

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

Волгушева Наталья Эдуардовна

Разработка метода оценки динамики объема ледника за сезон абляции по данным беспилотной аэрофотосъемки с использованием геоинформационных технологий на примере ледников Потанина и Александры

Выпускная квалификационная работа бакалавра

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:

асс. Э.Э. Казаков

«__» _____ 2016

Заведующий кафедрой:

к.г.н., доцент Е.Г. Капралов

«__» _____ 2016

Санкт – Петербург

2016

Оглавление

Введение.	3
Глава 1. История развития гляциологии как науки.	5
Глава 2. Беспилотные технологии.	10
2. 1. История беспилотных летательных аппаратов.	10
2. 2. Современное развитие.	11
Глава 3. Полевые работы.	15
3. 1. Краткое описание истории экспедиции.	15
3. 2. Физико-географическое описание района исследований.	17
3. 3. Гляциологические исследования.	18
3. 4. Аэрофотограмметрические исследования.	22
Глава 4. Камеральная обработка.	33
4. 1. Обработка аэрофотограмметрических данных.	33
4. 2. Геоинформационный анализ.	45
Глава 5. Разработанная методология.	77
Заключение.	84
Список литературы.	86
Приложение 1. Технические характеристики комплекса Геоскан 101.	90
Приложение 2. Отчёт об уравнивании базового пункта «Мозгулин» на сеть станций ITRF. .	92
Приложение 3. Отчёт об уравнивании сети базового и контрольных пунктов в первой части экспедиции.	99
Приложение 4. Отчёт об уравнивании сети базового и контрольных пунктов во второй части экспедиции.	104

Введение.

Исследования ледников берут свое начало с конца XVIII – начала XIX вв., тогда как сама наука гляциология начала формироваться в XVIII в. Постепенно происходил переход от описательного характера изучения ледников и накопления знаний к физической сущности явлений в ледниках и пониманию природы льда, его характеристик. Изучаются морские льды, снежный покров, лавины в горах, разрабатываются радиофизические методы исследования ледников, решаются проблемы, связанные с образованием и разрушением речного льда, с защитой от снежных лавин и селей.

Существует множество причин для исследования ледников. Например, составление прогноза наступаний/отступаний ледников на основе детального анализа их динамики, истории движения. Этот прогноз имеет большое практическое значение для горных разработок, эксплуатации гидроэнергетических сооружений, трубопроводов и дорог, строящихся вблизи ледников. Многие особенности строения ледников близко напоминают структуры, наблюдаемые в метаморфических породах, что может помочь пониманию протекания геологических процессов, происходящих на недоступной для постоянного изучения глубине. Другой важной причиной является тесная взаимосвязь состояния ледников с атмосферой, окружающей средой, климатом. При этом происходит взаимное влияние состояния климата и процессов, проходящих в леднике. Измерения баланса массы позволяют определять объемы воды, имеющейся в леднике, какое ее количество может быть использовано, а также предоставляют возможности прогнозирования колебаний ледника от года к году.

В конце XX в. произошло существенное изменение подходов к наблюдениям за ледниками. Если раньше в основном проводили прямые систематические или эпизодические исследования нивально-гляциальных систем, то в настоящее время все более широко используются методы дистанционного зондирования, в частности – аэрофотосъемка с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Сотрудниками кафедры физической географии и ландшафтоведения и кафедры картографии и геоинформатики при участии студентов, была организована экспедиция на Монгольский Алтай, ледники Потанина и Александры, с целью проведения комплекса работ по измерению и оценке таяния ледников двумя методами: классическим гляциологическим и фотограмметрическим с использованием БПЛА. Результатом проведенных работ должно было стать комплексное сравнение двух использованных методов. Целью данной выпускной квалификационной работы является расчет основных физических характеристик ледника и

объема стаявшего и накопленного льда и снега за сезон абляции геоинформационными методами на основе данных, полученных с помощью беспилотной аэрофотосъемки.

В первой главе кратко описана история развития методов исследования ледников, рассмотрены существующие школы, а также раскрыты основные термины, которые использовались в работе. Во второй части подробнее раскрыта проблематика использования БПЛА в гляциологических исследованиях, история использования и развития данного метода. В третьей главе рассказано о прошедшей экспедиции, полученном опыте применения двух методов и промежуточных результатах по окончании экспедиции. В четвертой описана фотограмметрическая обработка, а также дальнейший геоинформационный анализ с оценкой точностей полученных результатов. В пятой главе представлена разработанная методология проведения подобных исследований. В заключении подведены итоги проведенных работ и рассмотрены перспективы развития применяемого метода.

Глава 1. История развития гляциологии как науки.

В начале своего развития наука гляциология занималась только изучением горных ледников, позже к науке стали относить исследования и других видов льда в природе. Так гляциологию стали рассматривать как науку о природных системах, свойства и динамика которых определяются льдом. Такие природные системы также можно назвать нивально-гляциальными, т.е. относящимся к снегу и льду по происхождению или по преобладанию соответствующих процессов.

Основоположником науки считается швейцарский геолог Орас Бенедикт Соссюр, который в конце XVIII в. опубликовал три тома книги «Путешествия в Альпах», где впервые была приведена классификация ледников, описано их вязкое течение, разновидности морен. До начала XX в. гляциологические исследования носили описательный характер. В 1930ых годах были начаты работы по программе 2-го Международного полярного года – проводились работы на 60 станциях по всему миру. Эти исследования и дали развитие изучению закономерностей оледенения, организации больших станций систематических наблюдений за ледниками, применением точных приборов и новых методов для определения количественных характеристик ледников.

В первой же половине XX в. определились две школы: альпийская и скандинавская. Первую характеризовало использование геодезических методов наблюдений, акцент на физическом подходе, т.е. определении размеров и формы ледников, температуры в их толще, зависимость формы от орографии, изучении их движения, а также изменений во времени. Это направление принесло в гляциологию такие термины как вязкость, пластичность, скольжение и другие. Изучение тесной связи формы ледника и рельефа привело к возникновению морфологической классификации ледников. А исследования покровного оледенения в Гренландии, углубление в полярные проблемы гляциологии привели к появлению новых понятий и терминов, а также разработке нового генетического подхода к явлениям и анализу влияния на режим ледников температуры воздуха, атмосферных осадков, уклона поверхности, денудации. Скандинавская школа обращала большее внимание на климатические и метеорологические факторы аккумуляции и абляции на ледниках. Ученые этой школы всесторонне исследуют взаимосвязи ледников с окружающей средой, в том числе условия их существования и влияние ледников на сток рек. На основе прямой связи режимов ледников с климатом Х. Альманом была построена их геофизическая классификация. А при структурно-петрографическом подходе А. Добровольским была создана петрографическая классификация. Рассматривая льды со

стороны формирующих их процессов и зональности этих процессов, П.А. Шумский выявил три группы ледяных пород (конжеляционные, осадочные и метаморфические), а также выявил закономерности их распространения (Котляков, 1968).

Одним из основных направлений проведения исследований на ледниках стало изучение баланса массы. Балансом массы принято называть соотношение прихода (аккумуляции) и расхода (абляции) массы снега и льда на леднике за определенное время (Гляциологический словарь, 1984). Его вычисляют как в любых точках ледника, отдельных его частях, так и для ледника в целом. Аккумуляцией называют процесс и результат увеличения массы ледника, абляцией – процесс и результат уменьшения массы ледника. Нарастание массы от летней поверхности до наступающего в конце зимы максимума снегонакопления называется зимним балансом массы, а уменьшение массы от максимума снегонакопления до конца таяния – летним балансом массы. Алгебраическая сумма абляции и аккумуляции дает годовой баланс массы. Терминология баланса массы ледников и инструкция по комбинированному использованию двух систем измерений его величин (стратиграфическая и система фиксированных дат) были детально разработаны группой ученых под руководством М. Майера.

В стратиграфической системе предполагаются измерения аккумуляции и абляции в шурфах, скважинах и по речной сети относительно основного маркирующего горизонта – летней поверхности. Данная поверхность формируется к моменту существования наименьшей массы, её образование принимается за переход от одного балансового года к другому. Балансовым годом называют интервал времени, в течение которого последовательное преобладание процессов аккумуляции и абляции образует замкнутый цикл внешнего массообмена ледника (Гляциологический словарь, 1984). Одним из затруднений системы является то, что начало зимнего сезона и балансового года на разных высотных уровнях наблюдается в разное время, поэтому достаточно сложно определить момент максимального водозапаса ледника, а также значение фактического максимума.

В системе фиксированных дат измерения проводятся в течение расчетного года, который, в отличие от стратиграфической системы, не делится на сезоны. Для каждого ледника дата его начала должна быть строго задана, так как именно в нее производятся все измерения. Итоговой величиной служит годовой баланс массы, который может отличаться от алгебраической суммы зимнего и летнего балансов в связи с несовпадением начала и конца балансового года с датами отчета сезонных балансов. Обе системы взаимосвязаны и дополняют друг друга (Котляков, 1968).

Существует множество методов изучения различных характеристик ледников. Классический метод вычисления баланса массы подразумевает измерение нескольких величин – чистый баланс масс в зоне абляции, в зоне аккумуляции и зимний баланс. Границу зон абляции и аккумуляции называют границей питания ледника – это линия, разделяющая области с положительным и отрицательным годовым балансом массы ледника. Зачастую она совпадает с фирновой границей, которая является нижней границей распространения старого фирна (Котляков и др., 1984). В области аккумуляции необходимо выкопать шурф или взять керн из буровой скважины – это делается для того, чтобы установить летнюю поверхность прошлого года. Там же измеряют толщину и плотность слоя между поверхностью в конце балансового и летней поверхностью предыдущего года. Вехи устанавливают в зонах ледяного питания и в области абляции. Их забуривают в лед, а в начале и в конце балансового года отмеряют расстояние от верха вехи до поверхности. Измерения проводят в ряде репрезентативных точек или по равномерной сетке вех по всей площади ледника (по мере возможности). Данные наносят на карту ледника и проводят изолинии чистого баланса и горизонталы. Такие карты в дальнейшем можно использовать для вычисления среднего баланса массы по высотным интервалам, например, в 100 метров.

Гидрологическим методом определяется лишь чистый баланс масс всего ледника. Измерения должны проводиться по всему водосборному бассейну, в котором лежит ледник, с помощью гидрологических станций. Кроме того необходимо измерить общую сумму осадков по всему бассейну. Также лучше учесть количество воды, льда и снега, теряющегося на испарение. Соответственно, если в бассейне находится не один ледник, то баланс масс будет посчитан общий для всех, к тому же будут учтены изменения массы снега и льда со склонов. Этот метод считается менее надежным, чем все остальные. (Войтковский, 1999)

С конца 19 века начал разрабатываться новый метод – фотограмметрический, предполагающий использование наземных оптических снимков местности с известными координатами фотографирования и перекрытием между несколькими соседними снимками. Такой подход позволяет вычислять координаты объектов местности по известным координатам снимков и опорных точек, попадающих в съемку. Первыми результатами обработки материалов метода являлись составляемые карты горизонталей через промежуток времени в один год или несколько лет. Сравнение двух карт давало представление об изменении объема ледника за прошедший период между съемками. Объем также возможно перевести в массу, используя среднюю плотность фирна и льда.

Также необходимо допущение о равномерности плотности с глубиной. Это допущение справедливо для области абляции, но может быть сомнительным вблизи границы питания. Способ, как и гидрологический метод, позволяет вычислить баланс масс всего ледника сразу. При фиксировании изменения высоты какой-либо точки ледника, необходимо учитывать, что помимо абляции и аккумуляции на эту величину также действуют уплотнения снега и фирна, течение ледника, которое противодействует изменению высоты за счет абляции и аккумуляции. Для того, чтобы результаты данного метода представляли гляциологическую ценность, необходимо зафиксировать поверхность на конец балансового года. Изменение объема ледника – заметно более эффективный показатель состояния ледника, чем отступление или наступание его границ.

Первых успехов в нашей стране в сфере исследования ледников наземными фотограмметрическими методами добился Книжников Юрий Фирсович. В его книге 1973 года «Исследование движения льда горных ледников стереофотограмметрическим методом» впервые полностью описаны необходимые к получению данные, методология проведения съемок, а также дальнейшая обработка информации и оценка её качества. Основным итогом работ стала разработка новейшего способа псевдопараллакс для определения скоростей движения поверхности ледника. Чуть позже, в 1990 году, была защищена кандидатская работа Цветковым Дмитрием Георгиевичем на тему «Фотогеодезический мониторинг горных ледников». Целью и задачами работы были разработка комплекса фотограмметрических и геодезических методов оценки и анализа изменений формы и режима ледников на различных уровнях изучения, прогноз и реконструкция их размеров. (Цветков, 1990). В своих исследованиях автор опирался на кинематическую теорию ледников П.А. Шумского.

В работе Д.Г. Цветкова так же присутствует часть наблюдений с помощью аэрофотосъемки с пилотируемых средств. Это означает, что уже с 1970 года появились попытки проведения дистанционного исследования ледников, но на тот момент разработки находились в своей начальной стадии, поэтому основное внимание уделялось наземным способам измерений. Для осуществления аэрофотосъемки с пилотируемых самолётов или вертолётов необходимо выполнить достаточно много условий, таких как наличие взлётно-посадочного места, выбор безопасной высоты полёта, обеспечение достаточного перекрытия снимков для получения стереоэффекта и других.

Ещё одним этапом развития применения дистанционных методов в гляциологических целях было и остается дистанционное зондирование Земли из космоса с

использованием специализированных космических аппаратов, проводящих съемку в нескольких диапазонах электромагнитного спектра. В зависимости от поставленной задачи, используют данные соответствующие ей пространственным разрешением, наличием данных на определенное время и в нужном диапазоне спектра и другими параметрами (Berthier E., 2007).

Помимо измерения баланса массы, проводят исследования поверхностной скорости и скорости деформации, скорости течения льда и деформаций на глубине, изменений толщины льда, температуры, подледного давления воды, скорости изменения наклона и заплывания скважин, изучение ложа ледника, нижней поверхности шельфовых ледников. Основными методами для изучения толщин льда, ложа ледников являются сейсмическое и радиолокационное зондирование, которое всё чаще применяется в современных исследованиях за счет получения уникальной информации и быстрого развития технологий (Bhardwaj, 2016 б).

Глава 2. Беспилотные технологии.

2. 1. История беспилотных летательных аппаратов.

Символическим началом эволюции БПЛА можно считать 1898 год, когда Никола Тесла продемонстрировал первое радиоуправляемое судно ¹. Дальнейшее развитие беспилотных технологий, до конца 1990ых годов, велось в основном под управлением воздушных силовых структур. Особенно активно разработки проводились во времена Первой и Второй Мировой войн (Bhardwaj, 2016 а). Первая мысль об использовании беспилотного аппарата в целях картографии была выражена двумя немецкими учеными Przybilla Н. и Wester-Ebbinghaus W. в 1979 году, когда фотоаппарат установили на борт БПЛА (Bhardwaj, 2016 а). Однако исследование привлекло к себе внимание лишь в конце 1990ых годов, когда прогресс вычислительных и визуализационных способностей ЭВМ и доступность этих технологий для широкого круга пользователей достигли своего максимума.

В настоящее время БПЛА имеют все необходимые технические и функциональные возможности для обеспечения полноценных гляциологических исследований. Полностью автоматизируемые, имеющие широкофункциональное программное обеспечение, предоставляющие возможность получения точных плановых и высотных координат объектов местности, беспилотные аэрофотосъемочные технологии являются наиболее перспективными в использовании и развитии в различных сферах применения.

Первые профессиональные статьи о применении БПЛА в гляциологии появляются в 2005 году. В работе Bhardwaj «UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects» представлено современное исследование о состоянии использования беспилотных технологий в данной сфере по количеству статей, опубликованных в Scopus и Web of science. На рисунке 1 наглядно показано соотношение количества опубликованных работ с использованием БПЛА в любых естественнонаучных исследованиях и применением БПЛА непосредственно для целей гляциологии.

¹ <http://www.ctie.monash.edu.au>

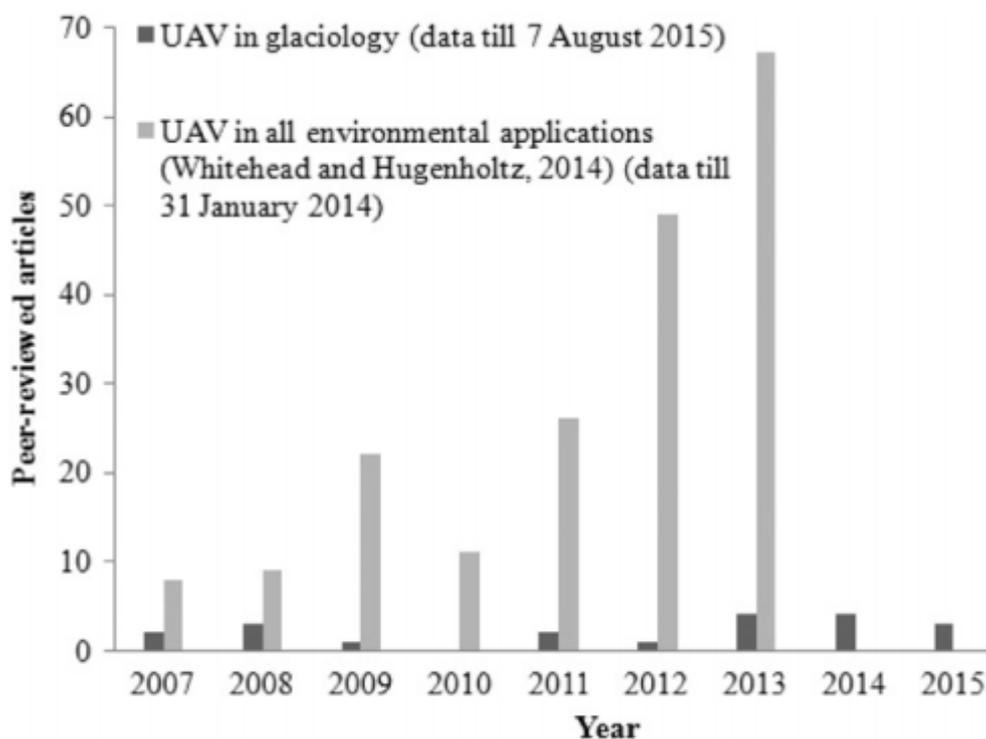


Рис. 1. Соотношение количества опубликованных статей об исследованиях с использованием БПЛА в гляциологии (тёмно-серый) и других естественнонаучных областях (светло-серый). По оси абсцисс – год публикации, по оси ординат – количество статей (Bhardwaj, 2016a).

2. 2. Современное развитие.

На современном этапе развития беспилотная аэрофотосъемка является одним из самых популярных направлений. Это обусловлено несколькими причинами. Первая, и, возможно, основная, это то, что метод позволяет получать аналогичные классическим способам данные с меньшими трудовыми затратами и более безопасно для исследователей. К тому же по объёму данных беспилотные аэрофотосъёмочные технологии превосходят другие (не считая лазерное сканирование) в несколько раз, что позволяет получать более подробные модели. Немалую роль в распространении идеи использования дистанционных методов сыграл факт оперативности получения данных, в отличие от наземных способов. Сейчас оборудование необходимое для проведения беспилотной аэрофотосъемки легкодоступно и соответствует наибольшему количеству предъявляемых к нему требований. Для использования БПЛА в автоматическом режиме от оператора не требуется особой квалификации, достаточно научиться грамотно, в соответствии с погодными и рельефными условиями, составлять полётное задание. А современное программное обеспечение предоставляет возможность полностью

автоматизированной обработки снимков. Более того, беспилотная аэрофотосъемка менее чувствительна к погодным условиям, тогда как дистанционное зондирование из космоса не позволит получить необходимые данные при высокой облачности над интересующей территорией. Также, наибольшее пространственное разрешение снимков, получаемых из космоса, не превышает 30 – 40 см, тогда как БПЛА позволяет получать и 3 см (Toth С., 2015).

Дистанционное зондирование с БПЛА имеет ряд преимуществ перед съемками из космоса, однако по использованию мультиспектральных съемок спутниковое ДЗЗ во много раз превосходит аэрофотосъемку. Так как доступные для использования в научной среде БПЛА ограничены по подъему полезной нагрузки, для них разрабатываются новые мульти- и гиперспектральные камеры, которые пока недостаточно распространены. Поэтому в основном съемки проводят в оптическом диапазоне, который включает в себя видимый и ближний инфракрасный спектры. Наряду с ними всё чаще стали проводить исследования с использованием радиолокационной съёмки. На данный момент существуют единичные исследования, использующие БПЛА с мультиспектральной камерой (Kargel, J. S., 2015). Возможно, в скором времени появится более развитая теория по обработке и использованию таких данных.

В общем случае технология аэрофотосъемки с БПЛА состоит из нескольких этапов, в которые входит также геодезическое обеспечение полётов. Для проведения работ необходимо наличие нескольких опорных и контрольных точек (их количество зависит от площади территории). В научных исследованиях редко используются БПЛА без точного геодезического приемника на борту, который должен обеспечиваться также наземной базовой станцией, установленной на пункте с известными плановыми и высотными координатами и работающей на той же частоте, что и приёмник на борту. Далее изучаемая территория разбивается на несколько полётных заданий в соответствии с возможностями летательного аппарата по дальности и длительности полёта, необходимого пространственного разрешения и перекрытия снимков. В результате полётов должны быть получены все необходимые для дальнейшей обработки данные: набор снимков, координаты центров фотографирования, файлы бортового геодезического приемника и наземной базовой станции, а также набор опорных и контрольных точек в виде списка названий и пространственных координат. Соответственно, эти точки перед полётами должны быть замаркированы для дальнейшего их опознания на полученных снимках. Дальнейшая обработка данных дает возможность получить основные продукты, такие как

цифровая модель местности или рельефа и ортофотоплан. Ортофотопланом называют фотографическое изображение участка местности, полученное из ортофотоснимков, на которых устранены искажения за рельеф местности (Словарь терминов..., 2006). Подробнее технология аэрофотосъемки, применявшаяся в данном исследовании, будет описана в главе 3.

На данный момент исследований ледников с помощью БПЛА не очень много и они в основном сконцентрированы в нескольких областях. Наиболее продолжительными и обширными работами являются исследования в Антарктике (Funaki M., 2014) и на Шпицбергене (Hodson A., 2007). Также достаточно давно проводятся в Альпах (Walter M., 2007) и Непальских Гималаях (Immerzeel W., 2014). Исследования самые разнообразные: применение лидаров (LIDAR), уточнение данных дистанционного зондирования Земли, обнаружение лазерно-индуцированных флуоресцирующих излучений фотосинтетических пигментов в ледниковых экосистемах, радарное зондирование и много другое с применением БПЛА самолетного и вертолетного типов (Bhardwaj, 2016). Так как работы проводятся в совершенно непохожих условиях (температуры, высоты, ветра, осадков, освещенности), то и применяемые методики и технологии достаточно разнообразны, подбираемые под преобладающие условия изучаемой территории. Так, например, для исследований в Антарктике сначала были проведены работы по разработке непосредственно БПЛА, который удовлетворял бы максимальному количеству необходимых характеристик. С этой целью было разработано шесть прототипов, которые проходили испытания непосредственно на территории будущих исследований.

Наиболее цитируемым и эффективным со стороны получаемых результатов является исследование в Непальских Гималаях (Bhardwaj, 2016), проводимые группой ученых и студентов с Утрехтского университета, Нидерланды. С помощью БПЛА Swingle CAM SenseFly ими были получены цифровые модели рельефа и ортофотопланы, по которым в дальнейшем проведен ряд анализов. Так например ими было проведено совмещение материалов аэрофотосъемки и измерений энергетического баланса на озёрах и скалах для понимания различий в режимах таяния покрытого и не покрытого моренным материалом льда. В следующем исследовании, при накоплении материалов, ими был проведен расчет сезонных поверхностных скоростей ледника Лирунг. Данное исследование на данный момент является передовым, по его результатам проводятся аналогичные исследования в районах с похожими условиями. В статье Bhardwaj 2016 года также описаны перспективы развития данного направления, среди которых указаны: выход гляциологических

исследований на новый уровень за счет использования высокоточных методов и данных аэрофотосъемки с БПЛА, оценка баланса масс ледников, изучение скоростей поверхности, составление карт одних и тех же ледников с заданной периодичностью для наблюдения за их динамикой и развитием, а также расширение возможностей при использовании мульти- и гиперспектральных камер.

Глава 3. Полевые работы.

3. 1. Краткое описание истории экспедиции.

Впервые подробное описание ледников монгольской части массива Табын-богдо-ола дал В.В. Сапожников. Во время экспедиций 1905, 1906 и 1909 гг. им были открыты крупнейшие ледники массива, проведены маршрутные, а на отдельных участках и инструментальные съемки. На основе полученных полевых материалов были составлены схема оледенения всего массива Табын-богдо-ола и подробная карта гидрографии Монгольского Алтая. В 1916 г. на ледниках массива Табын-богдо-ола побывали Б.В. и М.В. Троновы. В каталоге ледников Алтая 1925 г., составленного по результатам полевых исследований, а также обобщения литературных и картографических материалов, приведены частичные описания морфологических характеристик 25 ледников бассейнов рек Цаган-Ус и Цаган-Гол общей площадью около 110 км². К середине XX в. дополнительно сделано подробное описание крупнейшего ледника Алтая – ледника Потанина, длиной около 19 км и площадью 50 км². Ледники Потанина и Александры являются истоком реки Цаган-гол. Сам же ледник Потанина является самым крупным не только для Цаган-гола, но и для всего горного узла Табын-богдо-ола.

В 1987 г. после значительного перерыва была организована Советско-Монгольская экспедиция Алтайского государственного университета (АГУ), в ходе которой проведена фототеодолитная съемка ледника Потанина, уточнены его размеры, открыты новые ледники, дана оценка динамики оледенения с середины XIX в. Всего в это время в массиве насчитывалось 60 ледников площадью около 223 км². В конце XX – начале XXI вв. гляциологические исследования в регионе продолжают сотрудники АГУ. По топографическим картам масштаба 1:200 000 составлен каталог ледников Табын-богдо-ола, приведены схемы расположения ледников на 1970-е годы (Сапожников, 1949; Сыромятина и др., 2014).

Летом 2015 года кафедра физической географии и ландшафтного планирования при участии кафедры картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского государственного университета организовала экспедицию при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований на горный массив Табын-богдо-ола (Монголия) для проведения исследования двух ледников Потанина и Александры, находящихся на границе трёх государств: России, Китая и Монголии. Сотрудники кафедры физической географии уже длительный период времени проводят экспедиционные исследования в горах Алтая и

только последние несколько лет изучают горный массив Табын-богдо-ола. Сейчас исследования проводятся совместно с сотрудниками Ховдского государственного университета (Монголия).

Целью экспедиции являлось изучение баланса масс ледников Потанина и Александры за сезон абляции 2015 года с помощью двух методов измерений: классического гляциометеорологического и аэрофотограмметрического с применением беспилотного летательного аппарата. Для этого было предпринято разделение экспедиции на две части – июньскую и августовскую (16 июня - 6 июля, 18 августа – 7 сентября), т.е. в начале и конце сезона. Соответственно, перед исследователями было поставлено несколько задач, самая важная из которых – это произвести сравнение указанных двух методов. Каждый из них включает в себя комплекс работ. Со стороны аэрофотограмметрического метода это геодезические исследования и проведение аэрофотосъемки.

В экспедиции приняли участие: старший преподаватель кафедры физической географии и ландшафтного планирования СПбГУ Сыромятина Маргарита Владимировна, ассистент кафедры картографии и геоинформатики СПбГУ Бляхарский Дмитрий Петрович, аспирант кафедры физической географии и ландшафтного планирования СПбГУ Терехов Антон Викторович, выпускник магистратуры направления нефтегазовое дело СПбГУ Мозгов Евгений Викторович, магистрантка кафедры физической географии и ландшафтного планирования СПбГУ Верес Арина Николаевна и автор данной выпускной квалификационной работы.



Рис. 2. Вид на ледник Александры и разбитый лагерь перед боковой мореной ледника Потанина.

3. 2. Физико-географическое описание района исследований.

Ледники Потанина и Александры находятся на горном массиве Табын-богдо-ола, являющемся частью Монгольского Алтая. Хребет Монгольский Алтай находится в пределах северо-западной части Монголии. Район исследования располагается непосредственно у границ трёх государств (России, Китая и Монголии, на территории которой и находятся ледники). Средняя высота хребта Монгольский Алтай 3500 – 3800 м, а его наивысшая точка – г. Хуйтен – 4374 м, находящаяся поблизости от района проведения исследований.

Климат территории резко континентальный, но при этом на территории Алтая происходит «проникновение трех типов климата: 1) Западно – Сибирского континентального циклонического; 2) Монгольского континентального антициклонического; 3) Средне – Азиатского, характеризующегося большой сухостью над равниной, при этом большим вертикальным градиентом осадков из-за большой абсолютной влажности воздуха» (Отгонбаяр, 2013).

Общая циркуляция атмосферы является ведущим климатообразующим фактором. Вне зависимости от времени года на территории преобладают ветры от западных до северных направлений со скоростью 1 – 5 м/с. Средние температуры сильно зависят от абсолютной

высоты и условий рельефа. Зимой температуры колеблются в широком диапазоне от -17 до -34°C. Для летнего сезона характерны волны холода и тепла, возможны снижения температуры до отрицательных значений, но в основном преобладают от 3 - 4°C до 13 - 14°C. Годовое количество осадкой на высоте более 3000 метров в среднем составляет 250 – 300мм. В холодное время года все осадки выпадают в твердом виде.

3.3. Гляциологические исследования.

Классический гляциологический метод, также как и любые другие, включает в себя несколько видов работ: геодезические, гляциологические и метеорологические. Для начала, перед непосредственным проведением работ, по космическому снимку или карте исследуемого района специалистом был произведено выделение зон ледника и выбраны места для будущего забуривания гляциологических вешек. В зависимости от морфологии ледника выделяют различное количество зон, в случае ледников Потанина и Александры это зоны аккумуляции, переходная, зона абляции и язык ледника (рис. 3). В основном выделение происходило по предположительному характеру таяния в данной зоне. В каждой из них было отмечено примерное расположение 3 – 5 реек, по которым в дальнейшем определена толщина стаявшего льда. Вешки стараются распределять равномерно, для полного охвата выделенной зоны. Выбранные места для забуривания были занесены в GPS навигатор для более удобной ориентации на леднике.

