выше по склону) и первичного осмотра зоны провала.

По материалам первой съемки для области провала между озером Боулдер и заливом Прюдс (севернее и ниже по склону) была рассчитана русловая сеть (талъвеги) поверхностного стока талой воды.

Анализ пространственных данных позволил предложить следующий механизм проседания ледника:

- 1) Ледниковая пещера с тонким куполом существовала до события.
- 2) Также существовал канал поверхностного и приповерхностного стока талой воды из озера Боулдер. Канал от озера Боулдер до залива Прюдс огибал ледниковую пещеру, т.е. совпадал с системой трещин вдоль купола пещеры.

3) За 10 дней до события отмечены многочисленные потоки талой воды между озером Боулдер и будущей зоной обрушения. За день до этого события из озера Боулдер начался интенсивный сток талой воды, зафиксированный аэровидеосъемкой. Эта вода переполнила существующий канал. Объем воды и скорость ее течения были слишком велики; вода не успевала стекать в сторону залива Прудс и начала накапливаться на куполе ледниковой пещеры. Это привело к обрушению купола пещеры и образованию провала.

Область проседания имеет размеры 183×220 м, площадь составила 40000 м^2 . Максимальная глубина впадины достигала 43 м. Приблизительный объем ледяной каверны до обрушения был около $885\,000 \text{ м}^3$.

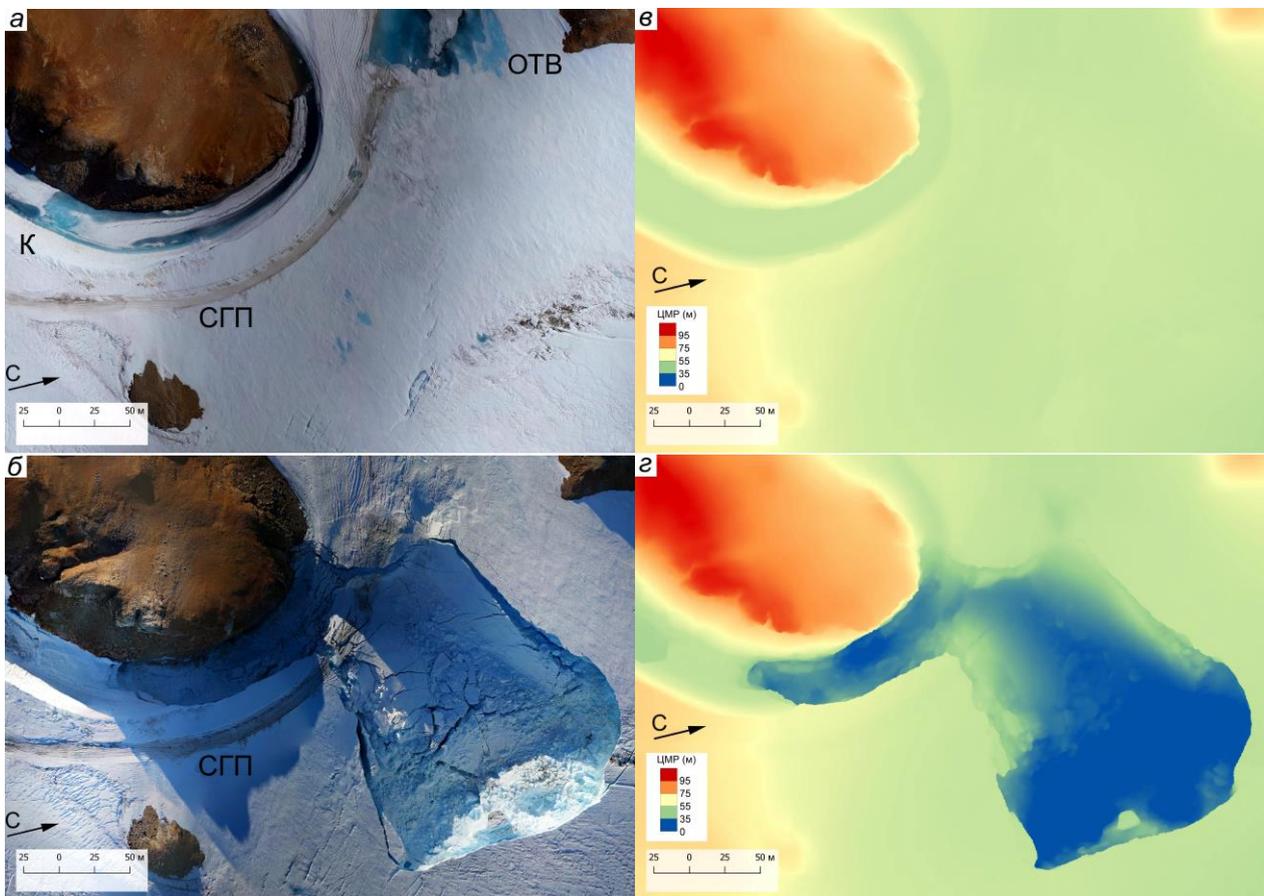


Рисунок 5 – Зона провала ледника Долк, ортофотоплан (*а* и *б*) и ЦМР (*в* и *г*): 10 дней до (*а* и *в*) и 10 дней после (*б* и *г*) события. ОТВ – озеро талой воды, К – дренажный канал, СГП – трасса санно-гусеничного похода

В заключении сформулированы основные результаты и выводы работы.