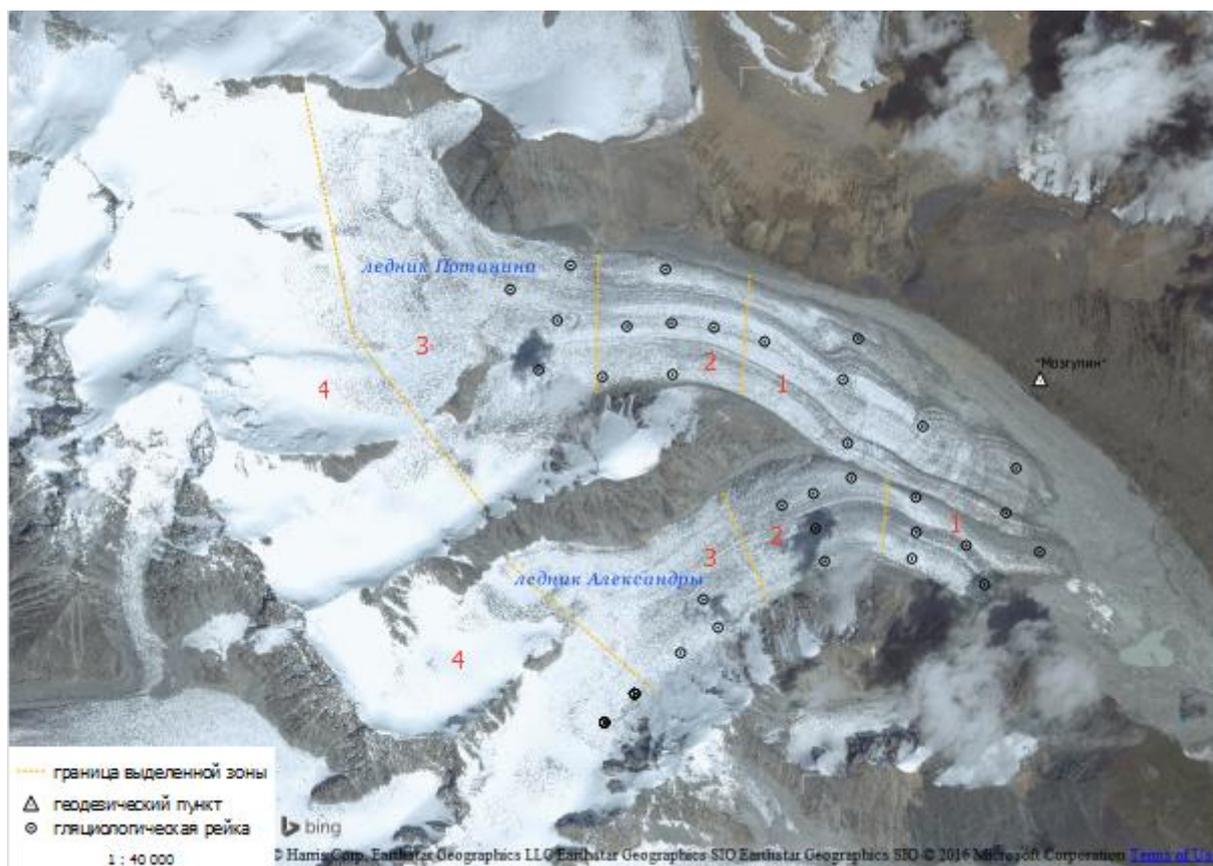


Рис. 3. Общий вид ледников на спутниковых снимках, поставляемых компанией Bing. Показано условное разделение на зоны: 1 – зона языка, 2 – зона абляции, 3 – переходная зона, 4 – зона аккумуляции. Отображены предположительные места забуривания рек.

Также заранее были запланированы места для закладки базовой станции и двух контрольных пунктов. Они обеспечивали не только гляциологические, но и аэрофотограмметрические работы. Базовая станция для наземных измерений обеспечивала основу для измерения положения забуренных рек. Контрольные пункты были необходимы для обеспечения контроля над базовой станцией в силу особенностей прохождения экспедиции: она была разделена на два этапа, между которыми было два месяца. За этот период базовый пункт мог сместиться, так как он располагался в районе воздействия ледника на окружающую территорию. Поэтому контрольные пункты были запланированы на предположительно стабильном участке, образуя треугольник с базовой станцией.

Далее были запланированы места установки метеорологических станций. Их было выбрано 4: две в зонах аккумуляции Потанина и Александры, одна на срединной морене и последняя на боковой морене. Метеостанции автоматически собирают данные о температуре, осадках, влажности, давлении и отраженной радиации. За счёт их разного

местоположения была собрана информация о характере отражения солнечной радиации не только от снега, но и ото льда и поверхности морен.

По прибытию на место был заложен базовый пункт примерно по запланированному местоположению, но уже с поправкой на действительную ситуацию. На следующий день—оба контрольных. Подробнее геодезические работы будут описаны в разделе аэрофотограмметрических исследований.

Планирование работ по дням производилось примерно, так как их выполнение сильно зависит от погодных условий и ситуации на леднике, которая во время активного таяния сильно меняется даже за несколько часов. Зачастую невозможно было вернуться тем же путём, потому что переправы через потоки воды уже были разрушены солнцем и самим потоком. По снимку были определены предположительные маршруты с учетом того, что на леднике достаточно много опасностей, которые меняют своё положение год от года. Поэтому маршрут на первый день составлялся на близлежащие территории, с целью проведения забуривания вешек и разведки ситуации, поиска возможных путей перехода от одного ледника к другому, возврата и перемещения от одной выделенной зоны к другой. Часть реек не была установлена по нескольким причинам. Так, например, на запланированных участках оказывалась совершенно неподходящая поверхность, которую невозможно было пробурить имеющимися инструментами. Еще одна часть не была установлена в зоне аккумуляции ледника Потанина, так как маршрут оказался слишком опасным, попадалось много широких трещин, которые в дальнейшем, покрытые снегом, могли быть не замечены, но рейки были забурены максимально близко к этой зоне. Постепенно, за несколько дней, была забурена большая часть реек, установлены запланированные метеостанции, а также проведен ряд других вспомогательных работ.

К таким работам относится координирование реек (рис. 4). Было решено проводить измерения в режиме быстрой статики, стоя на рейке около 10 – 15 минут, со слежением за количеством спутников и геометрической ошибкой. Во время таких работ также велись наблюдения на базовой станции, относительно которой в дальнейшем были обработаны все проведенные измерения местоположения реек. Координирование было выполнено в конце забуривания всех реек в течение двух дней, для уменьшения влияния ошибки смещения вешек за счет таяния льда. К геодезическим работам также относится координирование положения границы питания, определяемой на глаз. Кроме того, при проведении работ в зонах аккумуляции, разрабатывались шурфы для определения прошлогодней летней

поверхности льда (он выделяется плотностью и цветом), а также для вычисления плотности снега с помощью плотномера.



Рис. 4. Измерение местоположения гляциологической рейки ГНСС-приёмником в режиме быстрой статики. На фотографии аспирант кафедры физической географии и ландшафтного планирования СПбГУ Терехов А.В.

Во время второй части экспедиции необходимо зафиксировать все изменения, произошедшие за месяц активного таяния. Сначала, по GPS навигатору были найдены все оставшиеся рейки. В основном вытаявшие рейки были обнаружены в зоне языка, где таяние проходит интенсивнее всего. От оставленной при забурировании засечки на вешке была измерена толщина стаявшего льда. Одновременно с этим ГНСС приёмником фиксировалось её новое местоположение. Благодаря такому комплексу работ возможно восстановить не только вертикальную, но и горизонтальную скорость движения ледника. Также было закоординировано новое положение границы питания. В конце всех работ сняты метеостанции и собрана вся информация, накопившаяся за время наблюдений.

В результате гляциологических измерений, совместно с метеорологическими наблюдениями, были получены данные с большого количества забуренных рек, представляющих собой толщину стаявшего льда, а также вектора перемещения рек за весь сезон наблюдений. Изменение высоты положения границы питания ледника позволяет сделать выводы о характере процессов, на нём происходящих. Также данные дополняются отметками высот предыдущей летней поверхности, найденной в шурфах зон аккумуляции.

Совместно с информацией с метеостанций весь набор данных позволяет смоделировать поверхность ледника, его изменения и процессы на нём происходящие. Более длительные наблюдения позволят делать прогнозы развития проходящих процессов.

3. 4. Аэрофотограмметрические исследования.

Аналогично гляциологическим исследованиям, аэрофотосъемка нуждается в планово-высотном обосновании. Базовая станция закладывалась (рис. 5) в непосредственной близости от лагеря, чтобы обеспечить удобство работы с геодезическим прибором и контроль над зарядом и количеством свободной памяти. Контрольные пункты были заложены выше, на соседнем склоне, образуя треугольник с базовой станцией. Такое положение позволяет произвести контроль положения базы через несколько месяцев после её заложения, а также после более длительного периода, если исследования на данных ледниках будут повторяться.



Рис. 5. Закладка пункта «Мозгулин». На фотографии аспирант кафедры физической географии и ландшафтного планирования СПбГУ Терехов А. и выпускник магистратуры направления нефтегазовое дело 2014 года Мозгов Е.В.

Базовый пункт, названный «Мозгулин», был заложен на территории разбитого лагеря, он также отмечен на абрисе (рис. 6) для упрощения его нахождения в последующие

экспедиции. Контрольные пункты было решено заложить на противоположном склоне, где влияние ледника наименьшее, а, соответственно, возможность их смещения также уменьшается. Сами пункты были заложены металлическими арматурами длиной около 2.5 м, на местности обозначены турами (кладка камней в коническую форму). После закладки арматуры были накернены для более точной многоразовой центрировки. Для определения координат базового пункта были проведены десятичасовые статические наблюдения, результат которых был обработан на ближайшие пункты сети станций ITRF² (Международная земная система отсчета, международная геодинамическая сеть станций) с использованием точных эфемерид, публикуемых через две недели после дня наблюдений. К использованным базам относятся NVSK – Новосибирск, ULAB – Улан-Батор, BADG – Бадары, URUM – Урумчи и SUMK – Сумкар.

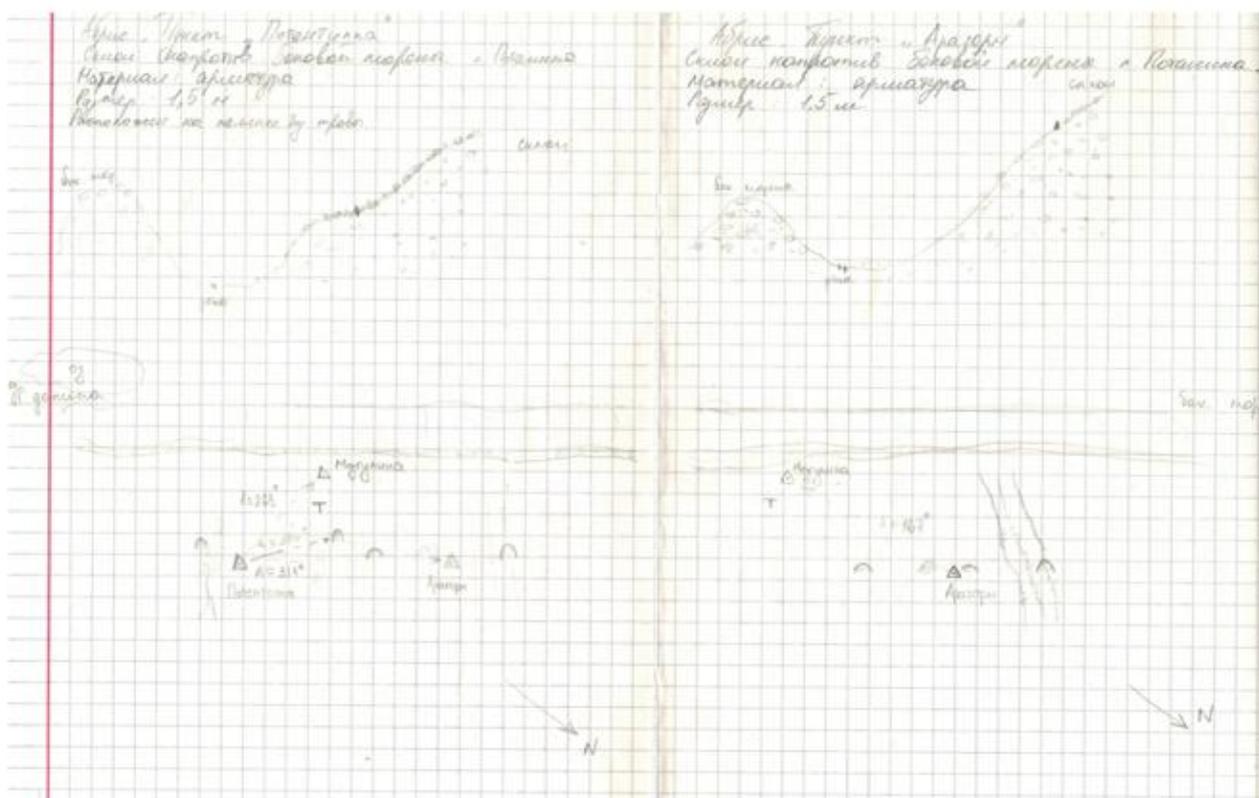


Рис. 6. Абрис трёх геодезических пунктов «Мозгулин», «Арагорн» и «Потентилла», заложённых для обеспечения аэрофотосъёмочных работ.

Контрольные пункты были названы «Арагорн» и «Потентилла» и заложены на примерно равном расстоянии друг от друга и от базового пункта (рис. 7). Наблюдения велись по очереди между базовой станцией и «Арагорн», «Арагорн» и «Потентилла» и

² <http://itrf.ensg.ign.fr/>

«Потентилла» и «Мозгулин». Таким образом приходилось переносить и центрировать лишь один прибор. Возможности проведения наблюдений на всех трёх станциях не было из-за отсутствия достаточного количества оборудования. В первой части экспедиции наблюдения были проведены не по замкнутому треугольнику, поэтому для обработки также использовались станции ITRF, во второй заезд такой ошибки совершено не было. Аналогичные работы были выполнены во второй части экспедиции для проведения контроля смещения. Более того, в августе, в конце экспедиции, за день до отъезда, были проведены повторные наблюдения треугольника базового и контрольных пунктов во избежание возможных проблем с обработкой и для контроля смещений. Соответственно, простейшая обработка производилась на месте в поле для убеждения в возможности продолжения проведения работ. Измерения проводились с помощью специального геодезического оборудования Trimble R6-2 Internal и Trimble R8 Internal. Оба приёмника двухчастотные, двухсистемные, в качестве базовой станции использовался прибор R8, так как на нём есть возможность записи с частотой 10 Hz, что соответствует частоте работы бортового высокоточного геодезического приемника.



Рис. 7. Расположение трёх геодезических пунктов «Мозгулина», «Арагорн» и «Потентилла» с указанием эллипсоидального расстояния в июне между ними.

После проведения всех геодезических измерений и необходимой обработки, можно было приступить к планированию полётов. Было решено проводить съёмку без опорных пунктов и, соответственно, без их маркирования. В похожих исследованиях были достигнуты удовлетворительные результаты со средней квадратической ошибкой в плане и по высоте 10 – 20 см (Whitehead and Hugenholtz, 2014; Turner et al., 2014). Данная технология была апробирована и в прошлогодней экспедиции с аналогичным оборудованием. Такой подход заметно облегчает весь процесс подготовки к аэрофотосъёмке.

Полёты проводились аэрофотосъёмочным комплексом Геоскан 101 (рис. 8), в который входит борт Геоскан 101 с необходимым геодезическим оборудованием, автопилотом и фотокамерой, наземная станция управления полётами (НСУ) и стартовая складная катапульта. В приложении 1 указаны все подробные характеристики БПЛА. НСУ включает в себя ноутбук с установленной программой Geoscan Planner, позволяющей планировать полёты, проводить предполётную подготовку борта, следить за ходом аэрофотосъёмки, а в критичных ситуациях – переключиться на ручное управление.



Рис. 8. Вид беспилотного летательного аппарата серии Геоскан 101.

Вся предполётная подготовка состоит из нескольких этапов. Первый – это установка наземной базовой станции. Для получения более точных координат центров фотографирования на борту БПЛА установлен высокоточный двухсистемный, двухчастотный геодезический приёмник Topcon, который должен быть обеспечен наземной базой, относительно которой в дальнейшем будет производиться обработка полученных

данных. Во время полётов базовая станция работала в режиме статики с частотой записи 10 Hz, с такой же частотой работает геодезический приёмник на борту.

Второй – создание полётного задания (рис. 9). Выбирался участок ледника, который был доступен по погодным условиям и соответствовал возможностям БПЛА по продолжительности полёта. Обычное время полёта данного комплекса составляет примерно 1 час. Но в условиях пониженных температур и необходимости набирать около километра высоты оно снижается до 30 – 40 минут. При формировании задания очерчивалась область площадной аэрофотосъемки, в этот момент НСУ отображала предполагаемое время полёта. Так как время работы аккумуляторов ограничено, особенно в неблагоприятных погодных условиях ледника, необходимо очень тщательно следить за предположительным временем полёта. Одновременно с площадью аэрофотосъемки планировались перелёты и посадка, учитывающие особенности преобладающих на тот момент воздушных масс, а также рельефа и особенности БПЛА, такие как выбрасывание парашюта на определенном расстоянии от земли (задаётся в настройках, в описываемых полётах было установлено 50 м). В соответствии с рельефом, который выступает в качестве подложки в программе НСУ, выбиралась высота полёта, от которой зависит пространственное разрешение снимков, а также отдельно указывалось их продольное и поперечное перекрытие (в данных полётах 70/60%). В параметрах полётного задания есть возможность выбрать полёт на постоянной высоте (что в случае с наклонной снимаемой поверхностью означает переменное пространственное разрешение снимков) или с постоянным пространственным разрешением.

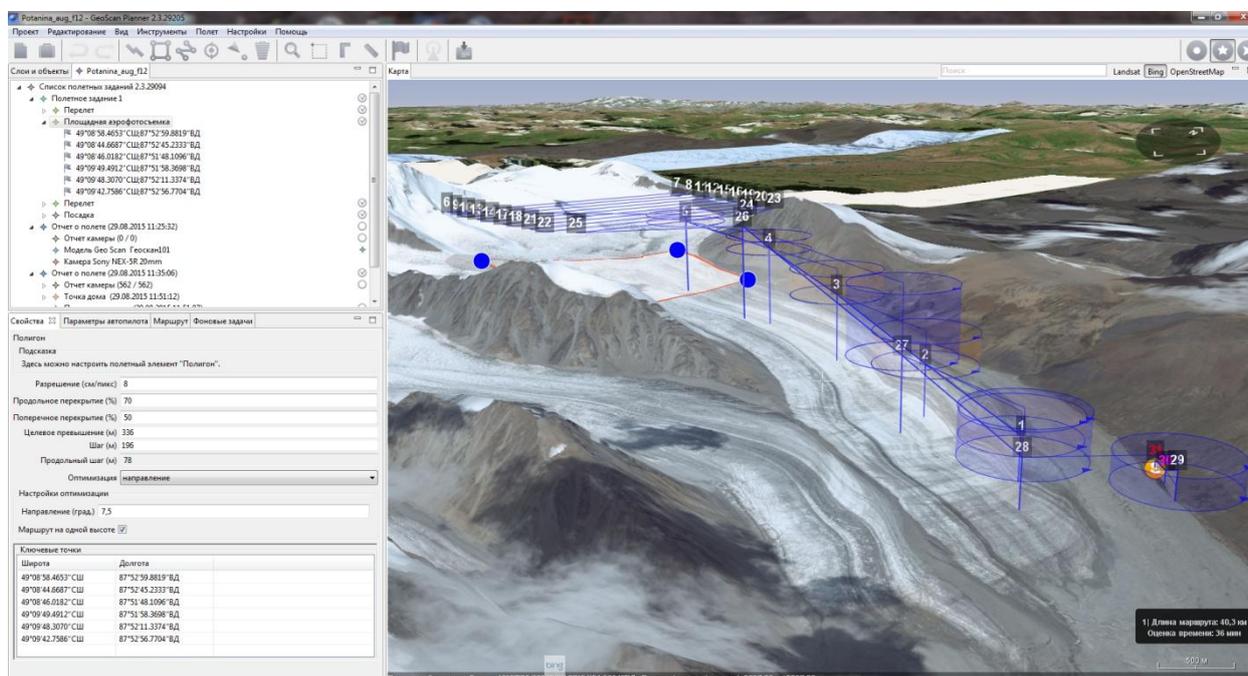


Рис. 9. Пример создаваемого полётного задания с отображением подлёта с набором высоты, площадной аэрофотосъемки и отлёта.

Так как порывы ветра, термики и резкие изменения погодных условий во время полёта на леднике – это явления частые, было решено летать на постоянной высоте, чтобы уменьшить риск потери самолёта. На нескольких полётах были проведены эксперименты с подбором настроек. Если был выбран параметр полёта с постоянным пространственным разрешением, то практически на каждом новом галсе (в зависимости от уклона поверхности) БПЛА набирал или снижал высоту. Это достаточно опасно, так как вблизи непокрытых снегом и льдом горных пород зачастую образуются термики из-за большой разности температур снега и темных горных пород, которые нагреваются заметно быстрее. Такие ветровые явления сильно влияют на прохождение полёта. Именно поэтому был выбран режим полёта с постоянной высотой. К тому же было решено проводить полёты чаще вдоль ледника, чем поперек, так как в этом случае самолёт меньше производил разворот вблизи опасных участков скал. Иногда, из-за обнаруженного во время выполнения аэрофотосъемки сильного ветра приходилось менять ориентацию полёта, чтобы БПЛА не терял и не набирал высоту из-за его воздействия. Если не слишком сильный ветер дует со стороны крыла борта – это меньше влияет на состояние БПЛА (но сбивает курс), чем ветер, дующий вдоль полёта, из-за которого возможны просадки или резкие наборы высот. Однако необходимо понимать, что при слишком сильном ветре (от 15 м/с) или штиле, безопаснее вовсе не проводить аэрофотосъемку.

Ввиду того, что максимальная разность высот между точкой взлёта и самыми дальними участками для съёмки составляет около 1000 метров (рис. 10), перелёты необходимо было составлять с плавным набором высоты, чтобы дать время БПЛА стабилизироваться и не разрядить аккумулятор ещё на подлёте. Планирование старта и посадки также зависит от погодных условий, перед этим проверялись скорость и направление ветра. Старт с катапульты происходил против ветра, скорость которого не должна была превышать 15 м/с. Посадка более контролируема оператором, зачастую парашют был выброшен по специальной кнопке, а не по запланированному ранее заданию, так как за время полёта условия посадки изменились.

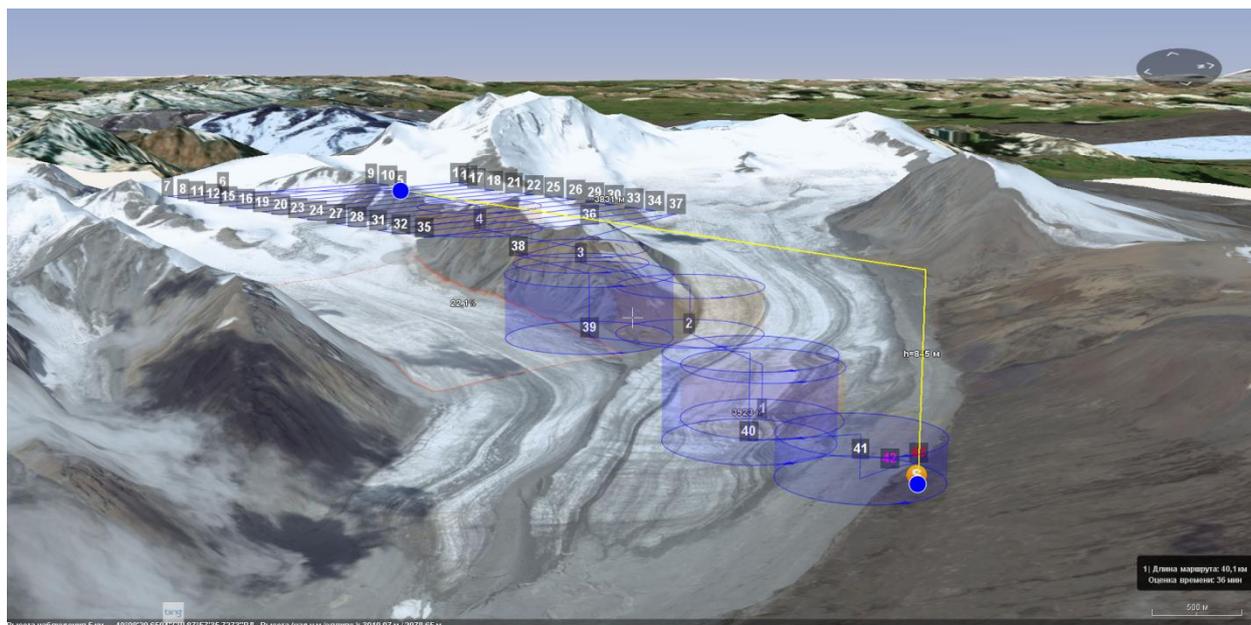


Рис. 10. Пример перепада высот 845 м между точкой старта и высотой полёта.

После планирования полёта комплектовался борт, проверялся, проходил предполётную подготовку. Перед первым полётом в день борт собирался полностью, так как хранился в разобранном состоянии. Собирались корпус с крыльями, устанавливались аккумулятор, фотоаппарат. В автопилот и фотоаппарат устанавливались форматированные карты памяти. Комплектовался парашют и устанавливался в соответствующее место в нижней части борта, чтобы при посадке самолёт переворачивался и приземлялся без повреждения фотоаппарата. Производилось подключение аккумулятора, фотоаппарата и геодезического бортового приемника к автопилоту. После этого НСУ подключалась к борту по радиомодему, можно было начинать предстартовую подготовку. В неё входила проверка функционирования барометра, измерителя скорости ветра, элеронов, фотоаппарата – делается несколько снимков. Также на борт передавались настройки и само полётное задание. После предстартовой подготовки борт готов к аэрофотосъемке. Такая процедура проводилась перед каждым стартом. Борт устанавливался на катапульту, режим из «подготовки» переводился оператором в режим «старт», поймав момент без сильных порывов ветра, спускалась катапульты, и борт переходил в режим выполнения полётного задания (рис. 11).

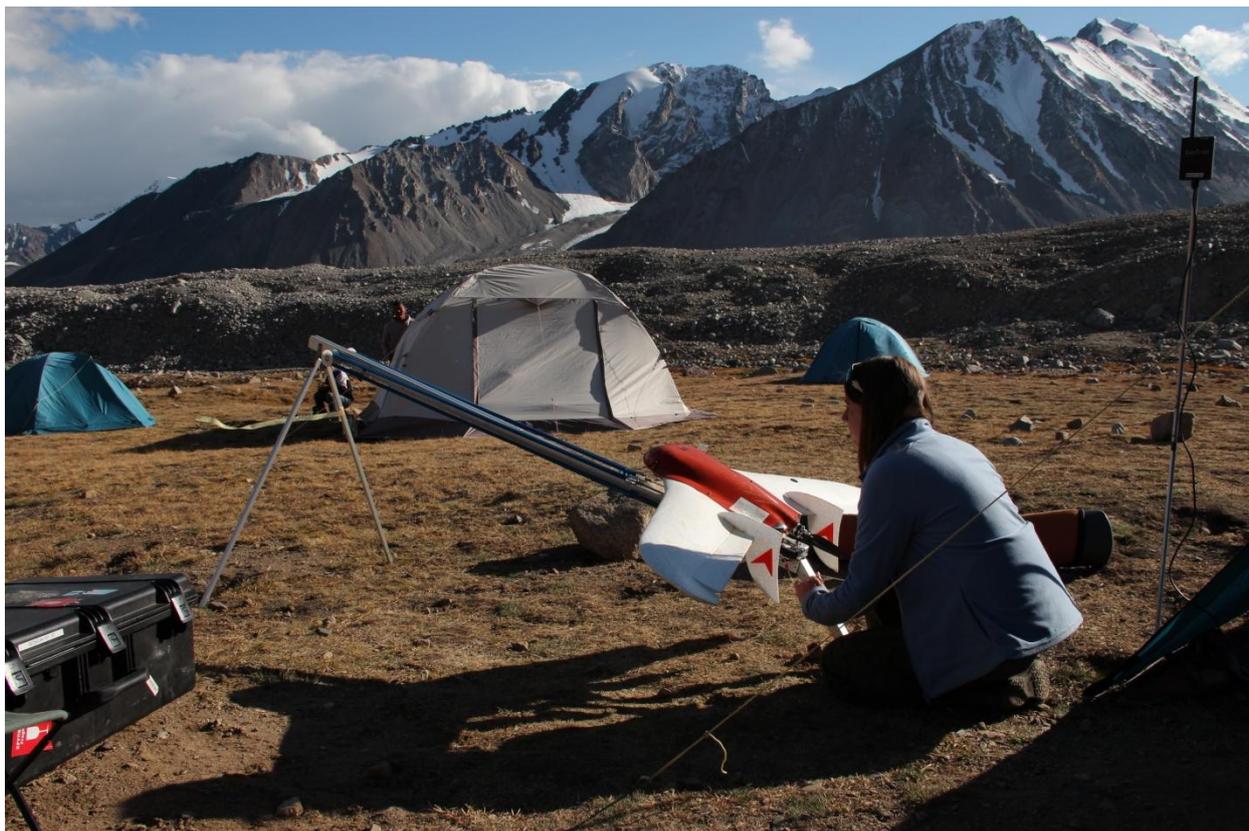


Рис. 11. Запуск БПЛА. На фотографии автор данной выпускной квалификационной работы.

После посадки борт выключался оператором не сразу, так как возможна передача не дошедших паспортов фотоснимков. По окончании передачи всех файлов всё отключалось от аккумулятора, извлекались карты памяти из фотоаппарата и автопилота. После копирования снимков и файлов автопилота и геодезического приемника, с помощью НСУ происходило формирование файла привязки для снимков и самого проекта НСУ, который во время обработки может дать дополнительную информацию о ходе полёта.

Когда все данные о полёте были скопированы на другой носитель и сформированы все необходимые файлы, происходил переход к другому полёту, если позволяли погодные условия. Также во время следующего полёта использованный аккумулятор ставился на зарядку, всего было в обращении 3 литий-полимерных четырехбаночных аккумулятора.

В общей сумме за первую часть экспедиции (июнь) было проведено 19 полётов площадью 43 км² (рис. 12), во вторую (август) – 17 полётов площадью 40 км² (рис. 13). Это примерно 75% от общей необходимой к съёмке территории.

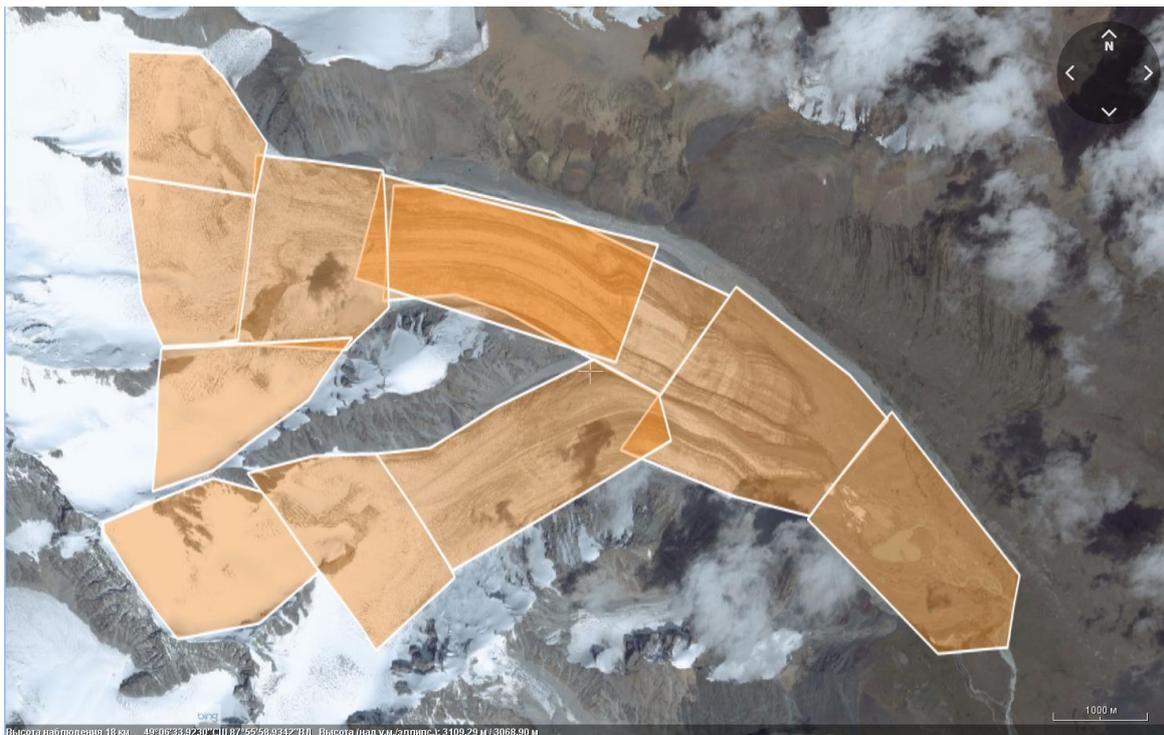


Рис. 12. Покрытие аэрофотосъемкой ледников Потанина и Александры во время первого периода наблюдений (июнь).

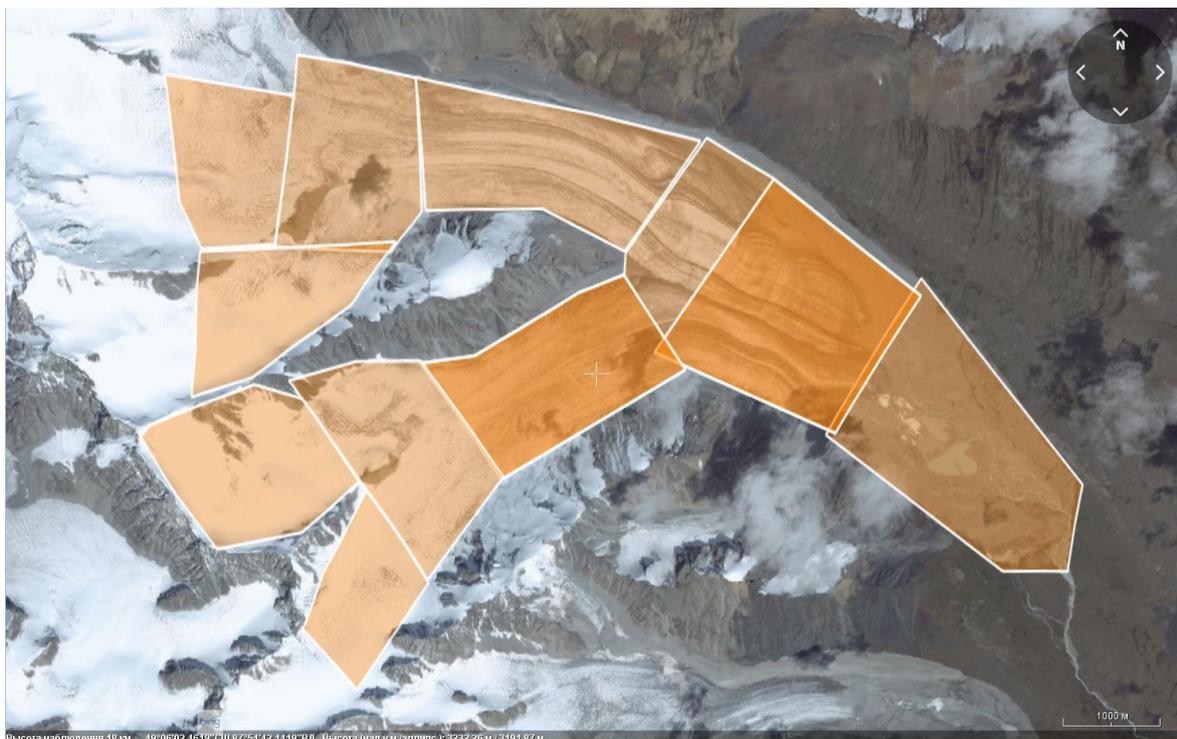


Рис. 13. Покрытие аэрофотосъемкой ледников Потанина и Александры во время второго периода наблюдений (август).

В июне аэрофотосъемка была проведена в течение 6 дней. Что немного больше, чем в августе, из-за неподходящих погодных условий, к тому же в первые дни полёты были в

основном экспериментальные, необходимо было понять все опасные ситуации, которые могут возникнуть при проведении аэрофотосъемки на больших высотах. Если при полётах над языком есть шанс, что после аварийной посадки борт будет найден, то при работах в зонах аккумуляции его почти нет. Некоторые полёты приходилось повторять из-за проблем с фотоаппаратом – периодически карта памяти отходила от контактов, соответственно, происходили потери снимков. Те полёты, в которых потерь было слишком много, приходилось переделывать. Через несколько попыток проблема была обнаружена и решена, поэтому дальнейшие измерения происходили в штатном режиме. Более того, существовала необходимость в аэрофотосъемке зон абляции и языка в силу того, что именно в этих зонах идет наиболее интенсивное таяние, около 5 см в день по предыдущим исследованиям. Это значит, что если разброс между съемками одной зоны, но разных её участков, будет составлять больше 2 – 3 дней, то погрешность создаваемой модели сильно возрастает. Также было обнаружено на первых полётах, что борт не зависимо от территории теряет высоту. Было решено увеличить круизную скорость (т.е. воздушная скорость, которую должен выдерживать БПЛА во время полёта) с 23 до 25 м/с, что и решило проблему. Скорее всего, это связано с тем, что на этих высотах (около 3000м) плотность воздуха меньше и скорости в 23 м/с недостаточно для поддержания борта на стабильной высоте. В августе все полётные работы заняли 4 дня. Сокращение затраченного времени связано с тем, что в июне был получен весь необходимый опыт, ошибки повторены не были, но возникла другая проблема с фотоаппаратом. В комплекте с бортом была предоставлена камера старой конфигурации - аккумулятор фотоаппарата модернизировался, из него удаляли сам аккумулятор и оставляли только корпус, в котором производилось отверстие и изнутри к контактам корпуса подпаивали провода. Следствием чего фотоаппарат включался в единую энергетическую цепочку БПЛА. В результате эксплуатации выяснилось, что со временем происходит окисление контактов корпуса аккумулятора и на фотоаппарат прекращается подача электричества, поэтому в фотоаппаратах нового образца реализуют другую технологию. Соответственно, контакты приходилось чистить перед каждым полётом, после того, как проблема была обнаружена.

Покрытая съемкой площадь составила примерно 75% от общей интересной для изучения территории. В последующие экспедиции необходимо делать упор на аэрофотосъемку целиком именно зоны аккумуляции, в которую зачастую невозможно добраться пешком, тогда как в зонах абляции наземные наблюдения произвести гораздо легче, а, соответственно, данные с них будут получены в любом случае – сняты ли эти

участки аэрофотосъемкой или нет. В эти экспедиции не была отснята вся площадь в силу нехватки опыта составления полётного задания в условиях непредсказуемых погодных условий на высоте полёта и сложной орографической ситуации. Не была охвачена достаточно большая часть зоны аккумуляции ледника Потанина и небольшая ледника Александры. Зона аккумуляции Потанина очень удалена от места лагеря и идти туда довольно сложно в силу уклона и большого количества опасностей в виде трещин под снегом, которые можно не заметить, или глубоких рек, образующихся на ледниках во время интенсивного таяния. Поэтому с этих зон не было получено ни аэрофотосъемочных, ни гляциологических данных, только с небольшой её части.

В итоге работ был получен массив снимков за две части экспедиции, покрывающих большую часть ледников, файлы привязки снимков с навигационными координатами, файлы базовой станции и точного бортового геодезического приёмника. А также все материалы измерений координат базовой станции и наблюдений треугольника базы с контрольными пунктами. Все материалы были использованы в дальнейшей обработке с целью получения ортофотопланов и цифровых моделей рельефа двух поверхностей ледника: во время начала сезона таяния и в конце этого сезона. Эти материалы в последующих вычислениях дадут информацию о характере таяния ледников, их поверхностях и о процессах, происходящих на них в сезон абляции.

Глава 4. Камеральная обработка.

4. 1. Обработка аэрофотограмметрических данных.

Полученные полевые данные были подвергнуты обработке в нескольких программных пакетах с использованием дополнительных данных. Так, геодезические статические измерения обрабатывались в программе Trimble Business center, обработка кинематических измерений производилась в Magnet Office Tools, а вся аэрофотосъемка была обработана в Agisoft Photoscan Pro, там же были получены ортофотопланы и ЦМР (в данном случае ЦММ и ЦМР представляют собой по большей части одну и ту же поверхность, так как на исследуемой территории отсутствует растительность и конечная интересующая поверхность не покрыта никаким мешающим изучению и расчетам материалом, не считая единичных крупных камней).

Первым этапом была проведена обработка статических измерений координат базовой станции совместно со станциями сети ITRF. Для уравнивания было решено выбрать наиболее близко расположенные к пункту «Мозгулин» станции (рис. 14). Это NVSK – Новосибирск, ULAB – Улан-Батор, BADG -Бадары ,URUM – Урумчи и SUMK – Сумкар. Данные измерений на референцных станциях были найдены на сайте SOPAC (Scripps Orbit and Permanent Array Center). А также с сайта IGS Product Availability (GPS) и NASA CDDIS (GLONASS) были найдены точные эфемериды (IGS Final Orbits) в формате sp3. Такие данные публикуются примерно через 12 дней после проведения измерений.

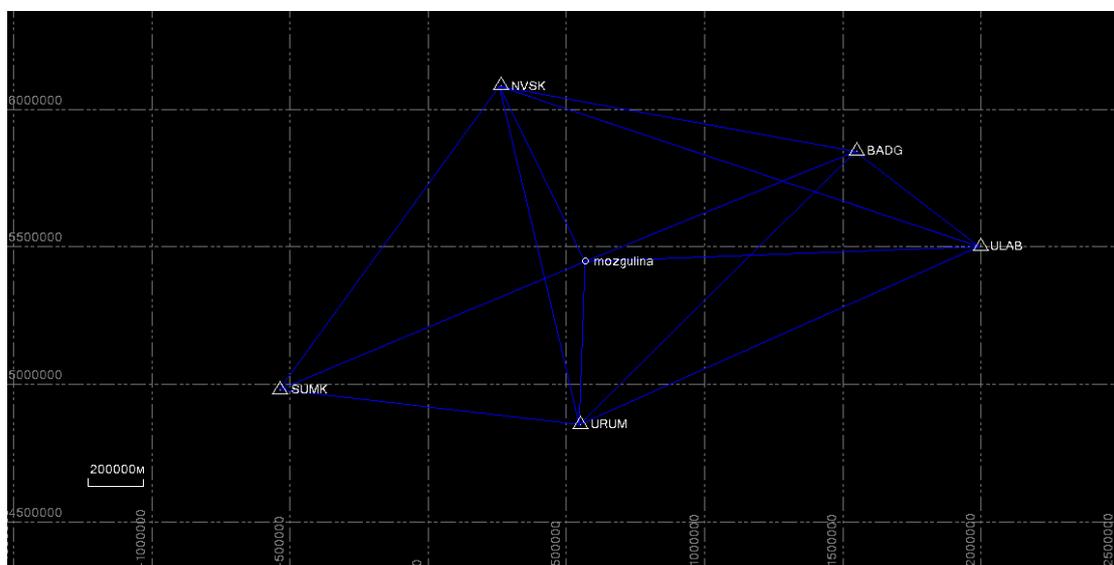


Рис. 14. Схема расположения базового пункта «Мозгулина» и выбранных станций сети ITRF.

Данные были найдены на интересующие даты непосредственно из интерфейса Trimble Business Center путём добавления и настройки необходимых источников для автоматизации их поиска (рис. 15). На сайте SOPAC были найдены координаты станций ITRF в системе координат World Geodetic System 1984 (WGS84) и использованы непосредственно в уравнивании созданной сети и расчёте координат базы «Мозгулин». В результате обработки данных был получен набор пространственных координат пункта «Мозгулин» в WGS84 и Universal Transverse Mercator северная зона 45 (UTM 45N), представленные в приложении 2 совместно с отчетом об уравнивании.

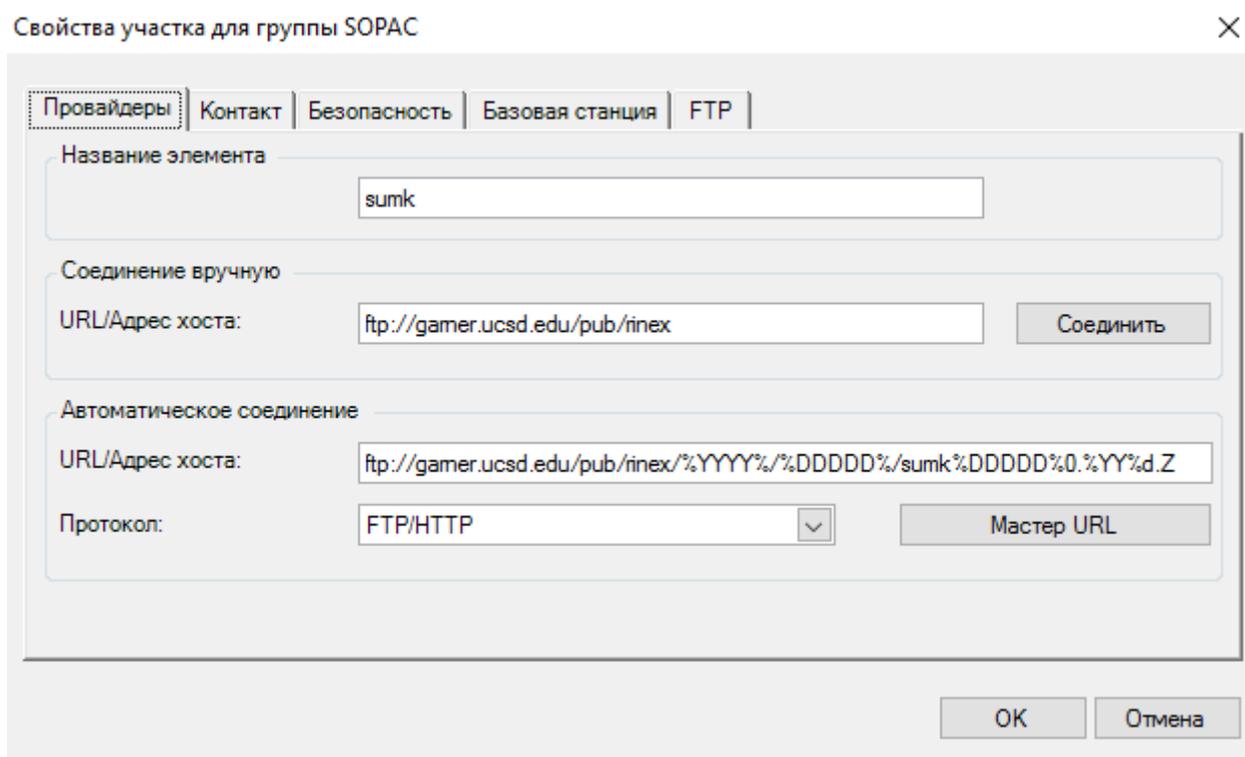


Рис. 15. Пример настройки скачивания данных геодезических наблюдений на станциях сети ITRF.

После того, как были вычислены координаты базового пункта, было проведено уравнивание сети из пунктов «Мозгулин», «Арагорн» и «Потентилла», образующих равнобедренный треугольник (рис. 17). Для расчётов аналогично были найдены и использованы точные эфемериды на необходимые даты. Соответственно, обработка была проведена для обоих периодов наблюдений. В первом случае, за закрепленный пункт была принята базовая станция, уравненная на сеть ITRF, а также два пункта этой сети. Как уже говорилось выше, их пришлось использовать из-за того, что в первой части экспедиции наблюдения были проведены не по замкнутому треугольнику. В качестве опорных пунктов были выбраны NVSK и ULAB (рис. 16), как наиболее близко расположенные и образующие более правильный треугольник с базовой станцией. Во втором случае опорными пунктами

являлись «Арагорн» и «Потентилла» для нахождения смещения базовой станции за период между двумя частями экспедиции (рис. 18). Контроль решено было проводить по эллипсоидальным расстояниям между пунктов. После обработки были получены результаты, представленные в таблице 1. Для дальнейших расчетов было решено использовать координаты соответствующие периоду проведения аэрофотосъемки. Таким образом, для полётов в июне использовались координаты первого периода наблюдений, для августа – второго периода. Такое решение было связано с тем, что высота базового пункта между двумя измерениями изменилась на 1.7 см, хотя в плане разница составила меньше сантиметра. Отчёты в приложении 3 и 4.

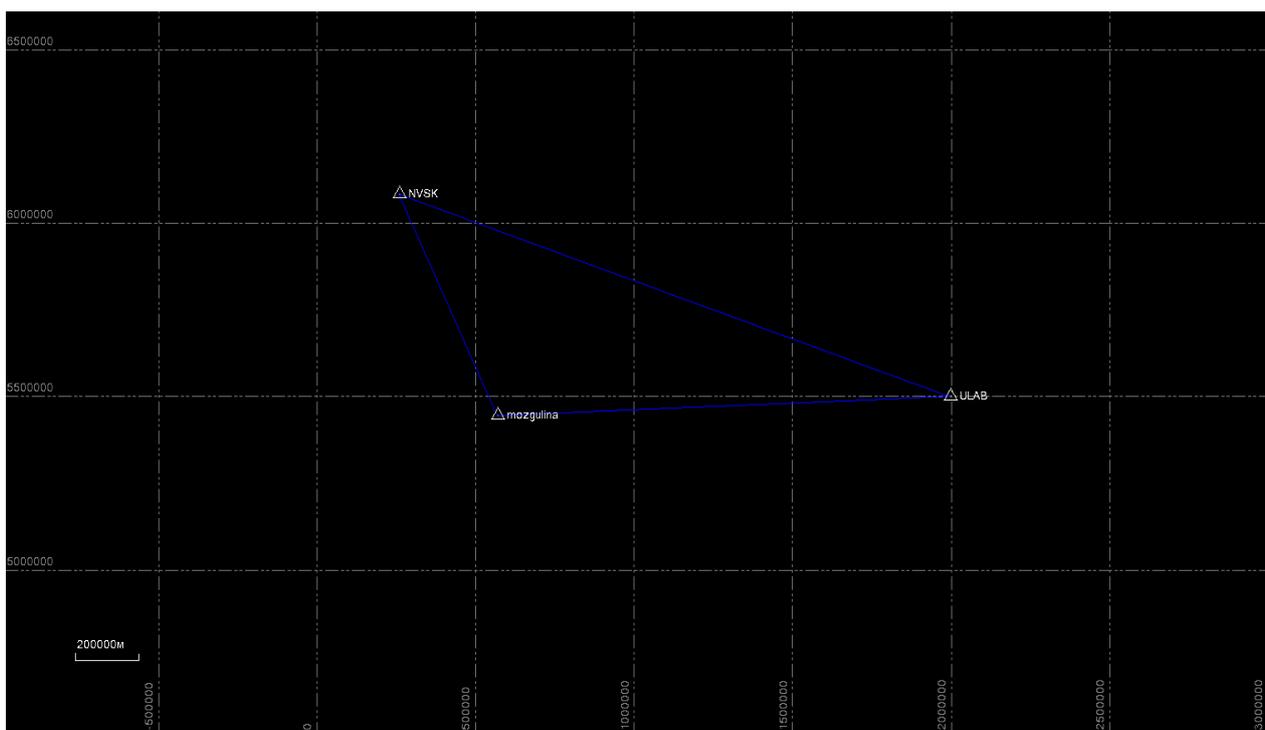


Рис. 16. Схема расположение двух выбранных пунктов NVSK и ULAB относительно базового пункта «Мозгулин» с указанием векторов наблюдений.

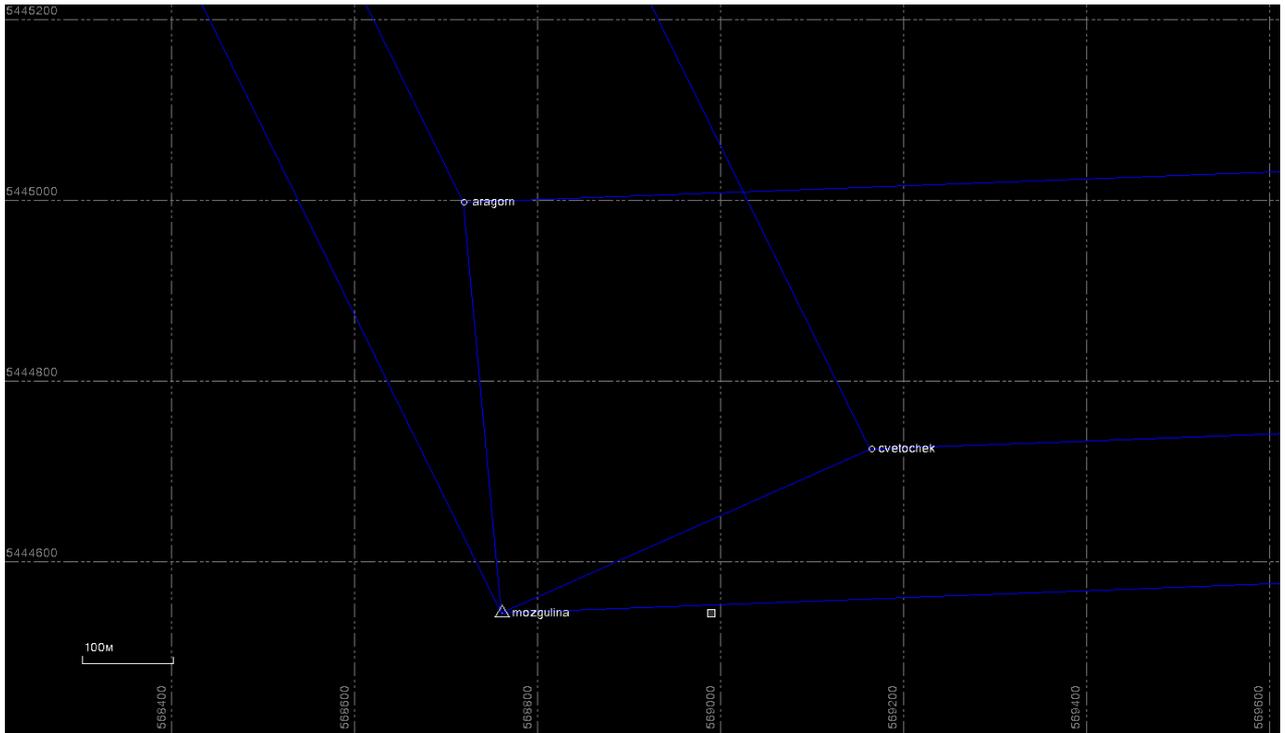


Рис. 17. Схема расположения трех геодезических пунктов «Мозгулин», «Арагорн» и «Потенцилла» с указанием векторов наблюдений в первой части экспедиции.

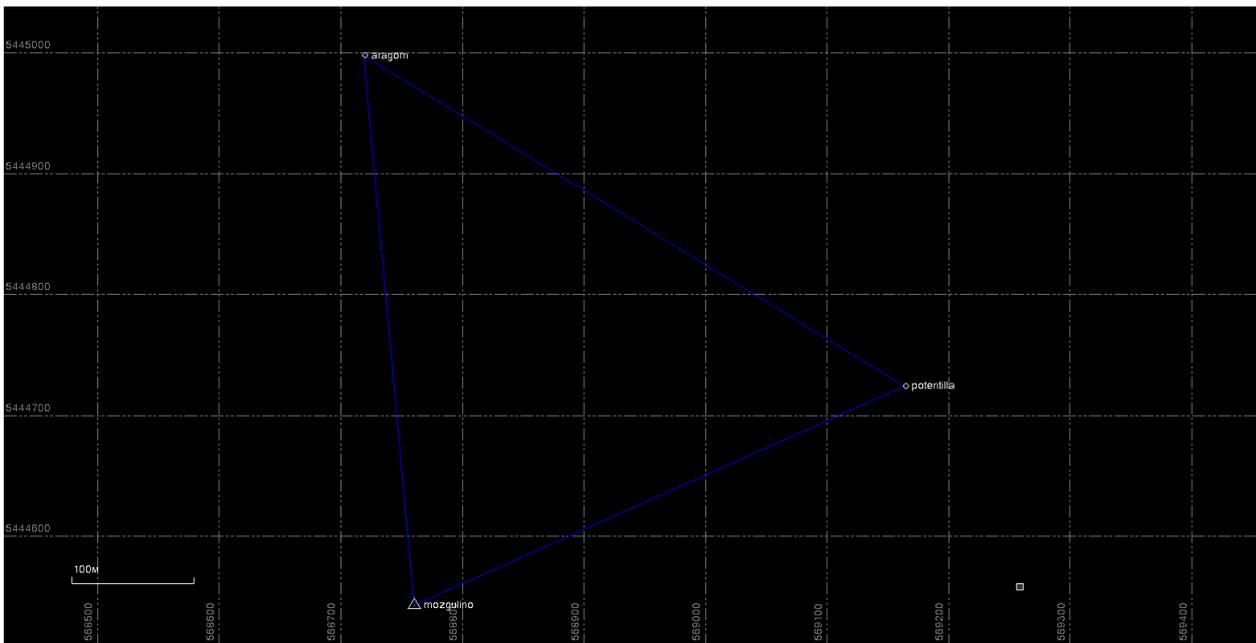


Рис. 18. Схема расположения трех геодезических пунктов «Мозгулин», «Арагорн» и «Потенцилла» с указанием векторов наблюдений во второй части экспедиции.

Таблица 1. Рассчитанные эллипсоидальные расстояния.

Пункты	Эллипсоидальное расстояние июнь (м)	Эллипсоидальное расстояние август (м)
Арагорн – Потентилла	-	522,740
Арагорн – Мозгулин	457,106	457,105
Потентилла – Мозгулин	442,744	442,739

Следующим этапом был расчет точных координат центров фотографирования относительно базового пункта. Все вычисления производились в Magnet Office Tools (рис. 19).

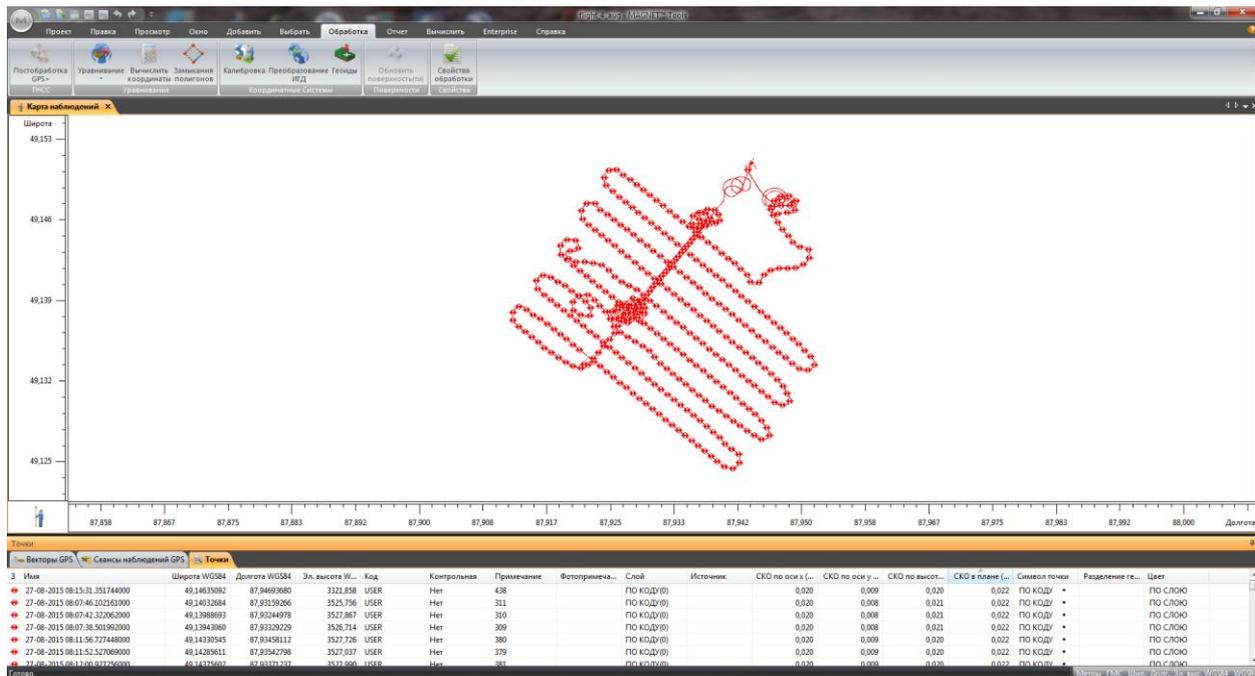


Рис. 19. Пример результата обработанных центров фотографирования.