В приложениях 1 и 2 даны определения и формулы основных морфометрических величин и текстурных характеристик Харалика.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана комплексная методика моделирования ледниковых поверхностей по данным беспилотной аэрофотосъемки, которая включает три основных компонента: полевые геодезические и аэрофотосъемочные работы, камеральную фотограмметрическую 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 проекций 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 комплексная 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 комплексная методика может быть использована для проведения исследований в области гляциологии и смежных дисциплин в условиях полярного и горного оледенения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus:

1. 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. Vol. 40. No. 7. P. 2517–2541.
2. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P. Detection of crevasses by geomorphometric treatment of data from unmanned aerial surveys // Remote Sensing Letters. 2019. Vol. 10. No. 4. P. 323–332.
3. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P. The 2017 catastrophic subsidence in the Dålĳ Glacier, East Antarctica: Unmanned aerial survey and terrain modelling // Remote Sensing Letters. 2019. Vol. 10. No. 4. 333–342.
4. Florinsky I.V., Kurkov V.M., Bliakharskii D.P. Geomorphometry from unmanned aerial surveys // Transactions in GIS. 2018. Vol. 22. No. 1. P. 58–81.
5. Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dålĳ Glacier, East Antarctica // Лед и снег. 2017. Т. 57. № 3. С. 427–432.
6. 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. Vol. 74. No. 3. P. 1905–1914.

Статьи в других журналах, рекомендованных ВАК:

7. Бляхарский Д.П., Ишалина О.Т., Тюрин С.В. Дешифрирование скрытых ледниковый трещин по материалам беспилотной аэрофотосъемки в районе станции Прогресс (Восточная Антарктида) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2020. Т. 64. № 1. С. 44–52.
8. Бляхарский Д.П. Особенности проведения аэрофотосъемочных работ горных и покровных ледников с использованием беспилотных воздушных судов // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 6. С. 650–661.
9. 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) // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. 2019. Т. 63. № 2. С. 168–179.

10. 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. № 4 (114). С. 86–97.

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

Другие публикации:

12. Florinsky I.V., Skrypitsyna T.N., Bliakharskii D.P., Ishalina O.T., Kiseleva A.S. Towards the modeling of glacier microtopography using high-resolution data from unmanned aerial survey // Int. Arch. Photogramm., Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2020. Vol. XLIII-B2-2020. P. 1065–1071.

13. Ishalina O.T., Bliakharskii D.P., Florinsky I.V. Detection of crevasses using high-resolution digital elevation models: Comparison of geomorphometric modeling and texture analysis // Proc. Geomorphometry 2020 Conf., Perugia, Italy. Roma: CNR Edizioni, 2020. P. 9–12.

14. Ишалина О.Т., Бляхарский Д.П. Выявление скрытых ледниковых трещин по материалам беспилотной аэрофотосъемки // Роль криосферы в прошлом, настоящем и будущем Земли: Тез. докл. XVII гляциологического симп., 17–20 нояб. 2020, Санкт-Петербург. СПб, 2020. С. 21

15. Флоринский И.В., Скрыпицына Т.Н., Бляхарский Д.П., Ишалина О.Т., Киселева А.С. Моделирование и анализ микрорельефа поверхности ледников по данным беспилотной аэрофотосъемки // Роль криосферы в прошлом, настоящем и будущем Земли: Тез. докл. XVII гляциологического симп., 17–20 нояб. 2020, Санкт-Петербург. СПб, 2020. С. 133

16. Флоринский И.В., Скрыпицына Т.Н., Бляхарский Д.П., Ишалина О.Т., Киселева А.С. Цифровой микрорельеф поверхности ледников по данным беспилотной аэрофотосъемки: постановка задачи // Цифровая география:

Материалы Всерос. науч.-практ. конф., 16–18 сент. 2020, Пермь. Пермь: ПГНИУ, 2020. Т. 1. С. 185–188.

17. Bliakharskii D., Florinsky I. Unmanned aerial survey for modelling glacier topography in Antarctica: First results // Proc. 4th Int. Conf. Geographical Information Systems Theory, Applications and Management (GISTAM 2018), 17–19 March 2018, Funchal, Portugal. Setúbal: Scitepress, 2018. P. 319–326.

18. Florinsky I.V, Bliakharskii D.P. Crevasse detection by geomorphometric modelling of data from unmanned aerial survey // Theory and Methods of Polar Science: Proc. Int. Youth Sci. Conf. Polar Geodesy, Glaciology, Hydrology Geophysics, St. Petersburg, 17–19 May 2018. St. Petersburg, 2018. P. 247–255.

19. Florinsky I.V., Bliakharskii D.P., Popov S.V., Pryakhin S.S. The 2017 catastrophic subsidence in the Dalk Glacier: Unmanned aerial survey and digital terrain analysis // PeerJ Preprints. 2018. 6. e27064v1. 4 p.

20. 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 Всерос. науч.-практ. конф. молодых ученых, аспирантов и студентов в г. Нерюнгри. Секц. 1–3. Нерюнгри: СВФУ, 2017. С. 144–148.

21. Курков В.М., Бляхарский Д.П., Флоринский И.В. Беспилотная аэрофотосъемка для геоморфометрического моделирования // Экология, экономика, информатика. Ростов-н/Д: ЮНЦ РАН, 2016. Т. 2. С. 288–302.

22. Курков В.М., Флоринский И.В., Бляхарский Д.П. Применение беспилотной аэрофотосъемки для геоморфометрического моделирования и картографирования // Международный год карт в России: объединяя пространство и время: Сб. тез. Всерос. науч. конф., Москва, 25–28 окт. 2016. М.: РГБ, 2016. С. 169–172.

23. Bliakharskii D., Syromyatina M. The use of unmanned aircraft system for mapping glaciers of the Tavan Bogd mountains (northwest Mongolia) // Abstracts, Int. Symp. Glaciology in High-Mountain Asia “IGS-2015”, Kathmandu, Nepal, 2–6 March 2015. # 71A1554.