Необходимыми данными являлись файлы базовой станции, работавшей одновременно с проведением аэрофотосъемки и на одинаковой с геодезическим приемником на борту частоте, и файлы самого высокоточного приемника. Перед такими расчетами происходит конвертация сырых файлов приёмника на борту в формат RINEX с записью в него моментов фотографирования из паспортов снимков, координаты которых и уточняются в обработке. Паспорта снимков генерируются НСУ. Также были использованы рассчитанные координаты базового пункта и высота стояния прибора. Программное обеспечение не всегда распознавало антенну базовой станции, поэтому необходимо было контролировать и этот момент. Базовая станция закреплялась и в плане, и по высоте, относительно неё происходил

расчёт координат центров фотографирования. Иногда, при проблемах с обработкой (получение СКО на моментах фотографирования больше 10 см), отключались спутники ГЛОНАСС. Несколько полётов было проведено, как выяснилось в течение камеральной обработки, во время сильных магнитных бурь в ионосфере, что сказалось на точности получаемых координат. Проблема была решена уже на этапе непосредственной фотограмметрической обработки, путем проведения уравнивания полётов совместно, что позволило уменьшить возникшую ошибку. Но в условиях экспедиции нет возможности проводить ежедневный мониторинг состояния ионосферы, поэтому нельзя предсказать и запланировать дни аэрофотосъёмки так, чтобы избежать неблагоприятных условий. После расчёта координат центров фотографирования одного полёта производилось совмещение имён снимков и их координат, создаваемый файл далее участвовал в фотограмметрической обработке.

Формирование проекта для фотограмметрической обработки в программном обеспечении Agisoft Photoscan Pro начиналось с загрузки снимков полётов, каждый в отдельный блок, и центров фотографирования с грубыми навигационными координатами (рис. 20 и 21).

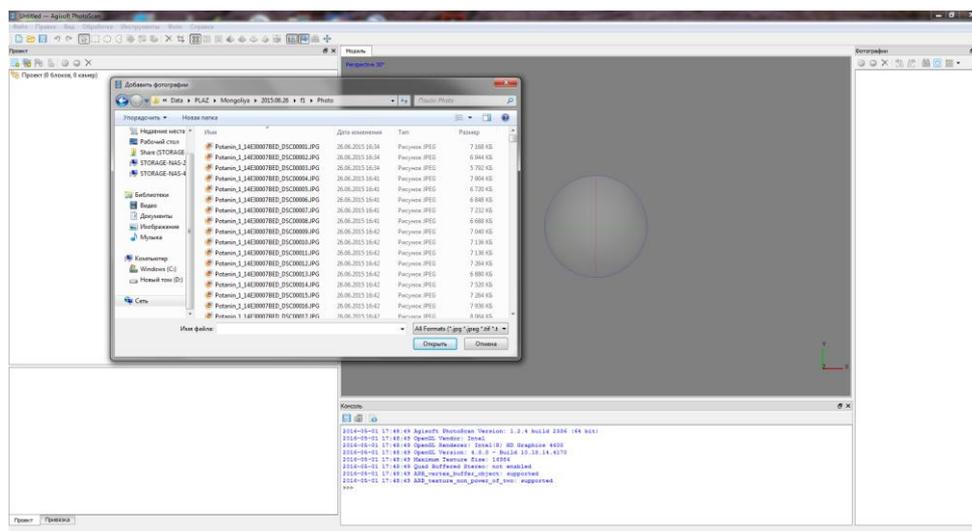


Рис. 20. Загрузка снимков в Agisoft Photoscan для дальнейшей обработки.

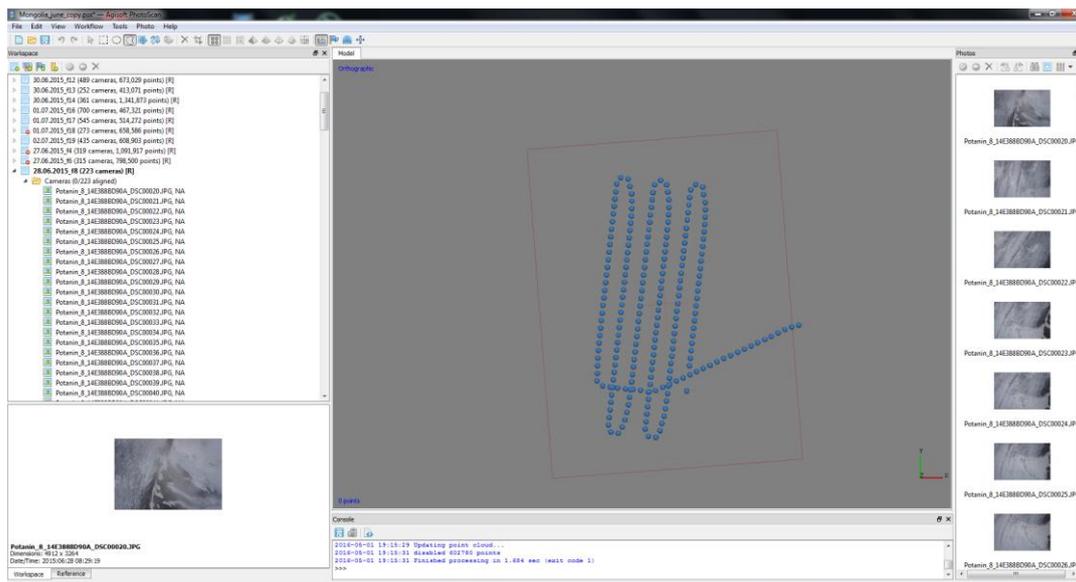


Рис. 21. Пример загруженного полёта (снимки и координаты центров фотографирования) в Agisoft Photoscan.

Это делалось для того, чтобы можно было произвести контроль каждого полёта, удалить ненужные снимки, например те, что были сделаны на земле во время предполётной подготовки. Также были заблокированы разворотные снимки с большого перекрытия между полётами. После этого все блоки были объединены в один для совместного уравнивания. На этом этапе автоматически определяются элементы внешнего ориентирования центров фотоснимков, а также происходит расчёт среднеквадратических ошибок плановых координат, высотных отметок и пиксельная ошибка нахождения соответствующих точек между снимками. Среди параметров были указаны высокая точность выравнивания, которая позволяет получить наиболее достоверные положения камер, переселекция пар в режиме привязки, что позволяет ускорить процесс обработки, так как алгоритм будет опираться на загруженные координаты. Также были указаны дополнительные параметры максимального количества точек и проекций, было решено воспользоваться максимальным количеством найденных точек из 40 000.

Следующий этап – оптимизация. Сначала были добавлены рассчитанные точные координаты центров фотографирования, введены смещения камеры в плане и по высоте относительно ГНСС приёмника на борту (рис. 22). Эти значения измеряются для каждой модели БПЛА и прикладываются в комплекте с документами.

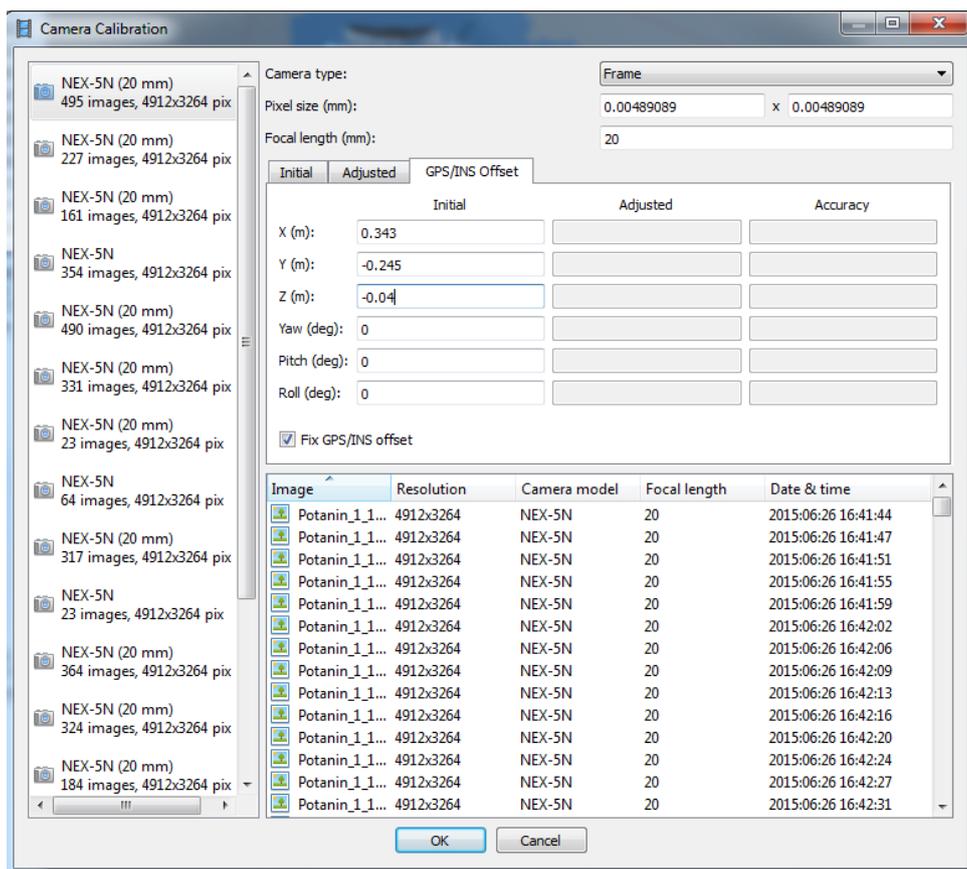


Рис. 22. Ввод значений смещения камеры относительно бортового ГНСС-приёмника.

Процесс оптимизации итеративный. После проведения первой итерации были найдены и заблокированы снимки с наибольшими ошибками – вылеты. Кроме того, на каждом этапе возможно выпускать отчёт Photoscan, где наглядно показаны ошибки на центрах, так была найдена большая часть грубых ошибок. Во время выполнения оптимизации происходит пересчет коэффициентов дисторсии и уравнивание снимков по новым уточненным параметрам, при этом программное обеспечение разбивает снимки по группам в зависимости от параметров дисторсии (рис. 23). Параметры отличались на сантиметры и доли сантиметров, потому что полёты все были совершены с одной и той же камерой. Такой подход позволяет использовать камеры, у которых заранее не известны коэффициенты дисторсии.

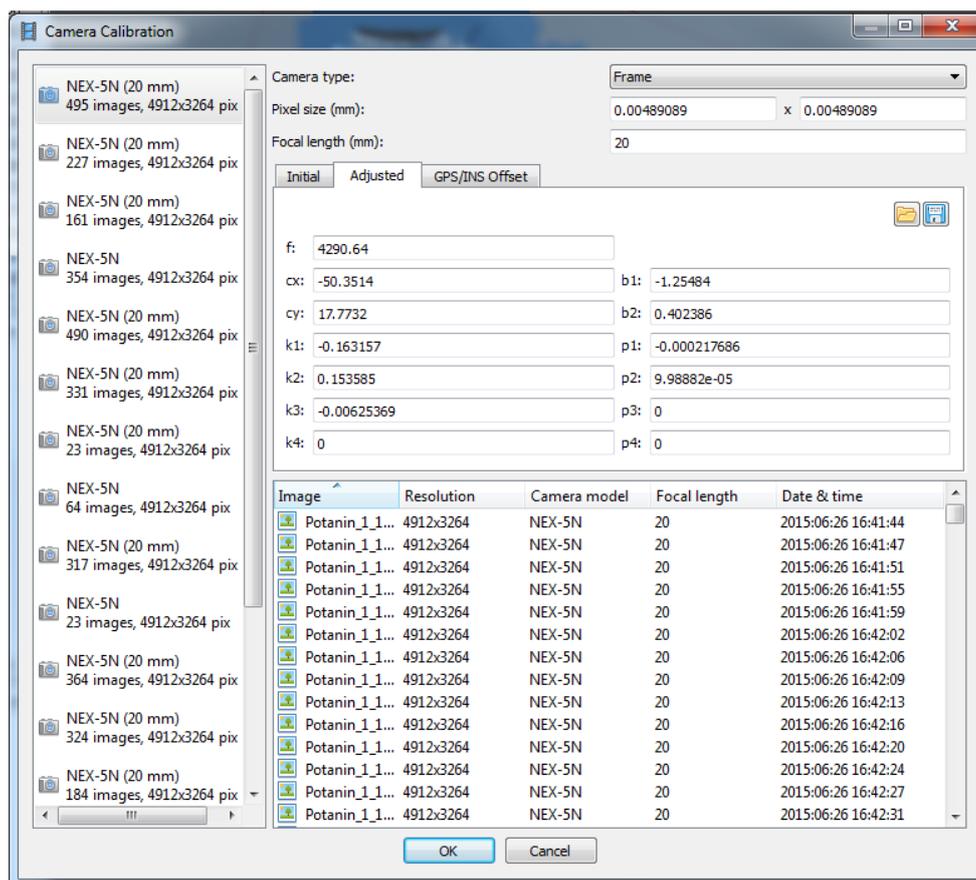


Рис. 23. Пример рассчитанных коэффициентов дисторсии.

Более того, на каждом новом этапе производилось увеличение веса координат, так как с каждой итерацией количество ошибочных координат уменьшается путём отключения снимков, а значит, доверие к остальным возрастает. Таким образом, были достигнуты средние ошибки на центрах в первой части экспедиции в плане 15 см, по высоте 10 см (рис. 24), а во второй части 25 см в плане и 15 см по высоте (рис. 25). Такой результат также стал основным аргументом в пользу приведения августовских данных к июньским в последующем геоинформационном анализе. Обычно, на этом же этапе производится расставление опорных точек, но, как говорилось ранее, используемые технологии позволяют получать удовлетворительный результат без них, что в горных, суровых условиях является принципиальным решением для исследователей.

Camera Locations



Fig. 18. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
0.135022	0.142706	0.196459	0.110374	0.225341

Table 2. Average camera location error.

Рис. 24. Фрагмент отчёта, формируемого программным обеспечением Agisoft Photoscan, со среднеквадратическими ошибками на центрах фотографирования, полученные в ходе фотограмметрической обработки данных первого периода наблюдений.

Camera Locations

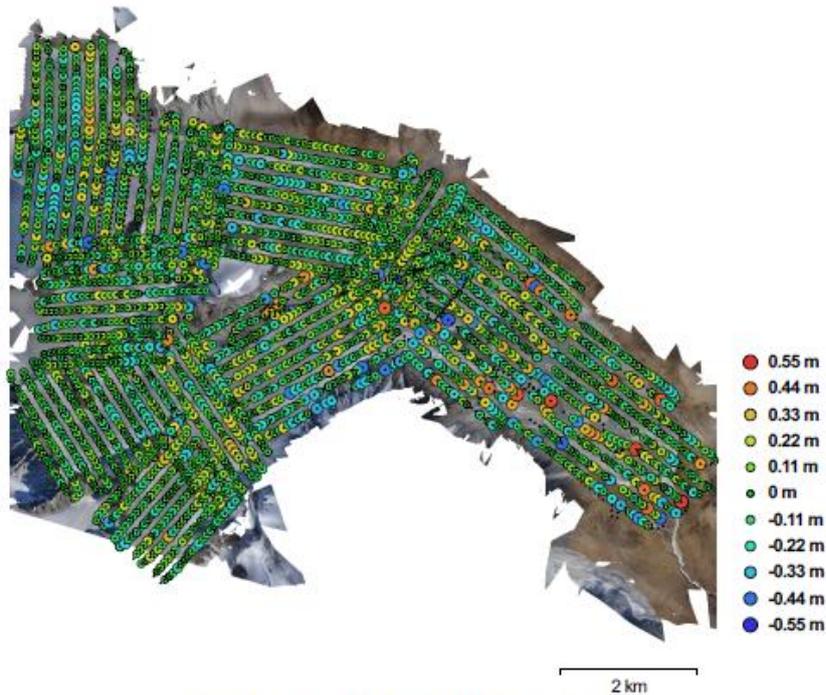


Fig. 17. Camera locations and error estimates.

Z error is represented by ellipse color. X,Y errors are represented by ellipse shape.
Estimated camera locations are marked with a black dot.

X error (m)	Y error (m)	XY error (m)	Z error (m)	Total error (m)
0.284871	0.28005	0.399474	0.149364	0.426485

Table 2. Average camera location error.

Рис. 25. Фрагмент отчёта, формируемого программным обеспечением Agisoft Photoscan, со среднеквадратическими ошибками на центрах фотографирования, полученные в ходе фотограмметрической обработки данных второго периода наблюдений.

В конце этапа оптимизации был получен блок уравненных и оптимизированных снимков отдельно на каждую часть экспедиции. Дальнейшая обработка включала в себя построение плотных облаков, ЦМР и ортофотопланов. В программе Agisoft Photoscan они полностью автоматизированы, настраивались только качество, пространственное разрешение и различные цветовые параметры при создании ортофотоплана. Для построения плотного облака точек был выбран параметр высокого качества, а также агрессивная фильтрация карт глубин для того, чтобы исключить максимальное число ошибочно позиционированных точек, кроме того моделируемая местность не имеет большого количества деталей (рис. 26). ЦМР была построена на основе полученного плотного облака точек, а на основе ЦМР – ортофотоплан (рис. 27). В итоге фотограмметрической обработки были получены две ЦМР и

два ортофотоплана на обе части экспедиции соответственно. Так как условия проведения аэрофотосъемки и сами параметры полётов отличались, то и пространственное разрешение было различным. При экспорте они были приведены к одному значению: 27 см для ЦМР и 14 см для ортофотопланов.

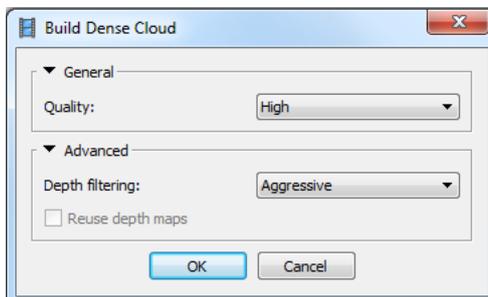


Рис. 26. Параметры построения плотного облака точек.

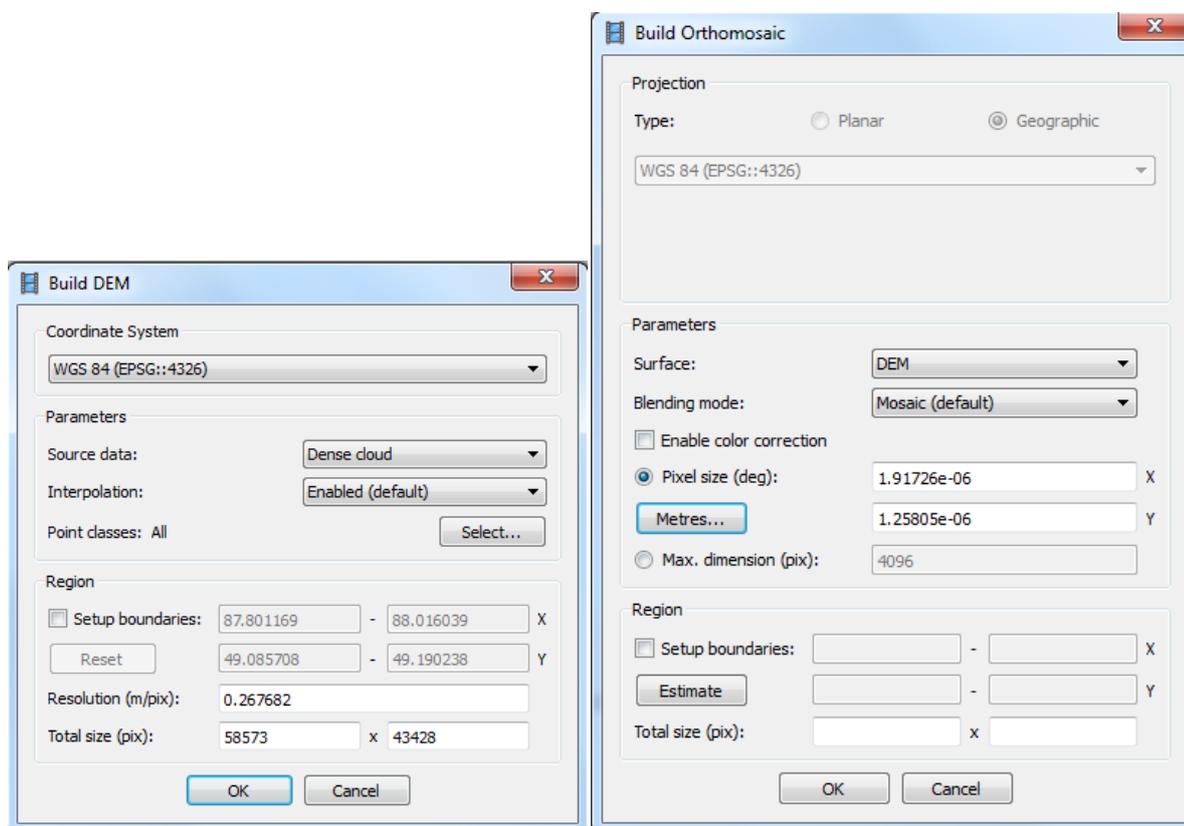


Рис. 27. Параметры построения ЦМР и ортофотопланов.

4. 2. Геоинформационный анализ.

Главной целью проведённых исследований был расчёт объёма стаявшего и накопленного льда двух ледников Потанина и Александры за сезон абляции 2015 года. Для этого аэрофотограмметрическими методами были получены ортофотоплан и ЦМР двух поверхностей ледников – в начале и в конце сезона абляции. Все расчёты ведутся на основе ЦМР, но для того, что бы привести одни данные к другим и проводить визуальный анализ, требуются ортофотопланы. Необходимость приведения данных конца сезона к началу обусловлена тем, что во второй части экспедиции были получены среднеквадратические ошибки в два раза большие, чем в первой, что связано, скорее всего, с условиями полётов: сильные ветра, менее устойчивые магнитные поля ионосферы и другие факторы повлияли на проведённую аэрофотосъёмку. Так как технология не предполагала использования опорных точек, то привязку было решено проводить по найденным точкам на моренах, скалах и других объектах, которые с большой вероятностью не сместились за два месяца между проведением съёмки. После приведения одних данных к другим, необходимо выполнить перепроецирование данных из географической системы координат WGS84 в UTM 45N. Этот этап нужен для некоторых операций в геоинформационных системах, так как расчёты зачастую производятся в единицах системы координат слоя, соответственно, требовалось перейти от градусов к метрам. Данная система координат была выбрана как наиболее распространённая и подходящая по совокупности факторов. Выделив по ортофотоплану изначальную поверхность ледников перед сезоном таяния (т.е. по ортофотоплану, полученному по данным июньской аэрофотосъёмки), таким образом, исключив влияния ошибок смещения поверхностей вне снежно-ледового покрова, далее можно было переходить непосредственно к расчётам изменений объёма и других доступных по полученным данным характеристик. Вычитание высот поверхности конца сезона абляции из высот начала сезона позволит получить информацию о толщине стаявшего ледяного и снежного покрова в каждой точке – пикселе, размером 27 на 27 см. Теперь, умножив полученную поверхность разности на площадь пиксела будет получен объём стаявшего льда также на каждой единичной площади. Просуммировав положительные и отрицательные значения отдельно, будет получен объём стаявшего и накопившегося снега или льда за сезон абляции.

Таким образом, после проведения фотограмметрической обработки аэрофотосъёмочных данных и экспорта ортофотопланов и ЦМР в системе координат WGS84 (так как вся предварительная обработка была проведена именно в этой системе координат) за

оба периода наблюдений, можно было переходить непосредственно к вычислениям. Для проведения расчётов было использовано несколько программных продуктов: ArcGIS ArcMap версии 10.1, Quantum GIS 2.12.3 и ENVI Classic 5.1.

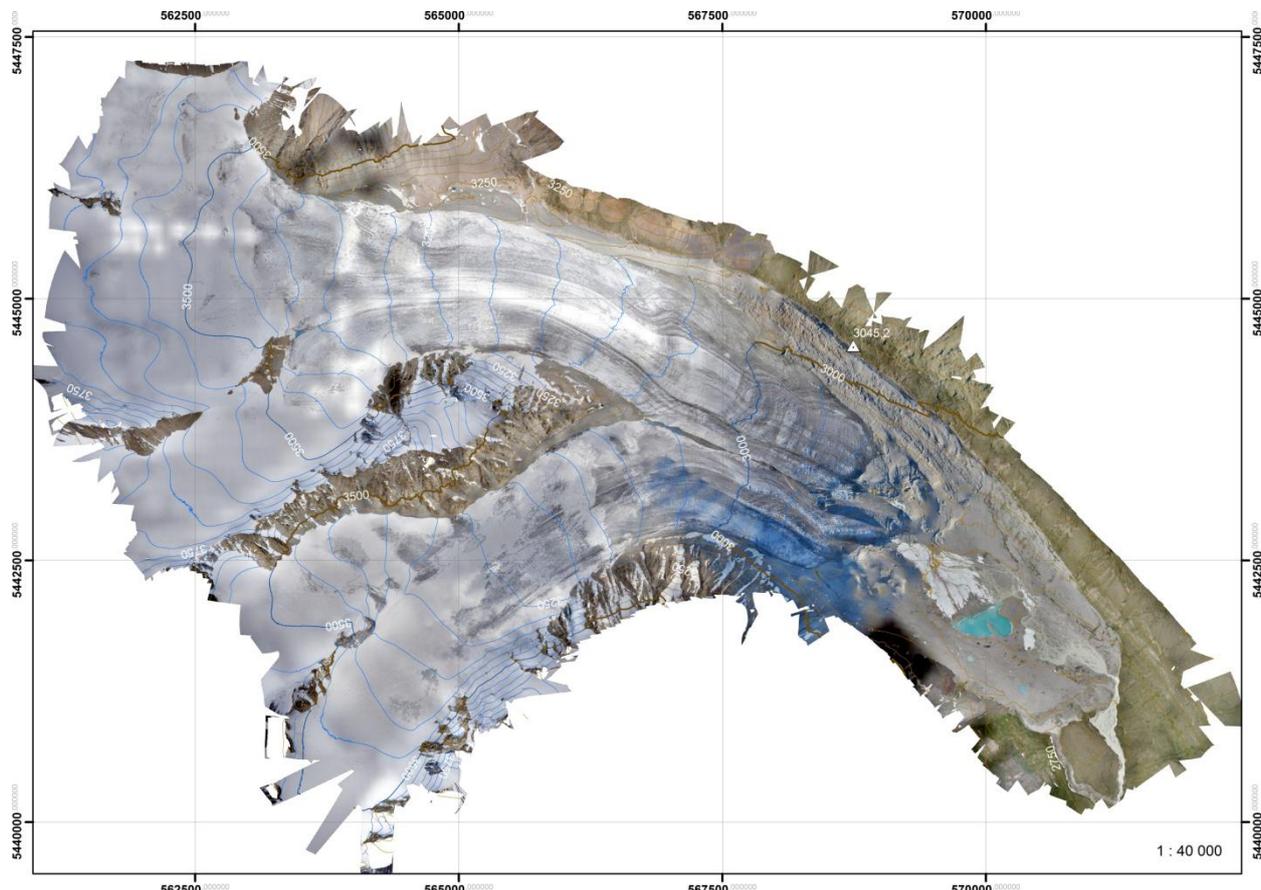


Рис. 28. Ортофотоплан по данным первой части экспедиции, с нанесенными горизонталями и базовым пунктом.

Экспортированные ортофотопланы и ЦМР были открыты в ArcMap для привязки данных августа к данным июня по опорным точкам, найденным на моренах, скалах и других неподвижных объектах. Было выбрано 16 точек равномерно расположенных по всей отснятой территории (рис. 29 и 30). При этом точки на самом леднике не выбирались, так как была велика вероятность того, что камни и другие опознаваемые объекты на его поверхности сместились за время прошедшее между двух периодов съёмки.

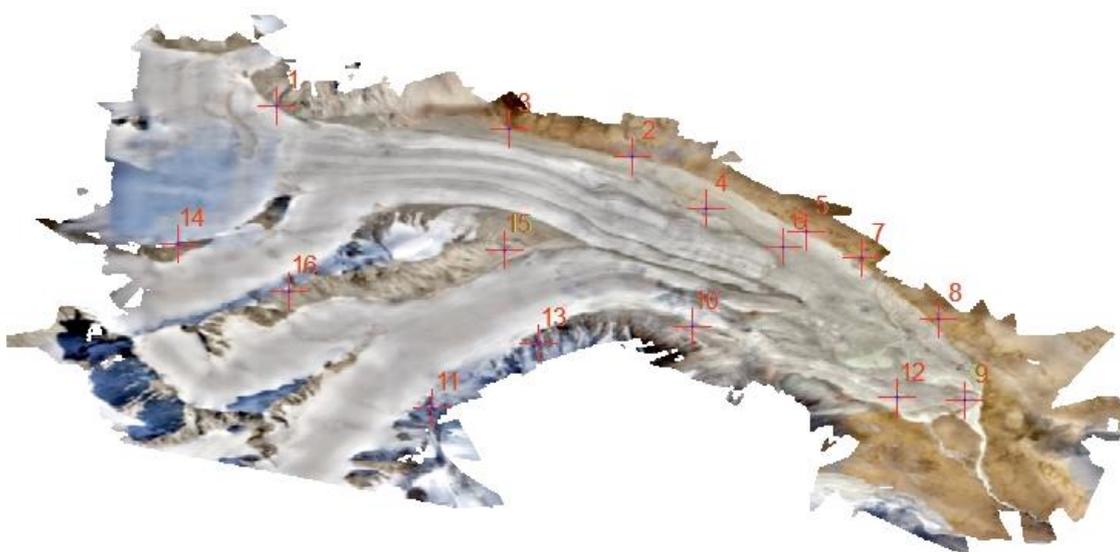


Рис. 29. Схема расположения опорных точек привязки.

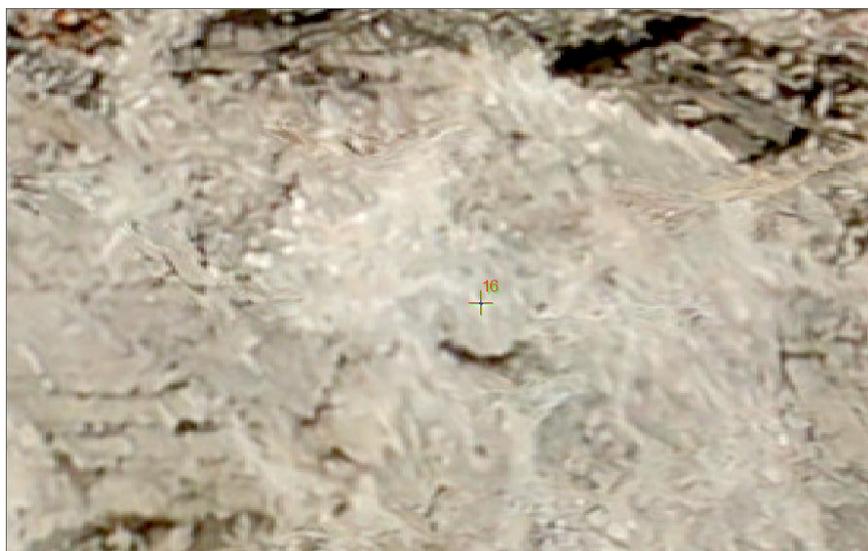


Рис. 30. Пример выбираемых опорных точек.

В качестве метода трансформации был выбран полиномиальный второго порядка, так как смещения между данными июня и августа имеют явно нелинейный характер, а второй порядок вносит много меньше искажений относительно других нелинейных методов. Численный результат точности привязки приведен на картинке, результат в градусах, так как исходные данные были в географической системе координат. Средняя ошибка 30 см в плане удовлетворяет необходимой точности для расчёта объёма стаявшего льда (рис. 31). Оценка ошибки определения объёма будет приведена далее. По тем же точкам была осуществлена привязка ЦМР.

Link	X Source	Y Source	X Map	Y Map	Residual_x	Residual_y	<Residual>
1	87,867647	49,165628	87,867638	49,165630	-4,43913e-006	3,14968e-007	4,45029e-006
2	87,922568	49,157880	87,922571	49,157883	4,26646e-006	2,2248e-006	4,81169e-006
3	87,903431	49,162078	87,903432	49,162078	2,53251e-006	-1,37498e-006	2,8817e-006
4	87,933854	49,149787	87,933854	49,149787	2,31339e-006	-9,28113e-007	2,49262e-006
5	87,949340	49,146095	87,949339	49,146094	1,60837e-006	-2,12416e-006	2,66438e-006
6	87,945841	49,143828	87,945833	49,143828	-5,07258e-006	-5,79609e-007	5,10559e-006
7	87,958054	49,142003	87,958046	49,142005	-5,30997e-006	1,14053e-006	5,43108e-006
8	87,969876	49,132584	87,969872	49,132586	-6,15184e-007	1,1364e-006	1,29223e-006
9	87,973882	49,119915	87,973885	49,119917	4,42135e-006	1,59691e-006	4,7009e-006
10	87,931730	49,131345	87,931734	49,131345	4,99154e-006	1,65652e-007	4,99429e-006
11	87,891556	49,118863	87,891559	49,118862	-1,94724e-006	4,27248e-007	1,99356e-006
12	87,963474	49,120331	87,963471	49,120328	-1,97024e-006	-2,8725e-006	3,48326e-006
13	87,908041	49,128760	87,908038	49,128761	-3,11272e-006	9,64046e-007	3,25859e-006
14	87,852261	49,144220	87,852258	49,144221	1,76361e-006	2,74322e-007	1,78482e-006
15	87,902739	49,143338	87,902735	49,143339	-2,17757e-006	1,16752e-006	2,47081e-006
16	87,869526	49,136922	87,869527	49,136921	2,7474e-006	-1,53303e-006	3,14617e-006

Auto Adjust Transformation: 2nd Order Polynomial
 Degrees Minutes Seconds Forward Residual Unit : Unknown

Рис. 31. Ошибки проведения пространственной привязки ортофотоплана августа к ортофотоплану июня. Аналогичные ошибки были получены для ЦМР.

Для дальнейших расчётов ортофотопланы и ЦМР необходимо перепроецировать в систему координат UTM 45N, что и было сделано с помощью инструмента Project Raster (растровое перепроецирование) в ArcMap с указанием сохранения изначального пространственного разрешения (рис. 32).

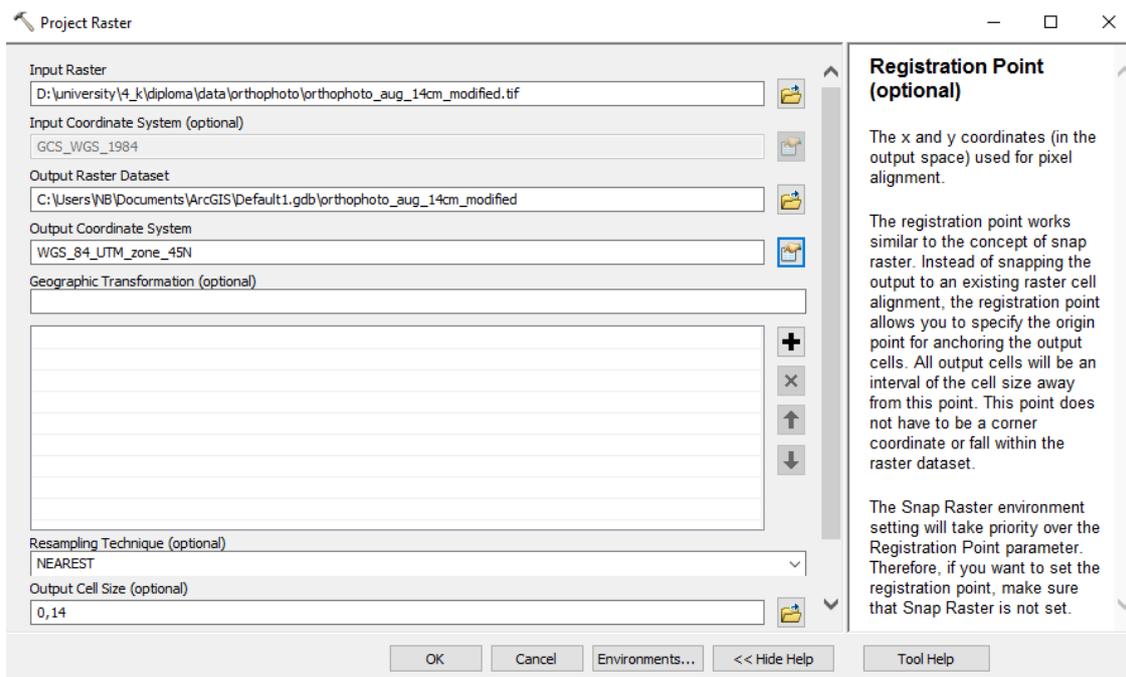


Рис. 32. Настройки перепроецирования растра.

После перепроецирования по ортофотоплану первой части экспедиции была создана область поверхности ледника с привлечением специалиста-гляциолога Банцева Д.В., аспиранта кафедры физической географии и ландшафтного планирования СПбГУ, для более правильного её проведения (рис. 33). Она послужит маской для дальнейших расчётов, чтобы исключить вклад морен, склонов и других объектов в расчёт объёмов стаявшего льда и снега.

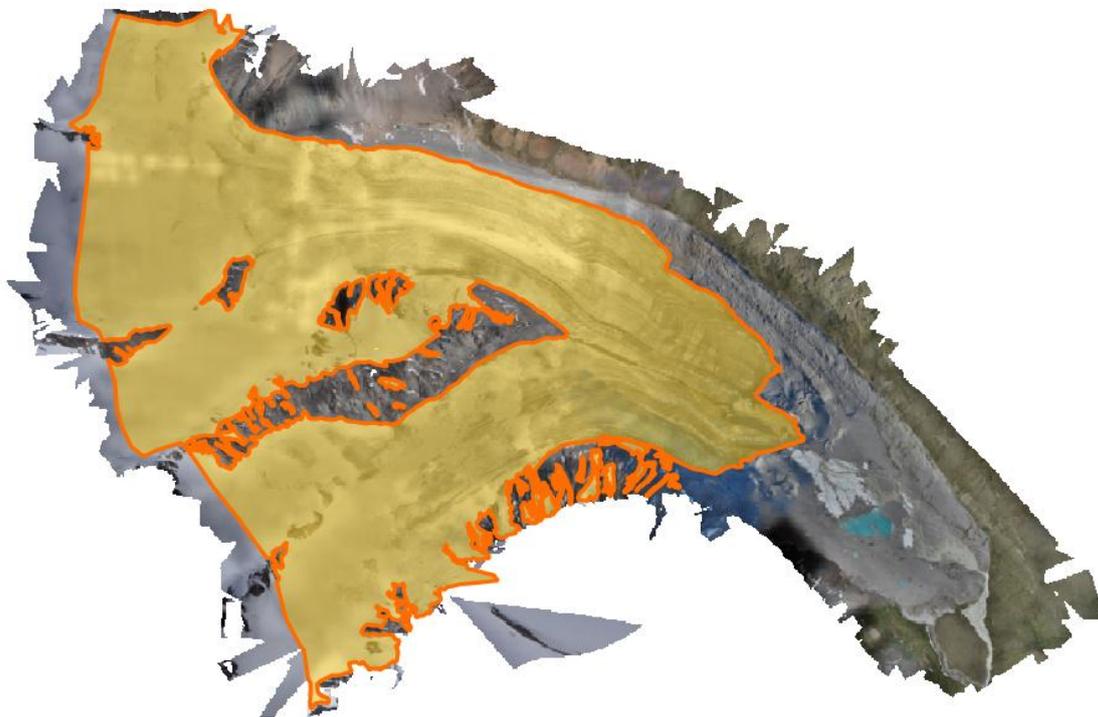


Рис. 33. Маска ледника на ортофотоплане начальной поверхности сезона абляции.

В ArcMap с помощью инструмента Raster Calculator (растровый калькулятор) было произведено вычитание из поверхности высот июня высот августа для попиксельного расчёта разности высот этих двух поверхностей (рис. 34).

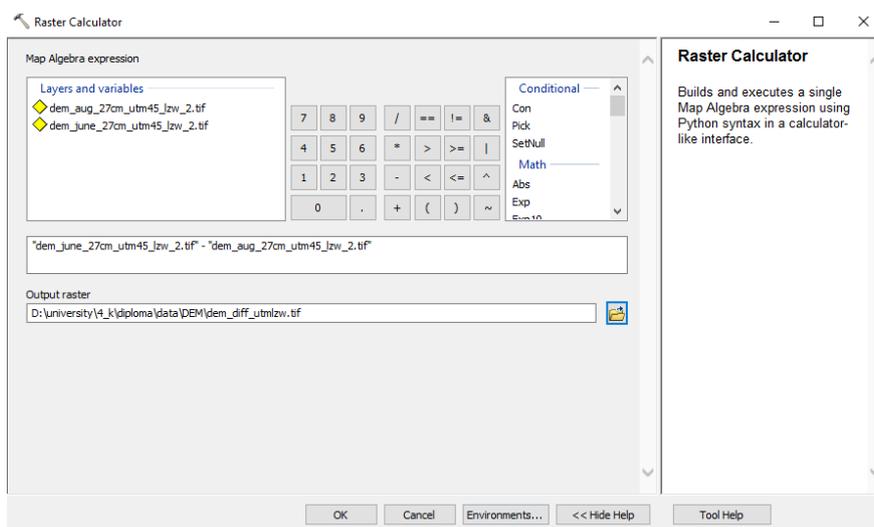


Рис. 34. Расчёт разности высот двух поверхностей в растровом калькуляторе.

Далее полученный растр был обрезан по ранее созданной маске ледника с помощью инструмента ArcMap Clip (обрезка).

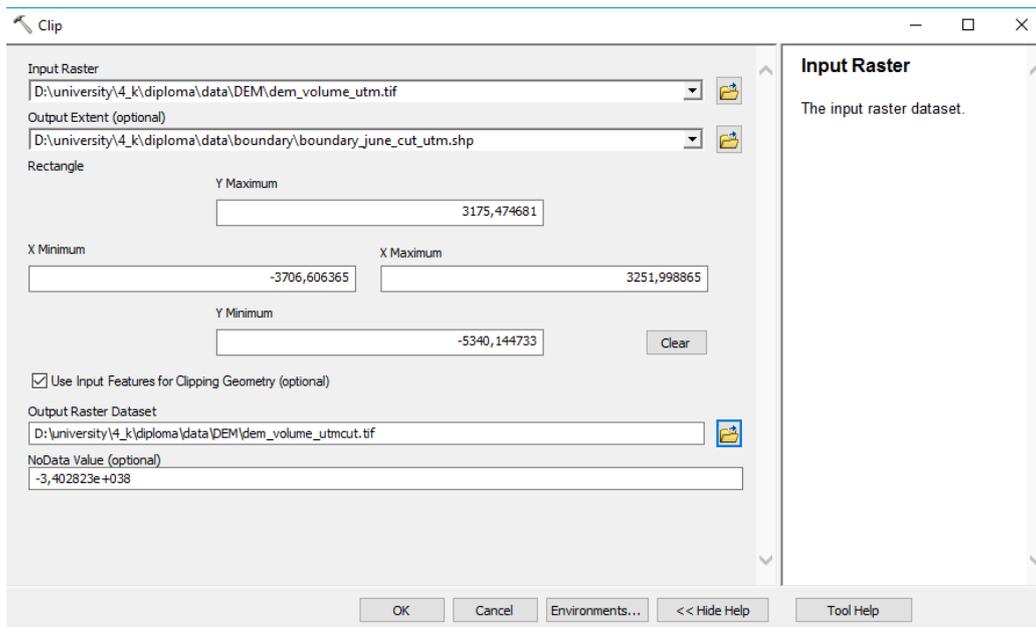


Рис. 35. Обрезка растра по маске с помощью инструмента «Clip».

Также в растровом калькуляторе производился расчёт непосредственно объёма по каждому пикселу путём умножения обрезанного растра разниц высот на площадь пиксела (рис. 36 и 37).

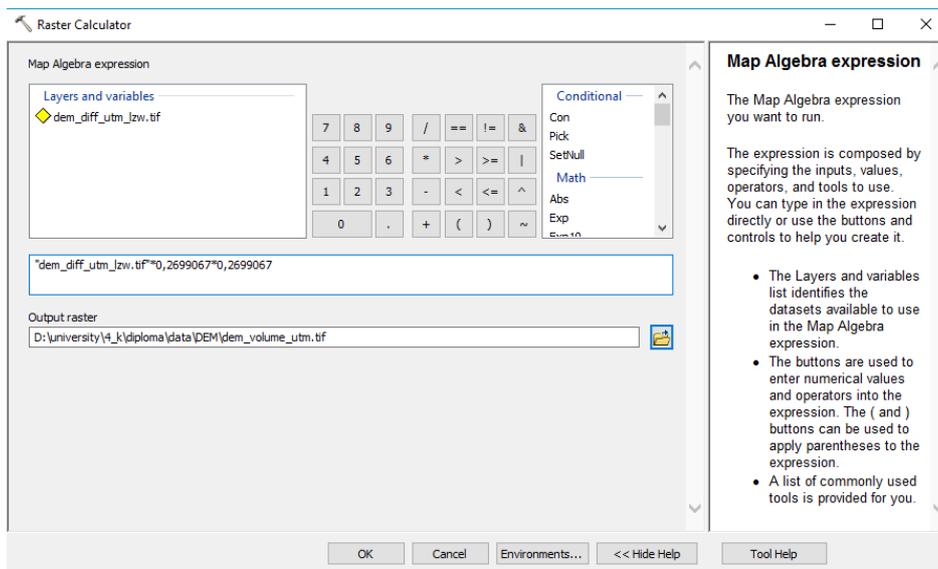


Рис. 36. Расчёт попиксельного объёма стаявшего и накопившегося снега и льда.

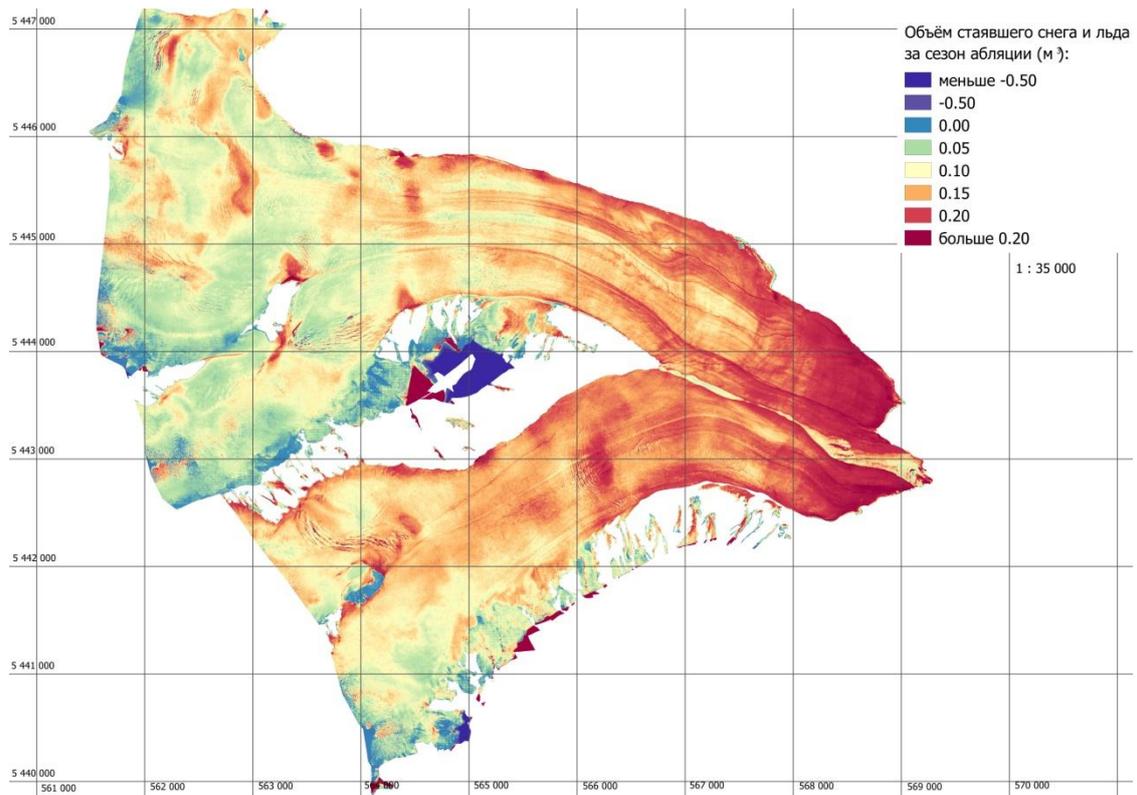


Рис. 37. Объём стаявшего и накопившегося снега и льда за сезон абляции в м³. Пространственное разрешение – 27см.

На полученном растре отчетливо читаются фирновые пятна – пятна старого снега, оставшегося с прошлого года (рис. 38). Они обычно располагаются в местах, куда солнце достаёт меньше, но на следующий сезон абляции, в зонах аккумуляции и переходных зонах они тают быстрее. А также хорошо видны реки, точнее их русла, которые в течение сезона абляции сильно расширяются и углубляются (рис. 39). Кроме того видна тенденция к более активному таянию вдоль боковой морены и примыкающих скал из-за их более быстрого и активного нагрева (рис. 40). Зона аккумуляции ледника Потанина ярко выражена малыми значениями таяния.

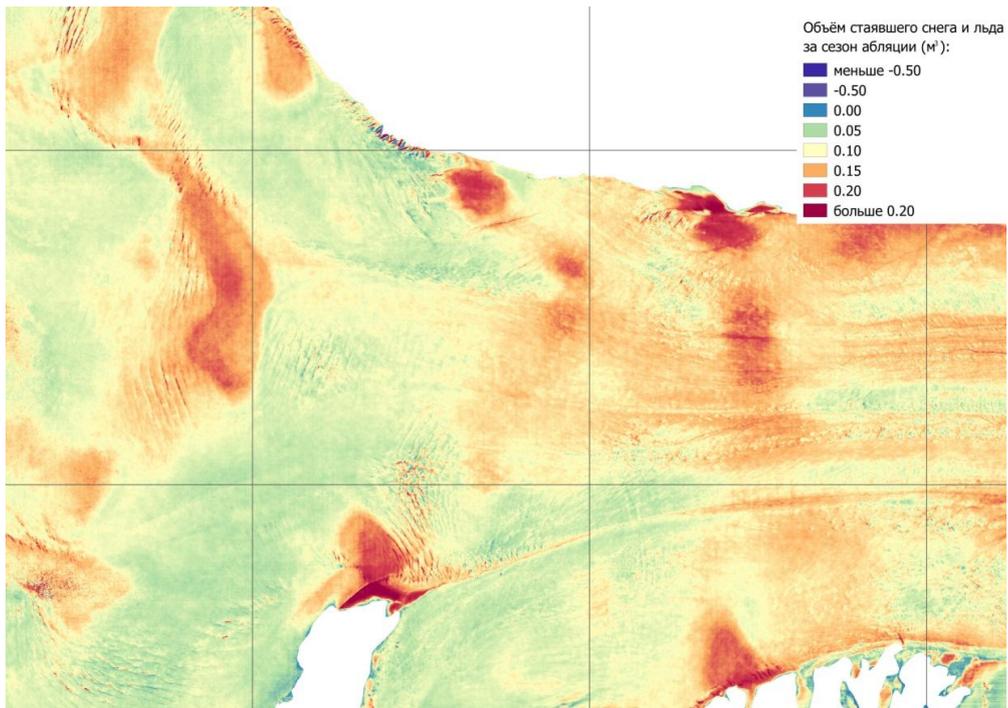


Рис. 38. Фрагмент рисунка 37, фирновые пятна.

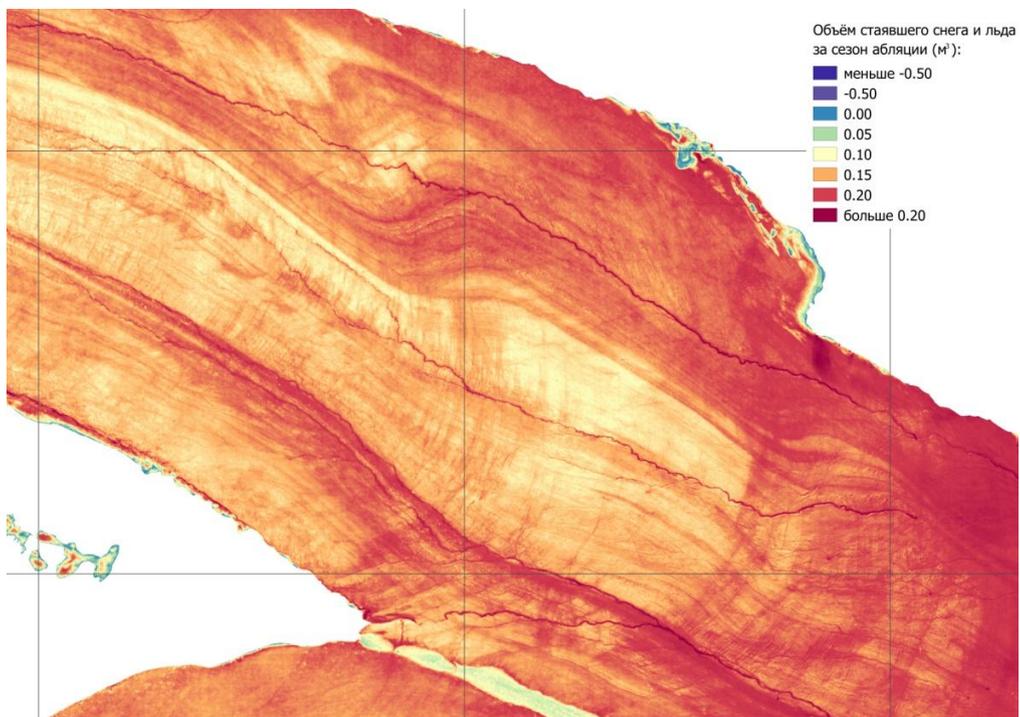


Рис. 39. Фрагмент рисунка 37, русла рек.

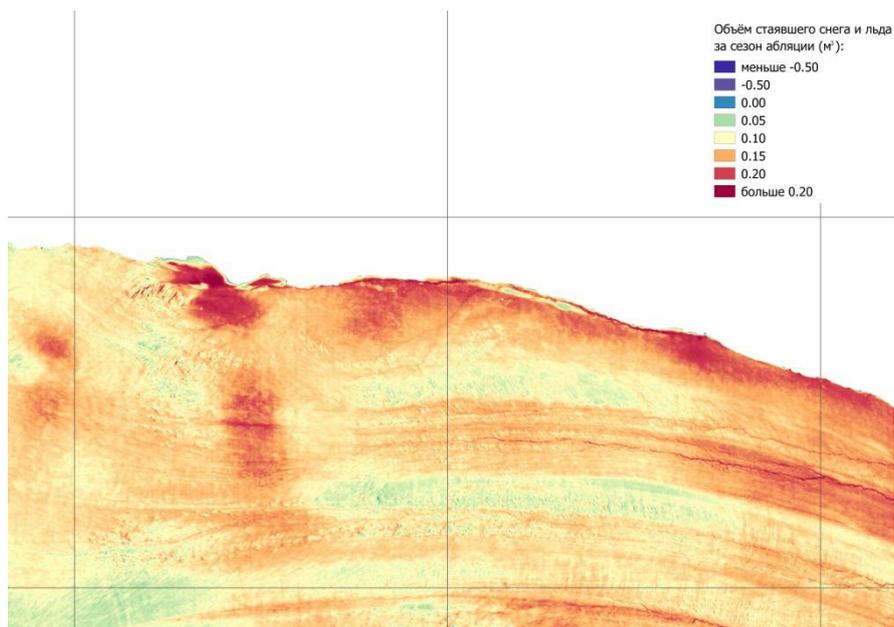


Рис. 40. Фрагмент рисунка 37, более активное таяние вдоль морены.

После расчёта раstra объёма было произведено создание масок для отрицательных и положительных значений, чтобы отдельно учесть стаявший и накопленный объём снега и льда. Для этого с помощью растрового калькулятора всем ячейкам со значениями больше нуля присваивалась 1, а меньше нуля – 0 (рис. 41 и 42).

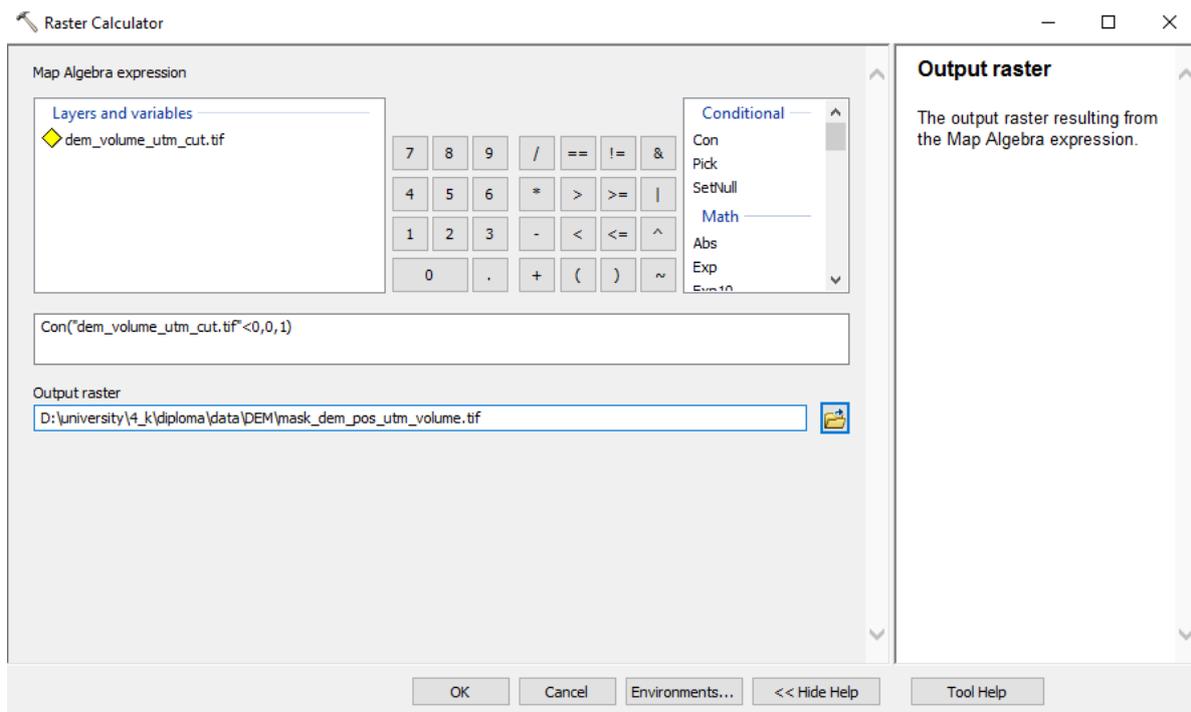


Рис. 41. Создание маски положительных и отрицательных значений рассчитанного объёма.

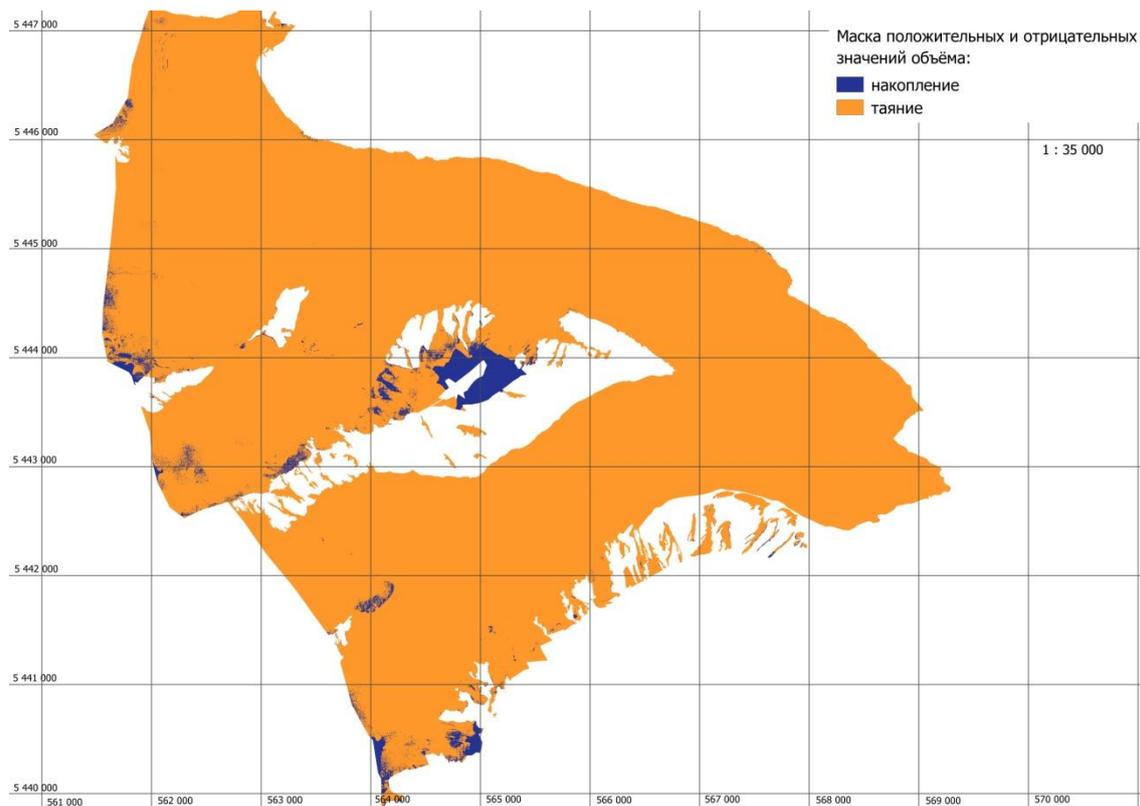


Рис. 42. Маска положительных (таяние) и отрицательных (накопление) значений объёма.

Данный растр использовался для расчёта зональной статистики, а именно суммы объёма по всей площади ледника для положительных и отрицательных значений (рис. 43).

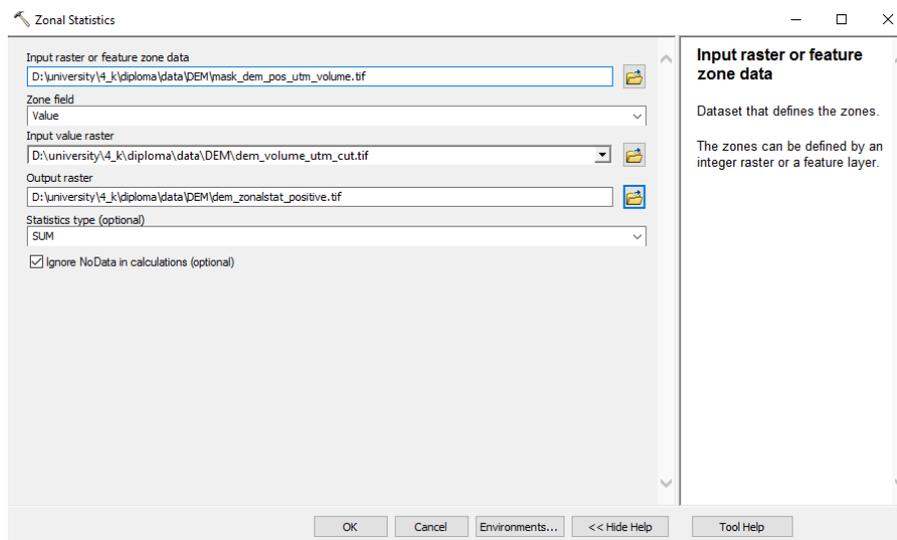


Рис. 43. Расчёт суммы объёма стаявшего и накопленного снега и льда.

В результате работы инструмента будет получен растр, содержащий всего два значения – суммы положительных и отрицательных величин (отрицательное значение – это накопленный снег и лёд, положительное - стаявший) (рис. 44). После окончания расчётов

была проведена оценка результатов на реалистичность, а также произведён расчёт ошибки определения объёма.

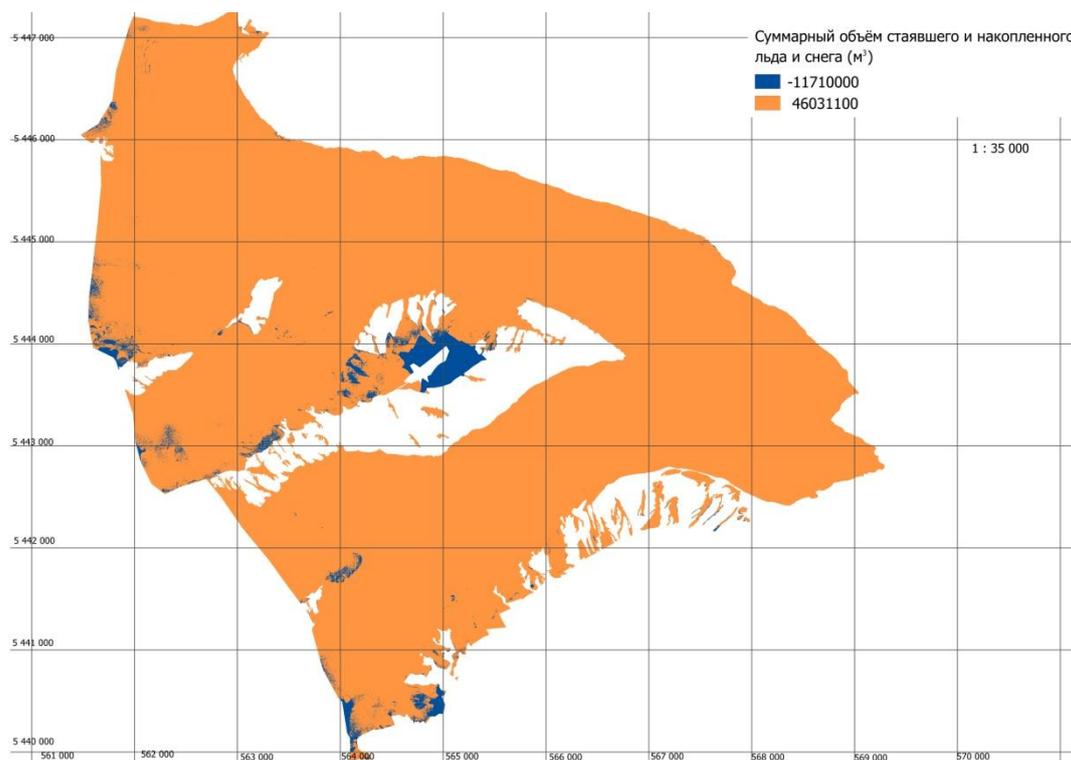


Рис. 44. Суммарный объём стаявшего и накопленного снега и льда в м³.

Слишком большое значение накопленного объёма было воспринято как подозрительное. Было решено проверить путём исключения из расчётов средней части. Как оказалось, именно там произошло самое большое накопление снега, без её учёта накопление снега и льда составляет около 200 000 м³ против 11 миллионов, полученных ранее. Проверив перекрытие снимков, стало очевидно, что в этой зоне оказалось недостаточное перекрытие (рис. 48 и 49), откуда возникли интерполяционные ошибки во время фотограмметрической обработки и создания ЦМР. Аналогично, из объёма стаявшего снега было выделено около 4 миллионов м³ ошибочных, за счёт разного покрытия снимками территории в двух частях экспедиции и учёта ошибок, распределённых по краям.

Оценку ошибки расчёта объёма стаявшего ледника было решено провести по полям ошибок центров фотографирования. Они были экспортированы из Agisoft Photoscan в виде текстового файла, который содержал название снимка, новые рассчитанные пространственные координаты и ошибки определения этих пространственных координат, полученные в ходе фотограмметрической обработки. Текстовые файлы по координатам были конвертированы в точечные шейп-файлы – один с центрами июньской аэрофотосъёмки

(рис. 45), второй - с августовской (рис. 46). В атрибутах этих файлов были сохранены рассчитанные ошибки.

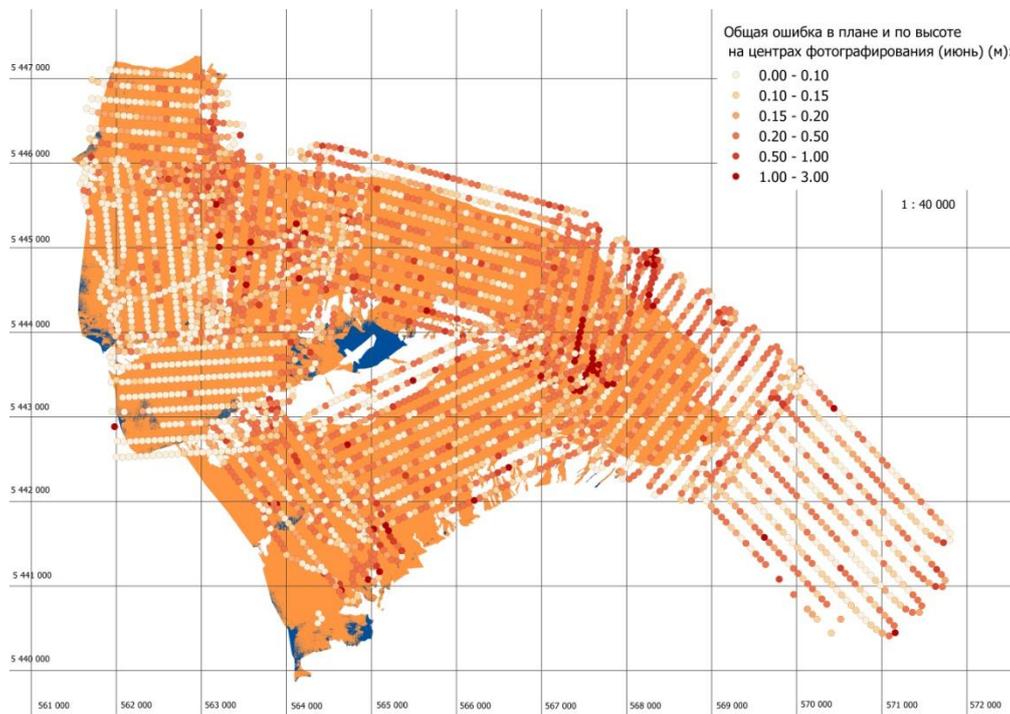


Рис. 45. Общие среднеквадратические ошибки на центрах фотографирования по данным первой части экспедиции.

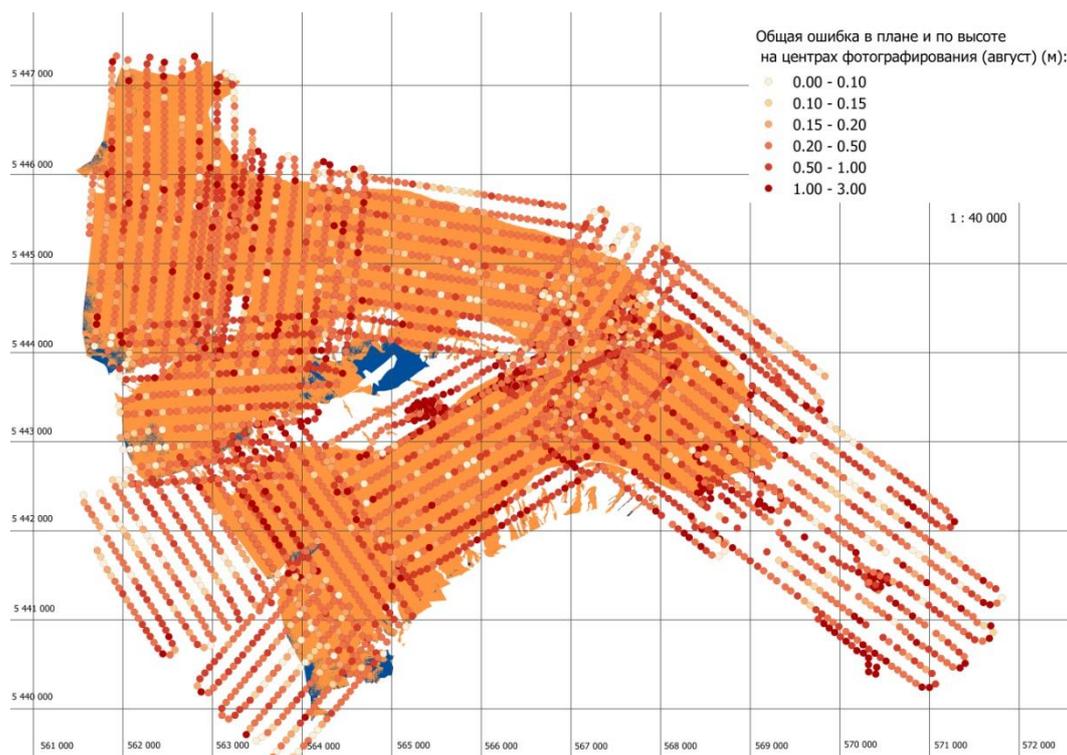


Рис. 46. Общие среднеквадратические ошибки на центрах фотографирования по данным второй части экспедиции.

Учитывая формулу расчёта объёма (1), была выведена формула расчёта ошибки его определения через частные производные (2). Ошибка определения пространственного разрешения была приравнена к нулю, соответственно, наибольший вклад вносит ошибка определения высот поверхностей.

$$V_i = (H_{и_i} - H_{а_i}) \times S \quad (1)$$

$$\Delta V_i = (\Delta H_{и_i} + \Delta H_{а_i}) \times S \quad (2)$$

Где, V_i – объём стаявшего/накопленного снега в одном пикселе, S – площадь пиксела, $H_{и_i}$ – высота поверхности июня в данном пикселе, $H_{а_i}$ – высота поверхности августа в данном пикселе, ΔV_i – ошибка расчёта объёма в данном пикселе, $\Delta H_{и_i}$ и $\Delta H_{а_i}$ – ошибка определения высоты поверхности июня и августа соответственно в данном пикселе.

В качестве метода интерполяции для создания непрерывных полей ошибок был использован метод обратных взвешенных расстояний (рис. 47), так как на определение высоты точки местности за счет перекрытия снимков влияет сразу несколько центров в зависимости от расстояния от нее до центра снимка. Было закреплено расстояние в 500 м, что примерно соответствует тройному поперечному перекрытию и еще большему продольному. Также было указано минимальное количество точек – 9 штук, так как практически на всей территории аэрофотосъемки, не считая краев, было достигнуто перекрытие больше чем в 9 снимков (рис. 48 и 49). Пространственное разрешение в 5 метров было выбрано как наиболее оптимальное со стороны затрат вычислительного времени. Пригодность такого значения будет проверена по расчёту суммарного объёма стаявшего и накопленного снега и льда и сравнению полученных значений с объёмом, рассчитанному по данным с пространственным разрешением 27 см. Интерполяция проводилась по абсолютным значениям ошибки определения высоты центров фотографирования.

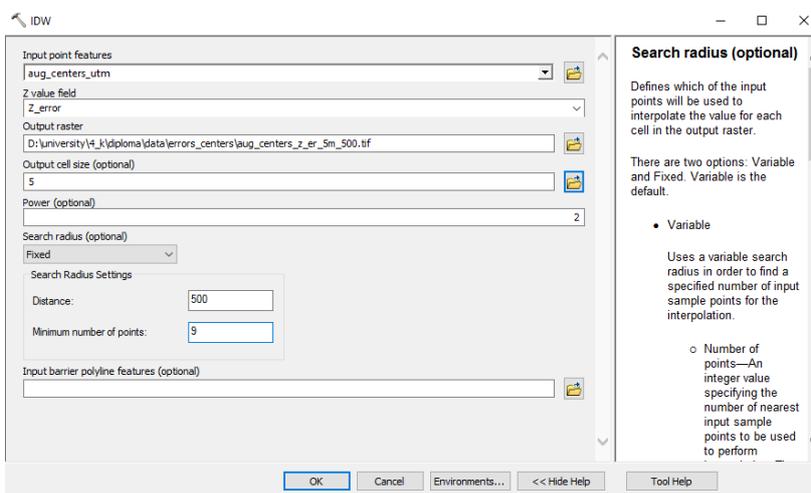


Рис. 47. Интерполяция значений ошибок методом обратных взвешенных расстояний.

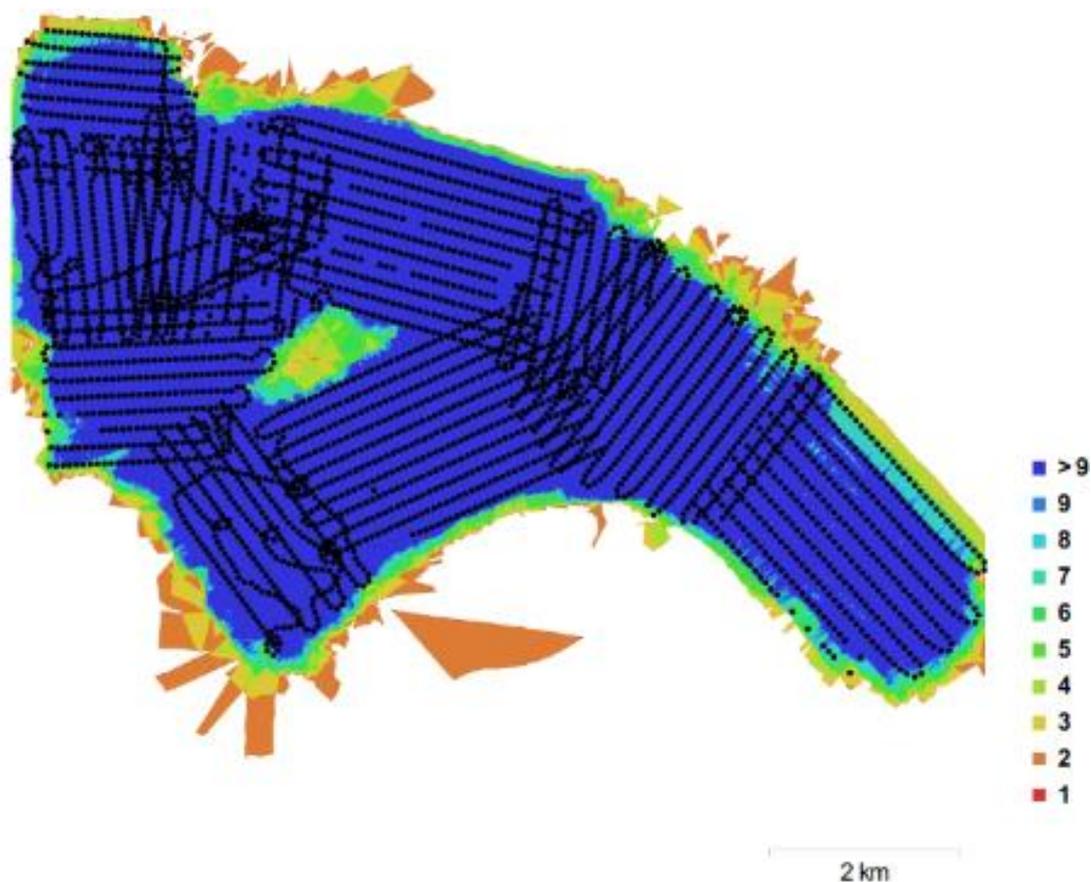


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	3,740	Camera stations:	3,740
Flying altitude:	558 m	Tie points:	9,165,569
Ground resolution:	12.6 cm/pix	Projections:	40,074,381
Coverage area:	45 sq km	Reprojection error:	0.691 pix

Рис. 48. Фрагмент отчёт из Agisoft Photoscan с отображением перекрытия снимков из первой части экспедиции.

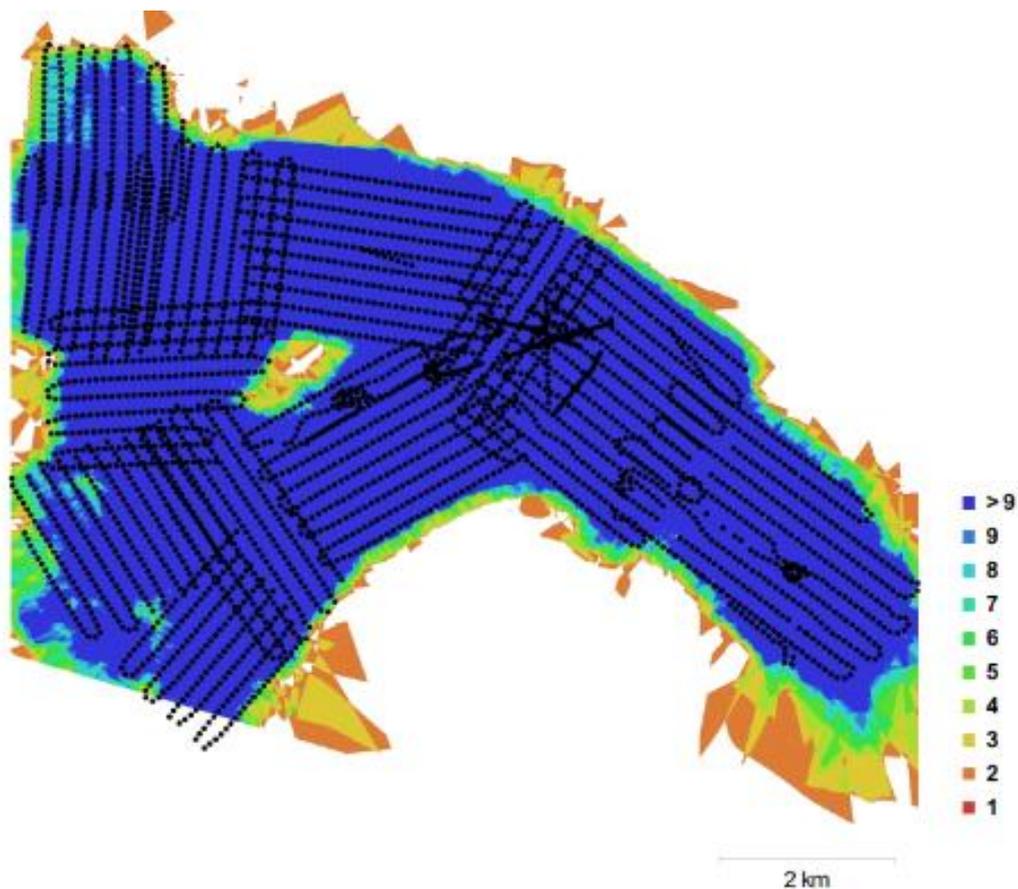


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	7,065	Camera stations:	3,796
Flying altitude:	594 m	Tie points:	11,933,285
Ground resolution:	13.4 cm/pix	Projections:	51,322,110
Coverage area:	53.1 sq km	Reprojection error:	1.01 pix

Рис. 49. Фрагмент отчёт из Agisoft Photoscan с отображением перекрытия снимков из второй части экспедиции.

После расчёта двух поверхностей вертикальных ошибок определения центров фотографирования, была рассчитана их сумма и произведено умножение полученного растра на площадь пиксела (25 м^2) (рис. 50), а также обрезка по ранее выделенной границе ледников. Таким образом были получены ошибки определения объёма стаявшего и накопленного льда в пределах каждого участка 5 на 5 метров. Для того, чтобы удостовериться в возможности использования такого пространственного разрешения, поверхность разности высот двух периодов наблюдений была пересчитана с пространственным разрешением 5 м из 27 см с помощью инструмента Resample методом билинейной интерполяции. Затем, по описанному ранее алгоритму был рассчитан суммарный объём стаявшего и накопленного льда и снега, но уже с данными 5 метрового

разрешения. Полученные результаты ($-11\,734\,432\text{ м}^3$ накопленного и $45\,457\,476\text{ м}^3$ стаявшего объема) были разделены на результаты, вычисленные с 27 сантиметровыми данными. Относительная ошибка для стаявшего объема составила 1,2%, для накопленного – менее 0,5% .

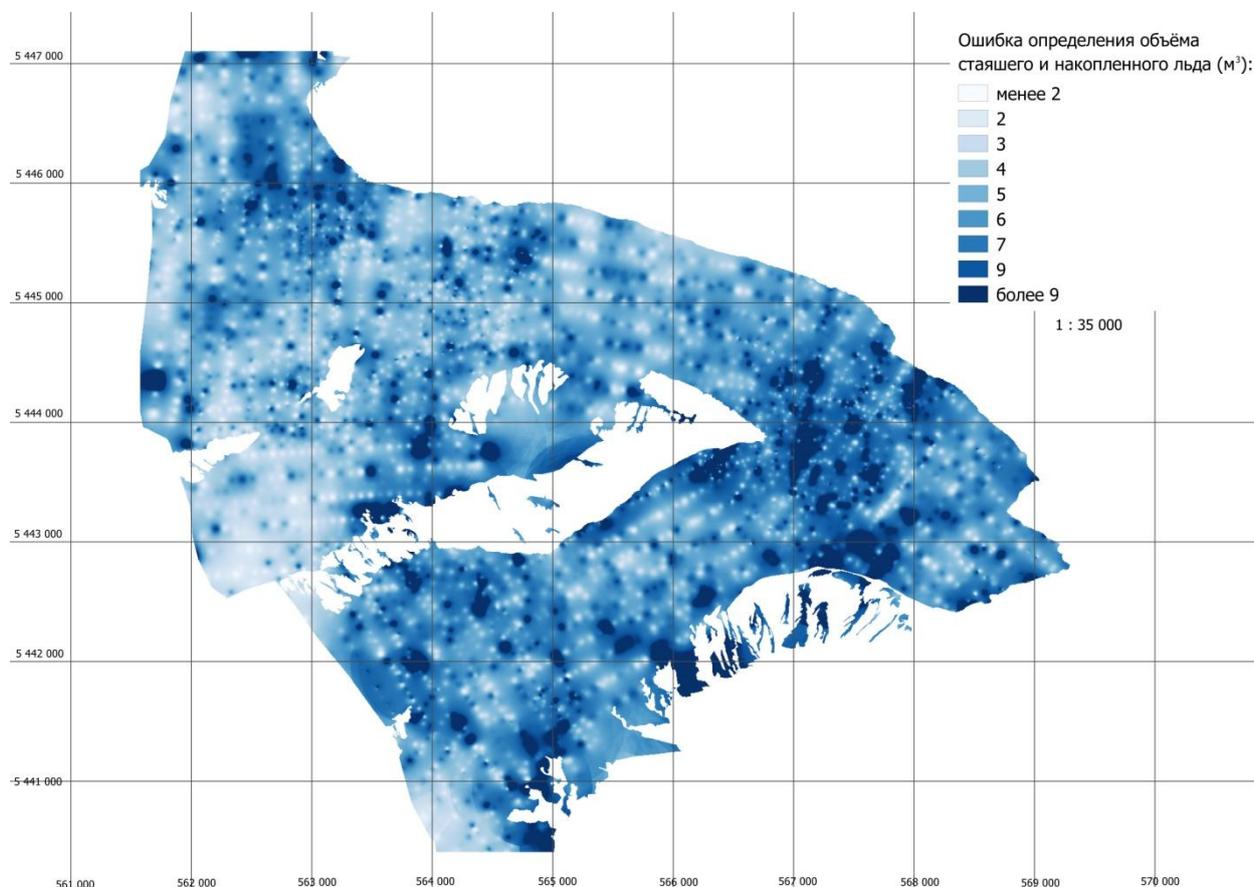


Рис. 50. Ошибка определения объема стаявшего и накопленного снега и льда в м^3 , рассчитанная по ошибкам определения высоты центров фотографирования.

Далее, по рассчитанной поверхности ошибок определения объема была произведена зональная статистика по той же самой маске положительных и отрицательных значений, что была получена по растру рассчитанного объема стаявшего и накопленного снега и льда. В результате, полученные значения суммы ошибок соответствовали зонам накопления и зонам таяния снега и льда. Для стаявшего снега и льда при достаточно грубой оценке ошибка составила $5\,937\,418\text{ м}^3$, относительно общего объема это около 13%. Для накопленного объема значение составило $141\,823\text{ м}^3$ – 1%. Результат вычислений следует записать как $46\,031\,100 \pm 5\,937\,418\text{ м}^3$ стаявшего снега и льда и $11\,710\,000 \pm 141\,823\text{ м}^3$ накопленного снега и льда.

Представленный метод оценки ошибки рассчитанного объема является достаточно грубым, для его применения был принят ряд допущений: нет вклада ошибок определения

плановых координат центров фотографирования, ошибки, получаемые на центрах, соответствуют ошибкам определения координат объектов местности, использование истинных ошибок в качестве абсолютных и другие. Для более точной оценки необходимо установить пересчет ошибок определения координат центров фотографирования в ошибки наземных точек с учетом влияния не только высотных, но и плановых ошибок. Более того, скорее всего нужен другой метод интерполяции, так как при использовании данного метода, в большей части расчётов ошибка центра снимка имеет большее значение, чем ошибка на краю снимка, что не верно в силу действия дисторсии объектива камеры и других оптических искажений изображения. Также интересно учесть влияние расчлененности рельефа. Более глубокое изучение данного вопроса возможно в последующих исследованиях.

По вычисленному растру разности высот были также рассчитаны скорости таяния. С помощью растрового калькулятора значения разниц высот были разделены на 60 суток (примерное количество дней между двумя частями экспедиции). В среднем по леднику наблюдается уменьшение высоты более чем на 2 см в сутки, местами до 5 см (рис. 51). В целом по леднику Потанина наблюдается ярко выраженный градиент таяния: от быстро тающего языка, до более медленно тающей зоны аккумуляции.

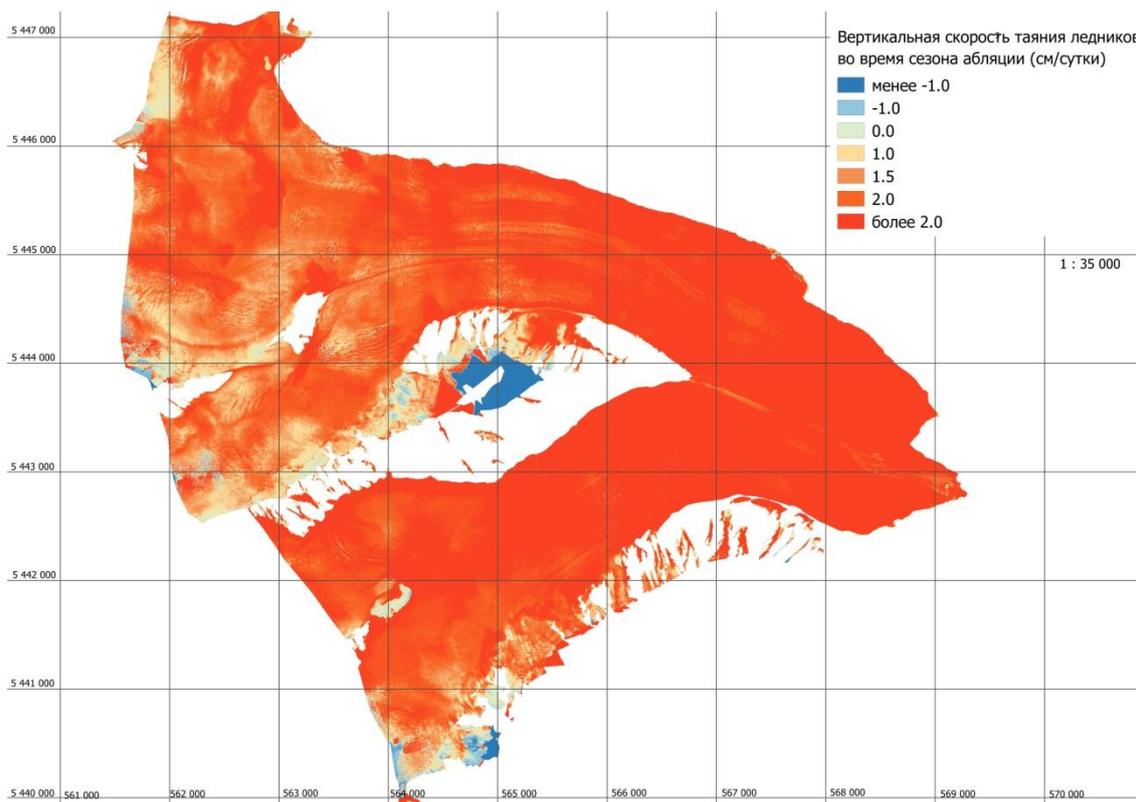


Рис. 51. Вертикальная скорость таяния ледников во время сезона абляции в см/сутки.

Также отчётливо видно отсутствие смещений по срединной морене, так как погребенный лёд тает медленнее (рис. 52). Кроме того наблюдаются характерные черты таяния долинного ледника: на прямолинейных участках скорость таяния больше, чем на поворотных участках.

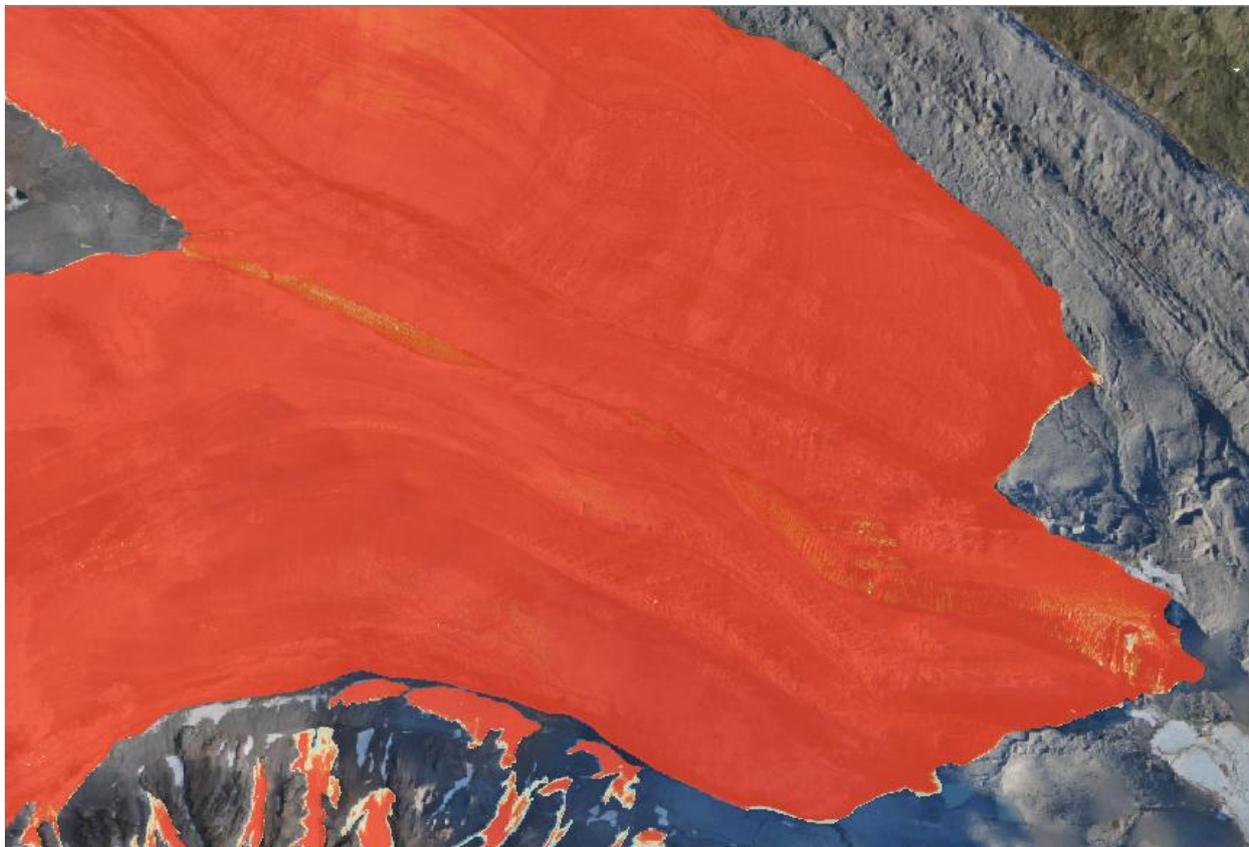


Рис. 52. Наложение растра вертикальных скоростей таяния на ортофотоплан. Таяние погребенного льда проходит заметно медленнее остальной части ледника.

После изучения литературы с похожими исследованиями, было найдено решение для автоматического расчёта горизонтальных скоростей движения ледников без использования опорных точек на его поверхности. Автоматический коррелятор, реализованный в открытом программном обеспечении COSSI-Corr (Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation) в качестве дополнительного модуля к ENVI Classic. Методология использования данного модуля достаточно проста, основную сложность составляет подбор параметров обработки. Так как это довольно трудоёмкая работа, то в данном исследовании было проведено несколько попыток с представлением наилучшего результата. Однако, для убеждения в правильности полученных результатов, необходимы более глубокие исследования в данном направлении. Изначальные параметры были взяты из предыдущих аналогичных вычислений (Kraaijenbrink et al., 2016).

Корреляция производится по двум разновременным растрам, в данном случае это ортофотопланы начала и конца сезона абляции. Но для автоматического отслеживания движения объектов необходимы одноканальные растры. Было решено выбрать красный диапазон, так как более длинная волна меньше подвержена влияниям атмосферы. Кроме того, входные данные были подвергнуты дополнительной обработке. Одноканальные ортофотопланы были приведены к одинаковым границам, так как имелись смещения центров пикселей двух растров (при использовании исходных данных программное обеспечение выдавало ошибку (рис. 53)).



Рис. 53. Ошибка несовпадения центров пикселей.

Сначала одноканальные, приведенные к одинаковым границам ортофотопланы были загружены в модуль COSI-Corr в ENVI Classic 5.1 и выбраны в качестве исходных данных (рис. 54).

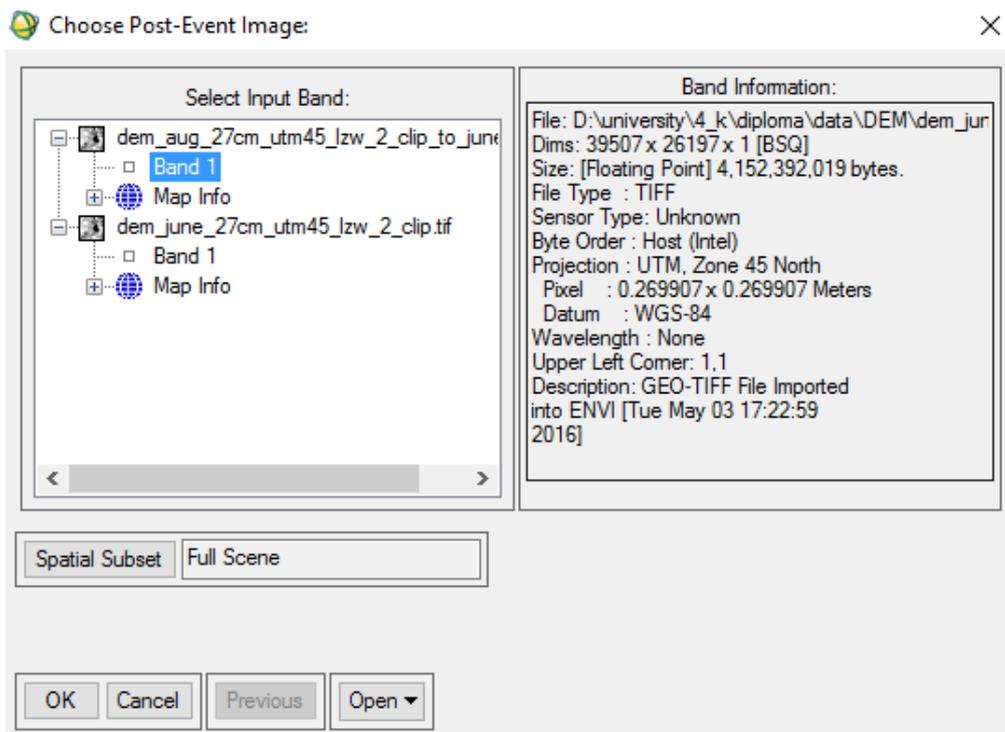


Рис. 54. Загрузка одноканальных ортофотопланов.

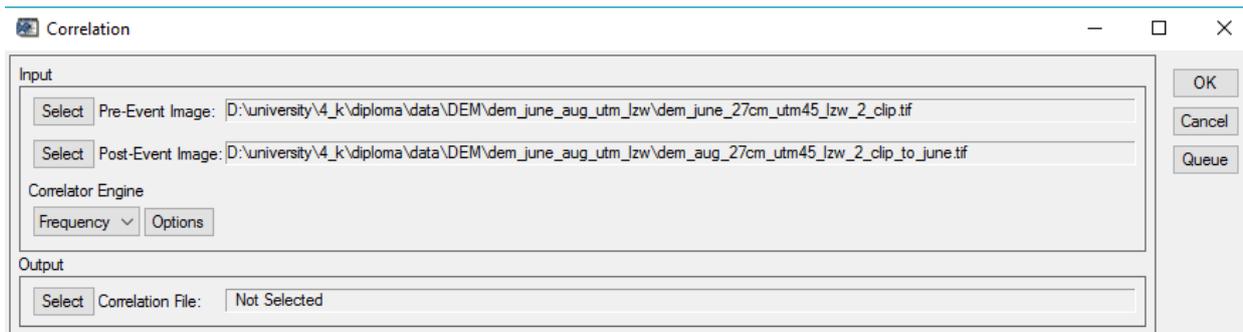


Рис. 55. Выбор необходимых растров и метода корреляции.

Затем была произведена настройка обработки, ниже приведены значения, которые были выбраны как наиболее подходящие (рис. 56).

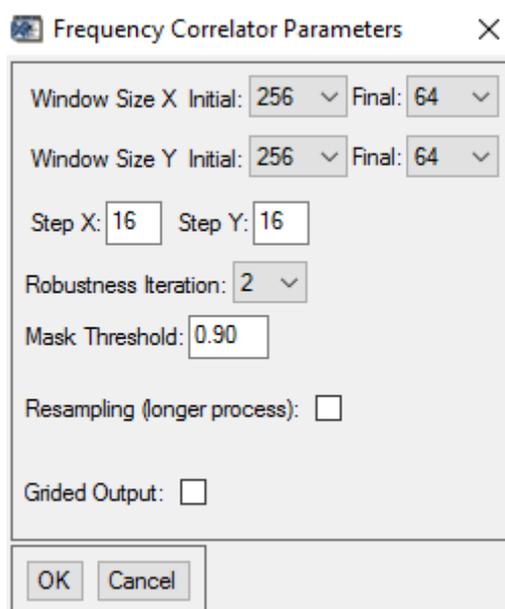


Рис. 56. Настройка параметров для выбранного метода корреляции.

После достаточно длительной обработки был получен трёхканальный растр, в каждой ячейке которого содержится информация о смещениях (величина смещения по направлениям восток-запад, север-юг и значение шума) (рис. 57).

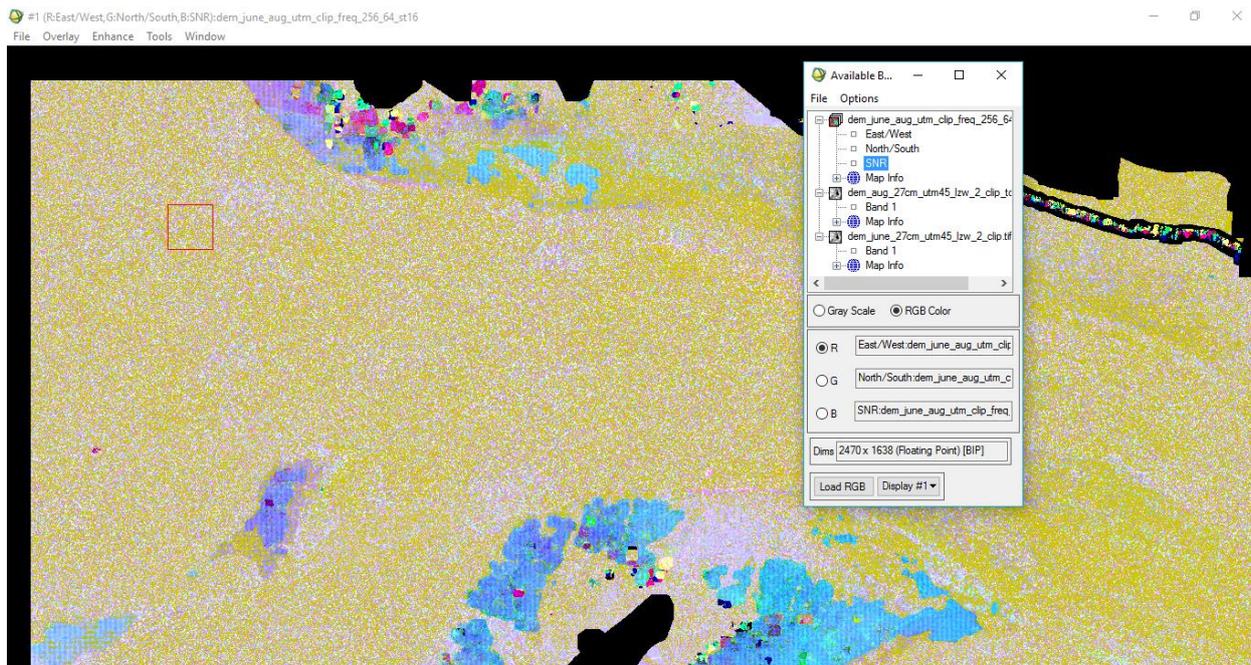


Рис. 57. Фрагмент полученного растра, в каждом пикселе которого хранится два значения смещения и вычисленное значение шума.

Далее полученный растр был подвергнут фильтрации. Параметр шума является основополагающим данной операции, значение его было выбрано 0.5, как указано в документации к модулю (рис. 58).

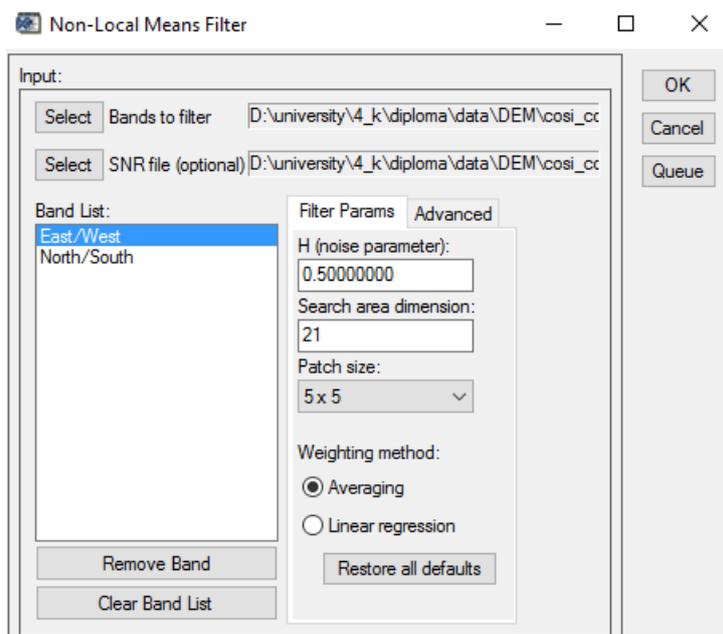


Рис. 58. Настройка параметров фильтрации.

После проведения операции фильтрации было построено поле векторов по полученному отфильтрованному растру (рис. 59). На данном изображении отчетливо видны ошибочные измерения, а также тенденции к направлениям и величинам смещений.

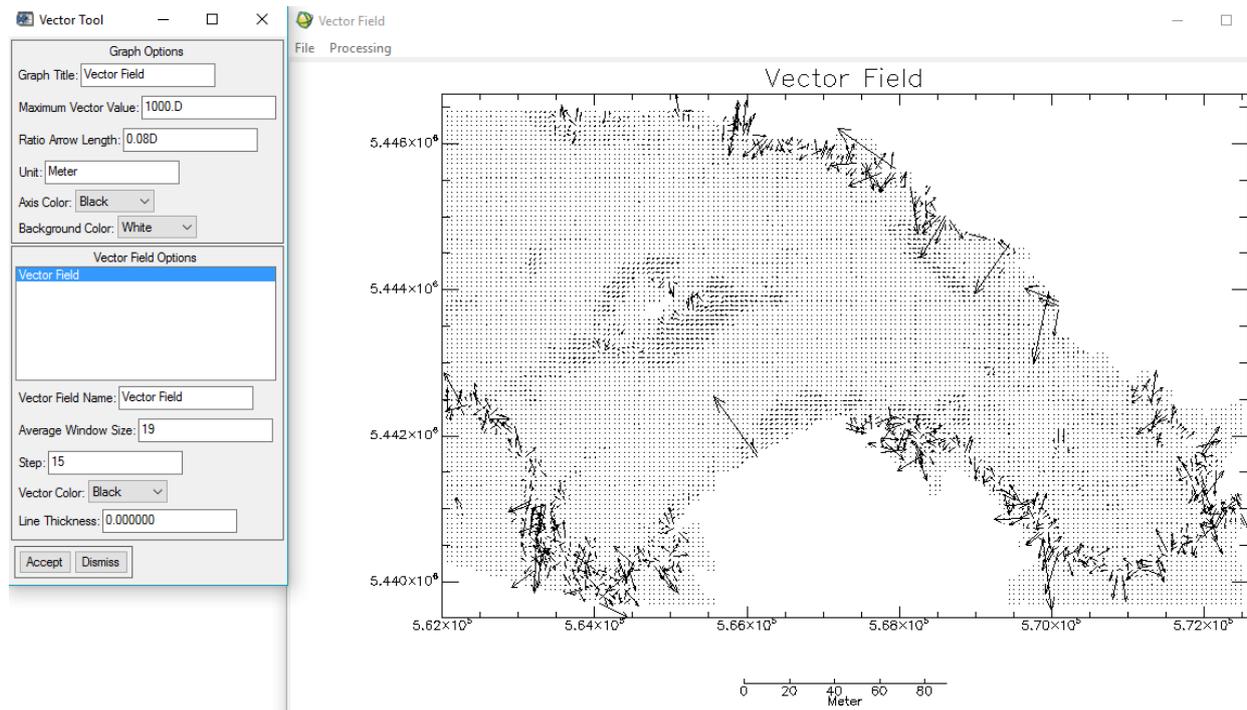


Рис. 59. Рассчитанные вектора горизонтальных смещений по всей поверхности ледника.

Полученные вектора были экспортированы в линейный шейп-файл. Объекты со значениями смещений более 300 м были удалены как ошибочные. При экспорте в атрибутивной таблице не сохраняется никакой информации о направлении и величине смещения, поэтому в ArcMap с помощью калькулятора полей векторного слоя были рассчитаны длины векторов, которые отображают величину смещения, а затем, с помощью инструмента Feature to line (объект в точку), линии были преобразованы в точки. Это необходимо для проведения интерполяции и получения непрерывного поля горизонтальных скоростей поверхности ледников. Значения смещений были разделены на 60 (примерное количество суток между полученными двух поверхностей), таким образом, были получены горизонтальные скорости смещения поверхности ледников. В качестве метода интерполяции был выбран метод натурального соседа с пространственным разрешением в 5 м, так как при создании векторного поля шаг усреднения был задан около 5 м (рис. 60). Заметно, что преобладают достаточно малые плановые смещения по всей поверхности ледника, но при этом таяние вертикальное проходило достаточно активно. Самые большие смещения наблюдаются на склонах, откуда снег медленно сползает и тает. Но, как говорилось выше, горизонтальные скорости требуют более тщательного исследования, так как результат

сильно зависит от настроек обработки, а данный аспект не входил в основные задачи данной работы.

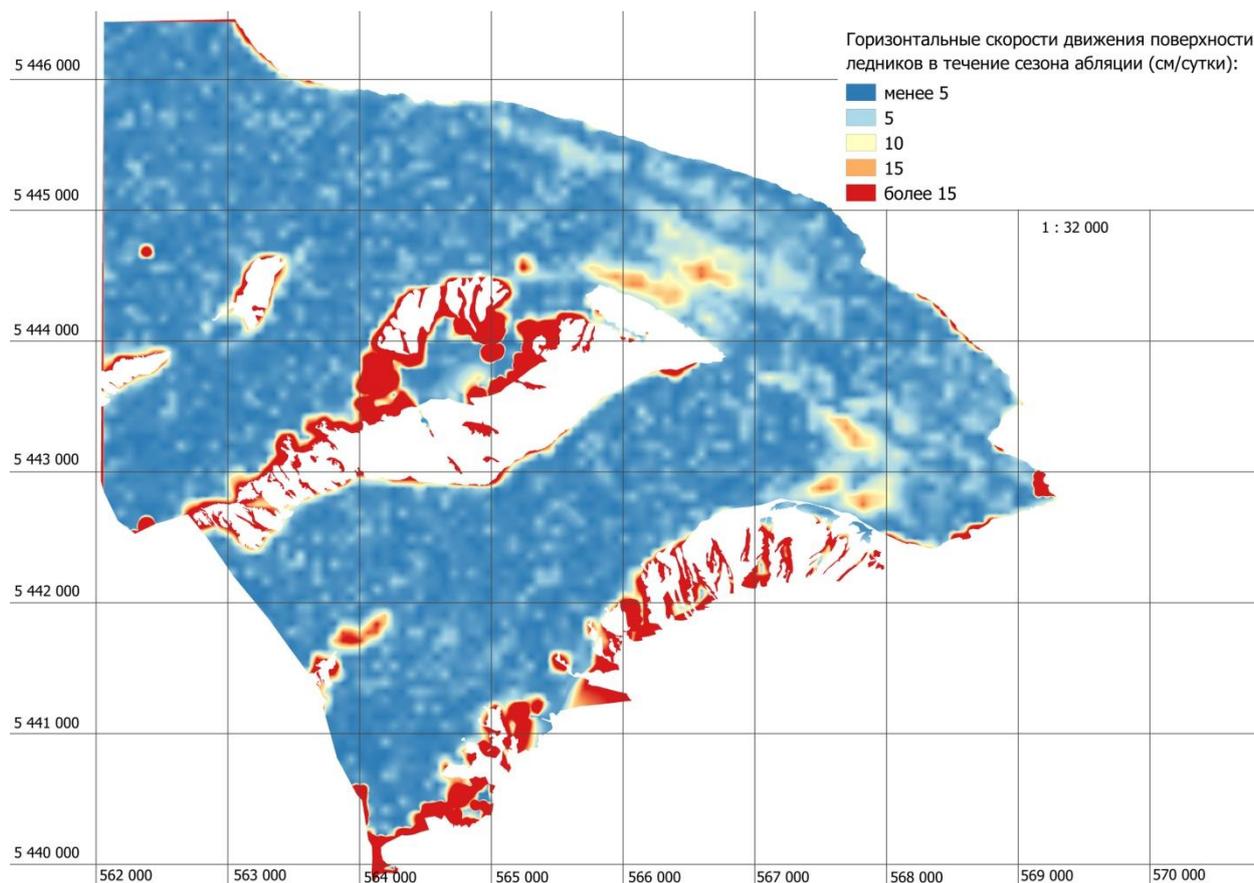


Рис. 60. Горизонтальные скорости движения поверхности ледников в течение сезона абляции в см/сутки.

К классическим характеристикам, рассчитываемых по ЦМР, относятся также карта уклонов (рис. 61 и 62) и экспозиции (рис. 63 и 64). Они были рассчитаны в ArcMap с помощью одноимённых инструментов (Slope и Aspect). Уклоны в ArcMap рассчитываются по методу восьми направлений.

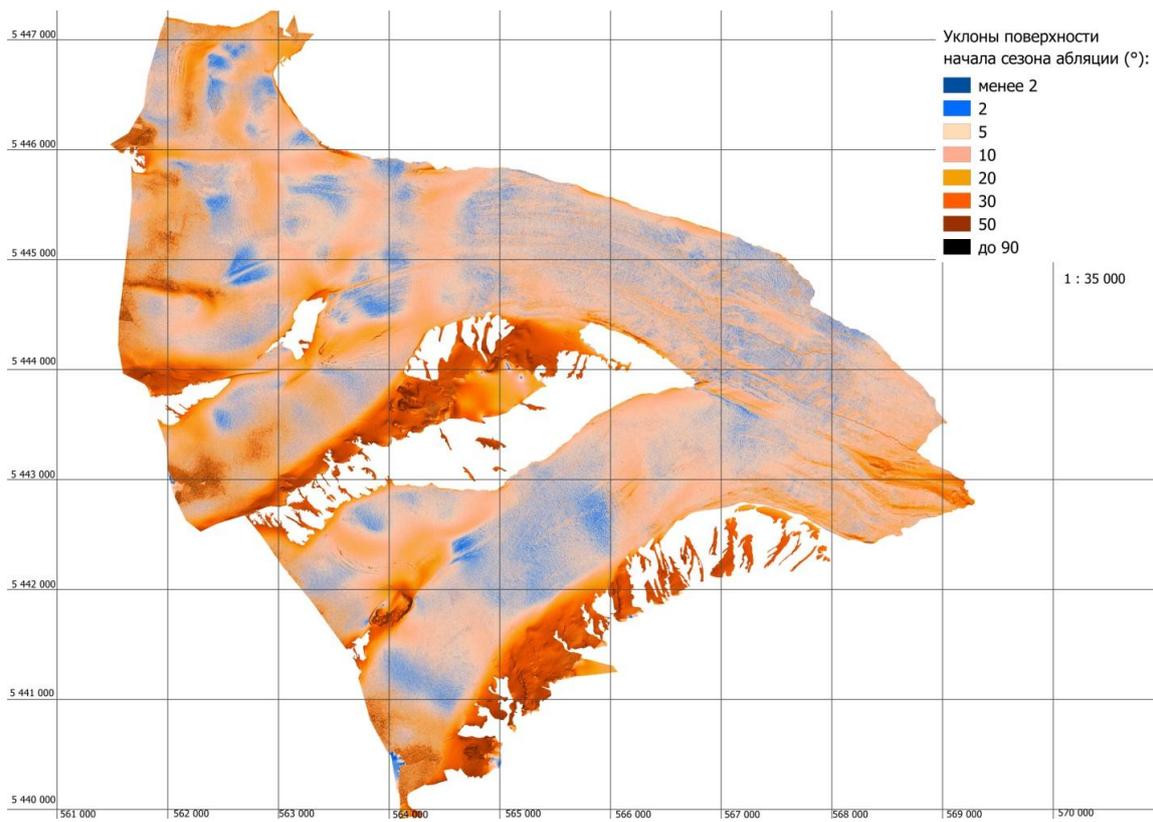


Рис. 61. Уклоны поверхности начала сезона абляции в °.

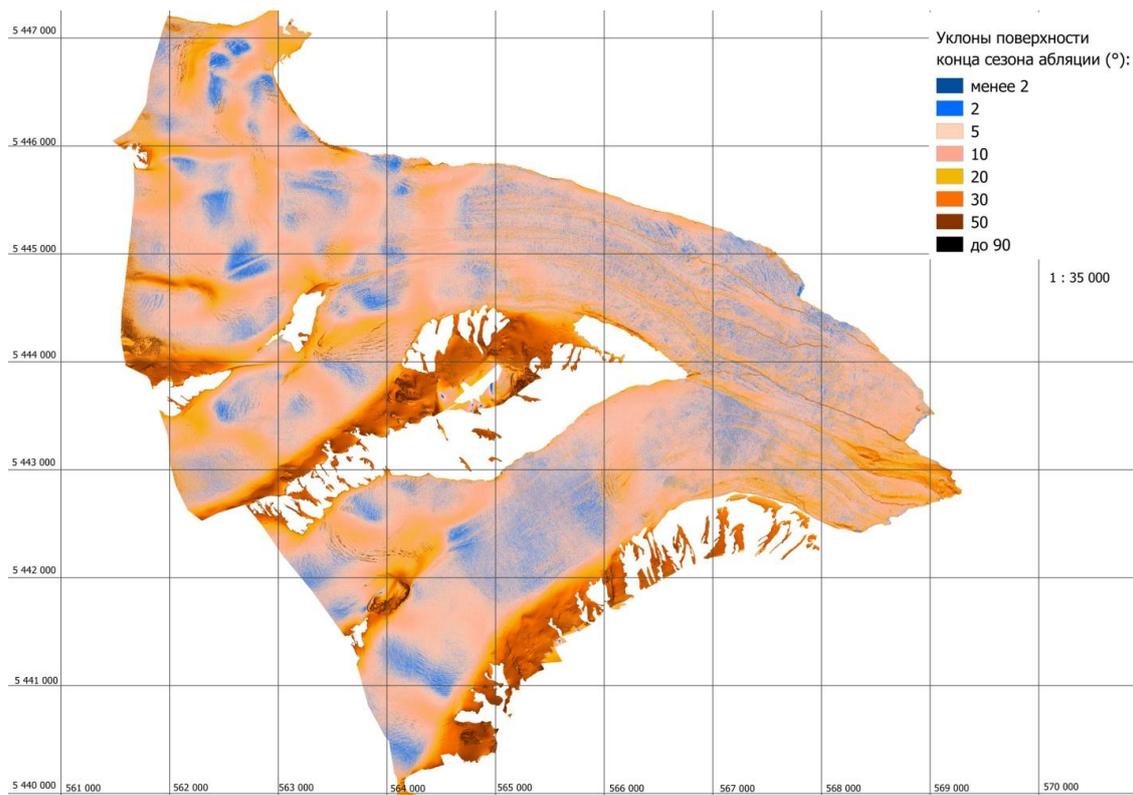


Рис. 62. Уклоны поверхности конца сезона абляции в °.

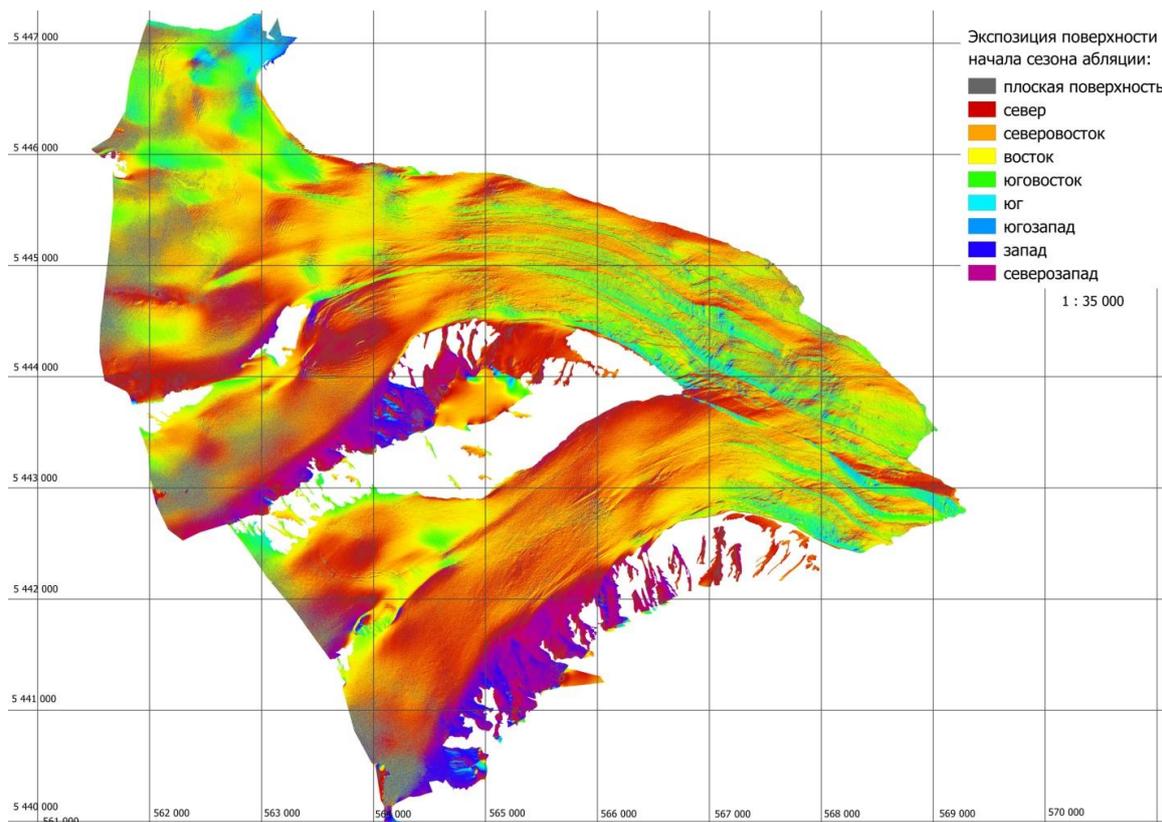


Рис. 63. Экспозиция поверхности начала сезона абляции.

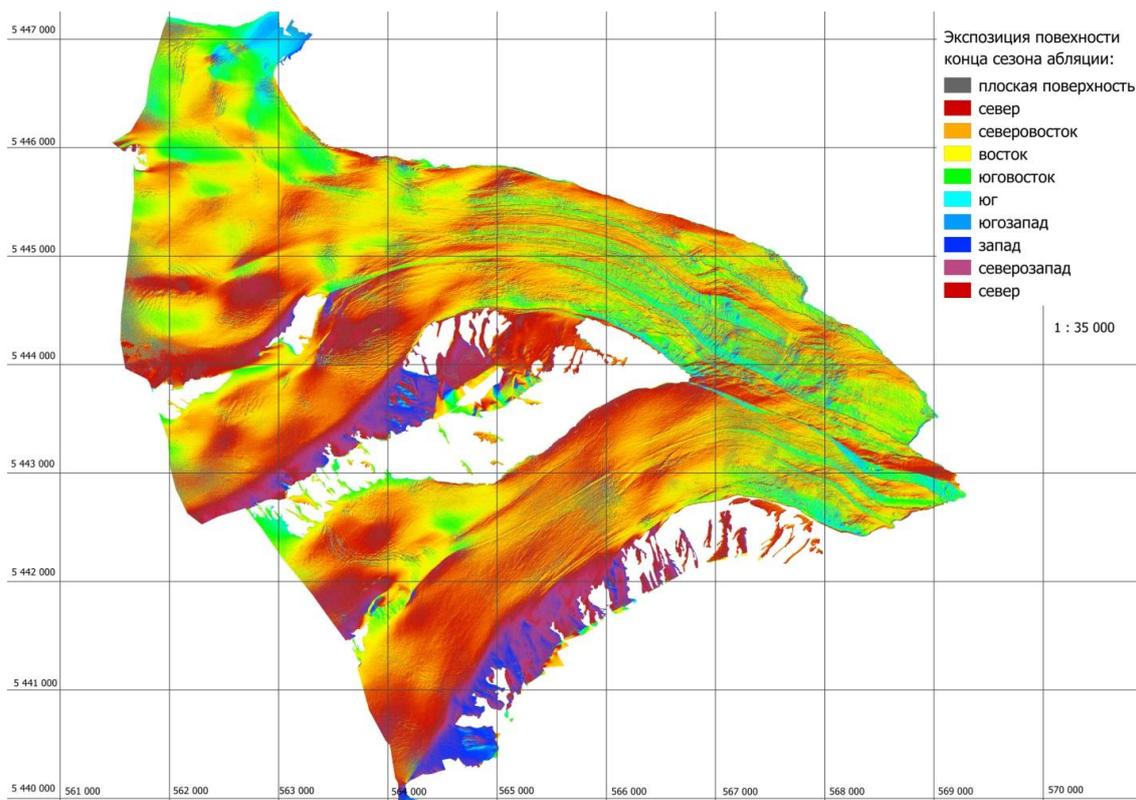


Рис. 64. Экспозиция поверхности конца сезона абляции.

На примере карты уклонов поверхности начала таяния можно увидеть корреляцию небольших уклонов с меньшими вертикальными скоростями таяния и наоборот (рис. 65), а также соответствие участков больших уклонов местоположению групп трещин. Малая корреляция между экспозицией и объёмом ставшего льда на участке активного таяния ледников говорит о том, что этот фактор не является решающим в распределении градиента таяния. При расчёте корреляции между уклонами поверхности начала сезона абляции и объёмом стаявшего льда и снега был получен нулевой коэффициент, что позволяет сделать вывод об отсутствии линейной связи между этими двумя показателями. Выявление иных зависимостей требует более интенсивного изучения и не входит в задачи данной работы. Однако, исследования (Сапожников, 1949; Отгонбаяр, 2013) зависимости характера таяния от экспозиции всего ледника показывают, что это один из важнейших факторов, влияющий на формирование режима ледника. Также заметно, что поверхности за сезон абляции практически не изменились, общий характер прямых и наклонных участков сохранился, как и экспозиция поверхности.

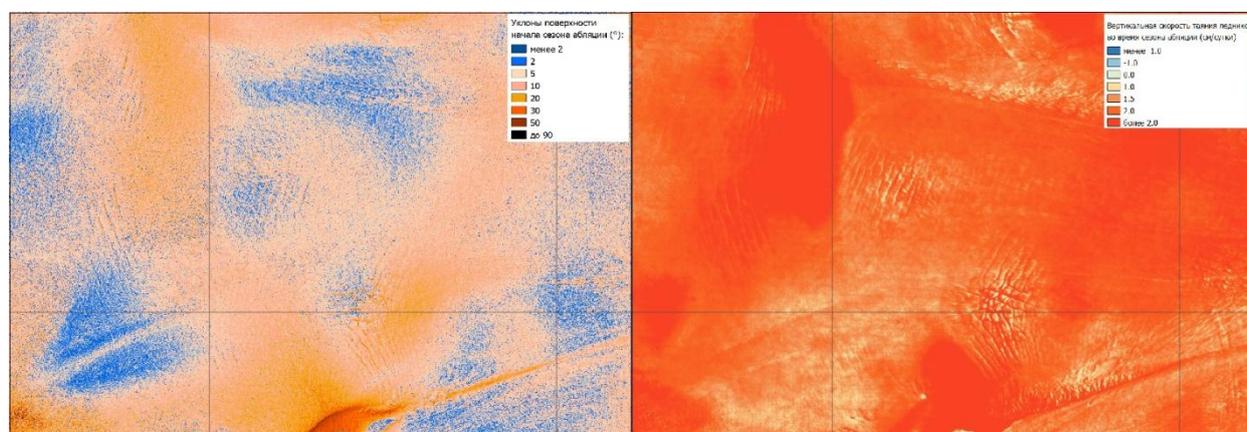


Рис. 65. Фрагменты карт уклонов и вертикальных скоростей таяния.

По двум полученным ЦМР также была проведена оценка отступления языков ледников, которое имеет особое значение в гляциологических исследованиях и позволяет делать прогнозы развития ситуации. На ледниках Потанина и Александры отступление языка за сезон абляции составило от 10 до 18 метров, местами отступления не произошло вовсе благодаря тому, что бронированный лёд тает медленнее (рис. 66).



Рис. 66. Отступление языков ледников Потанина и Александры за сезон абляции.

Также было решено произвести анализ двух поверхностей путём построения нескольких продольных и поперечных профилей (рис. 67) по ЦМР начальной поверхности сезона абляции и суточной скорости таяния ледников за период активного таяния. На поперечных профилях (рис. 68 и 69) не так заметна зависимость скорости таяния снега и льда от высоты, больше от пересеченности рельефа, которая хорошо видна на карте экспозиции поверхности (рис. 70). На продольных же профилях (рис. 71 и 73) заметны некоторые выбросы (как в большую, так и в меньшую сторону). При подробном изучении это оказались участки трещин и русел рек (рис. 72 и 74).

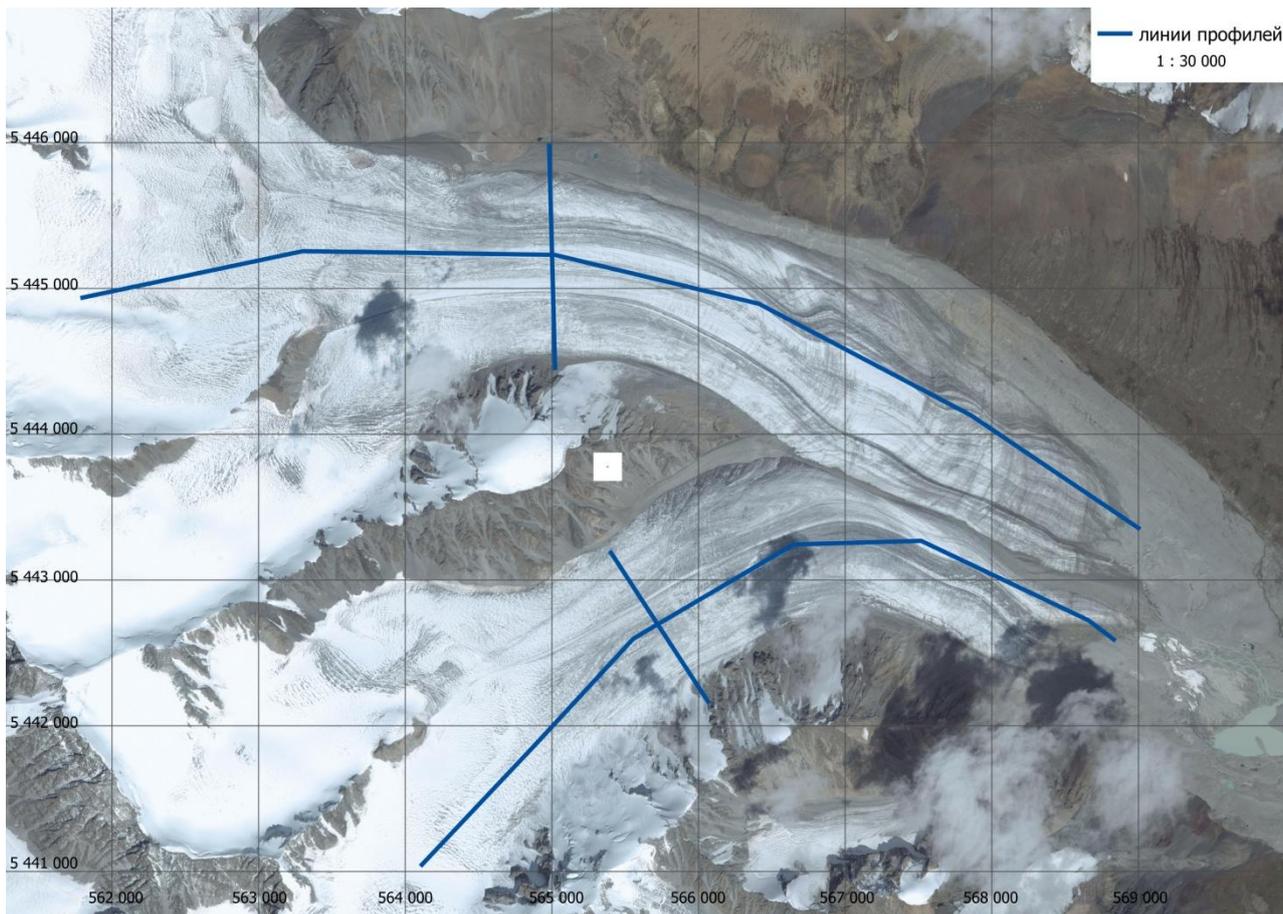


Рис. 67. Схема расположения проведенных и рассчитанных профилей.

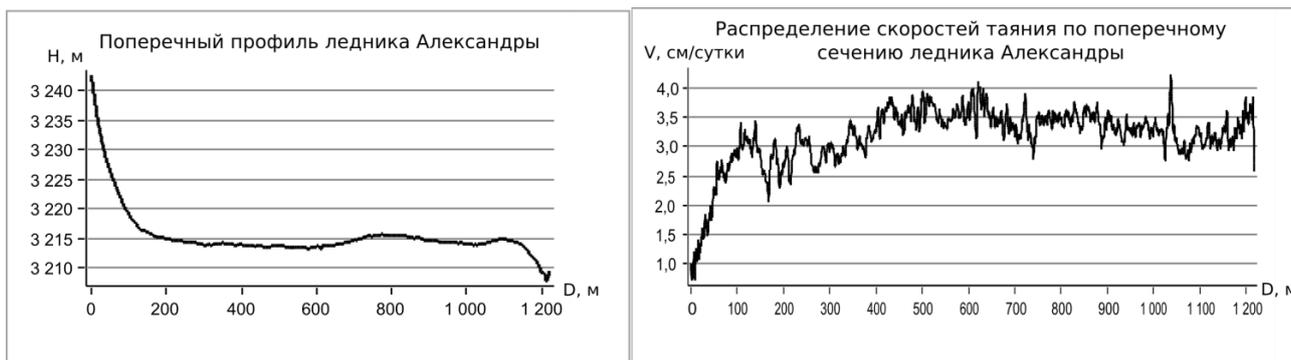


Рис. 68. Поперечный профиль абсолютных высот ледника Александры на начало сезона абляции и вертикальных скоростей таяния.

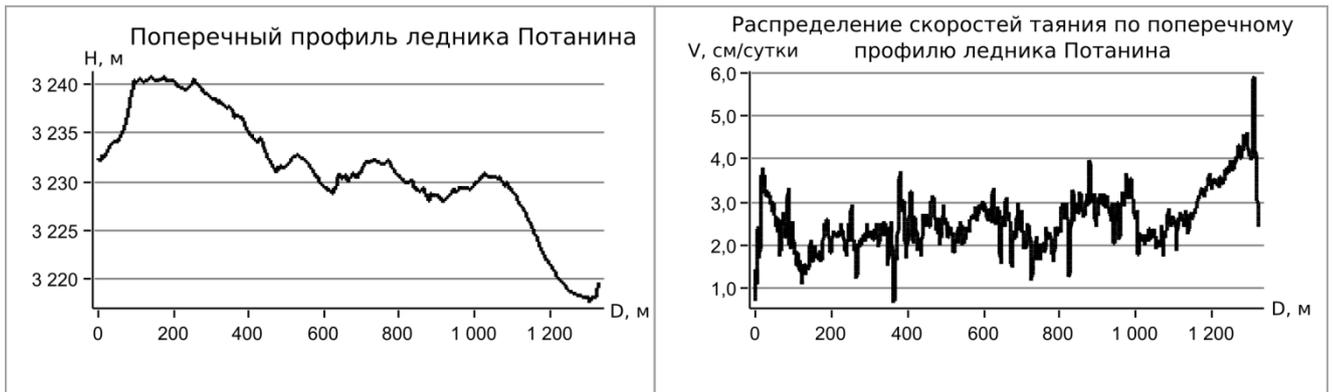


Рис. 69. Поперечный профиль абсолютных высот ледника Потанина на начало сезона абляции и вертикальных скоростей таяния.

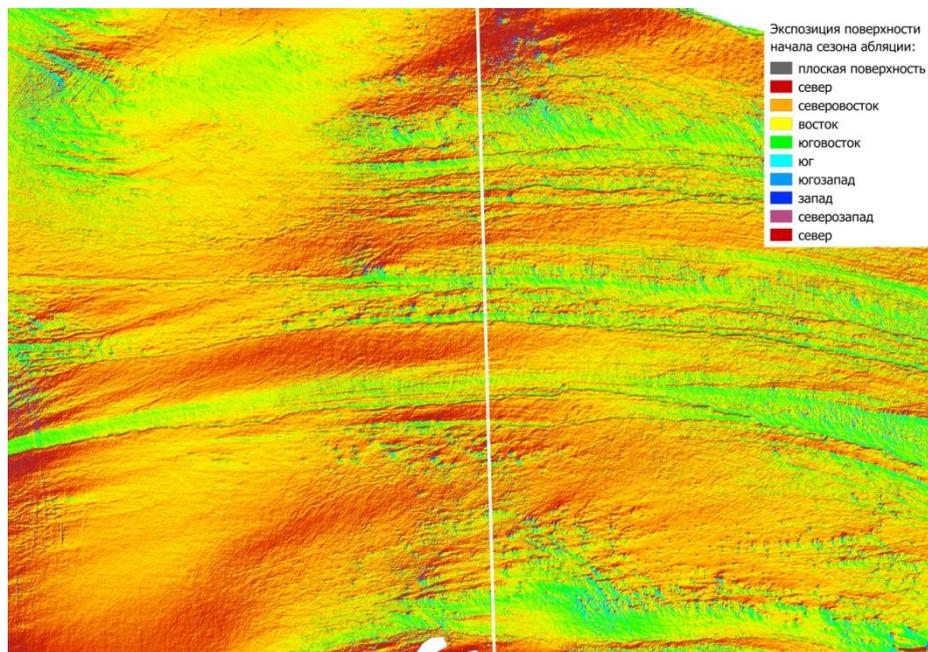


Рис. 70. Фрагмент поперечного сечения ледника Потанина на карте экспозиций поверхности. Читаемая зависимость изменения скорости таяния от степени пересеченности местности.

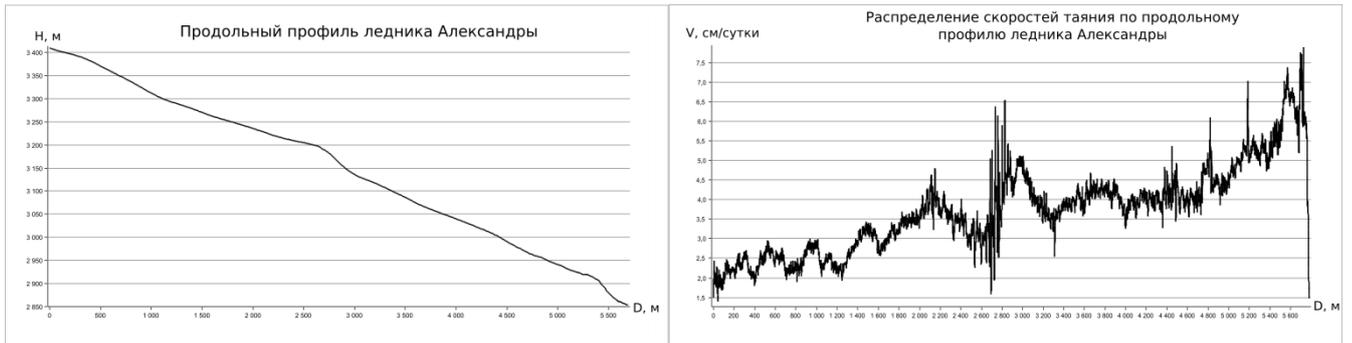


Рис. 71. Продольный профиль абсолютных высот ледника Александры на начало сезона абляции и вертикальных скоростей таяния.

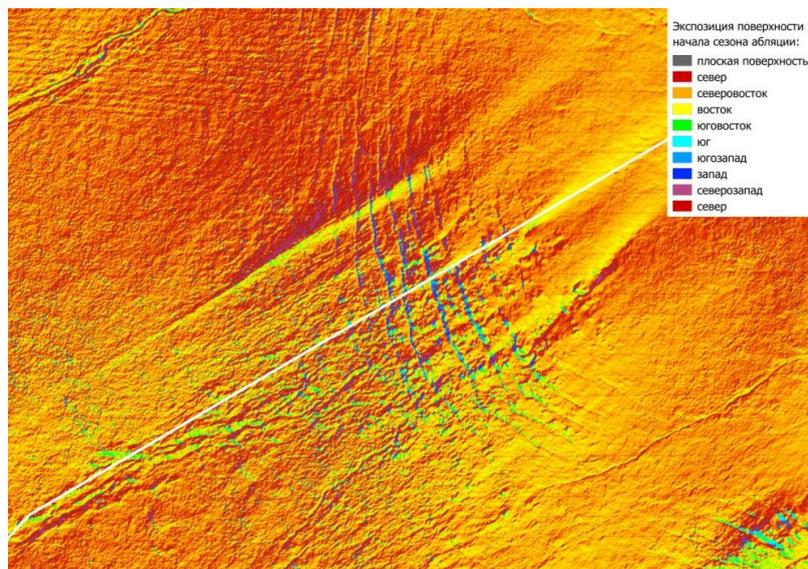


Рис. 72. Фрагмент продольного сечения ледника Александра на карте экспозиций поверхности. Резкие изменения скоростей таяния в районе трещин.

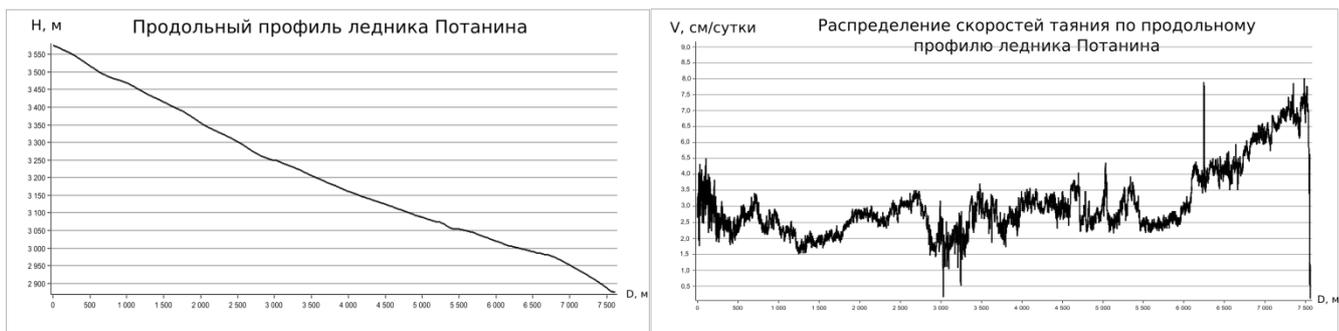


Рис. 73. Продольный профиль абсолютных высот ледника Потанина на начало сезона абляции и вертикальных скоростей таяния.

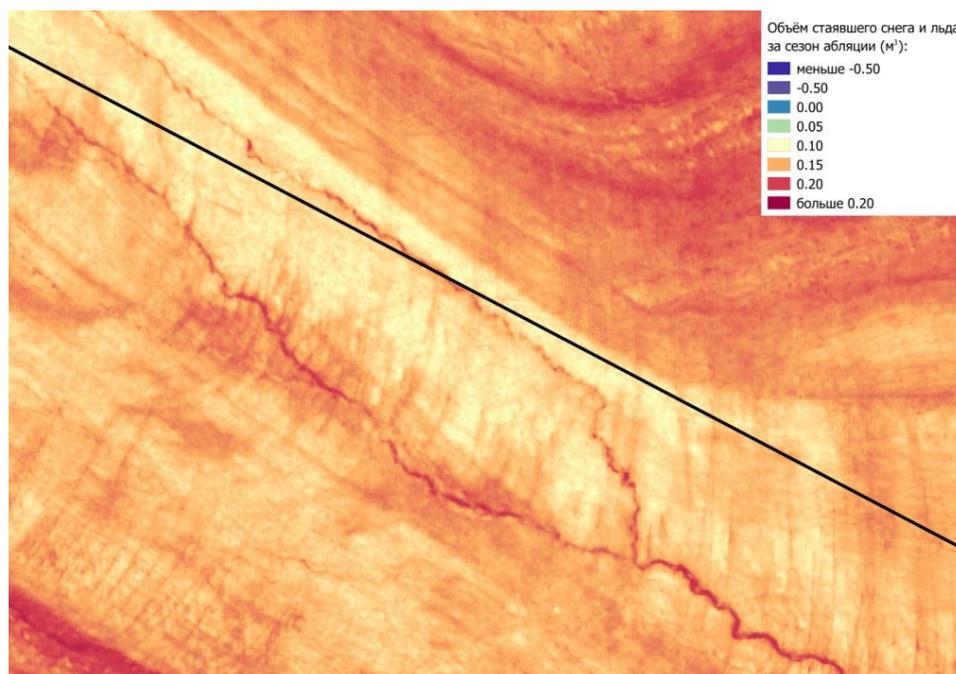


Рис. 74. Фрагмент продольного сечения ледника Потанина на карте объёма стаявшего и накопленного льда и снега. Резкие изменения скоростей таяния в районе русел рек.

Ещё одним из важнейших показателей является высота границы питания, по которой также производятся прогнозы дальнейшего развития ледников, а также эта характеристика необходима для расчета годового баланса масс. Обычно границу питания определяют на местности визуально и фиксируют её положение наземными методами (например, ГНСС приёмниками). В данном исследовании было решено провести границу питания по ортофотоплану конечной поверхности сезона абляции с помощью специалиста Банцева Д.В. Высота границы питания на леднике Потанина по его определению находится на высотах 3500 – 3700 м, на леднике Александры – 3400 – 3500 м (рис. 75). В силу нехватки времени и других причин, описанных ранее, произвести аэрофотосъемку на всю территорию зоны аккумуляции ледника Потанина не удалось, а граница питания оказалось достаточно высоко,

в начале сезона её не видно так четко из-за свежего нарастающего снега. Она была проведена почти по самому краю ортофотоплана. На леднике Александры такой проблемы не возникло, так как была отснята большая часть его зоны аккумуляции. Далее по полученной поверхности объемов стаявшего снега и льда было решено произвести аналогичную работу, отделив зоны положительного и отрицательного баланса масс, а также провести фирновую границу. Результаты оказались достаточно похожими, что говорит о возможности использования и того и другого метода. Но такого же результата невозможно было добиться наземными методами, так как в эти зоны гляциологические маршруты так и не смогли добраться за счет достаточно опасной обстановки для пешего перемещения на ледниках (возможно только в одной части зоны питания ледника Александры). Фирновая граница также может быть проведена и по ортофотоплану, фирновые пятна темнее льда и снега, поэтому хорошо различимы. Высота ее прохождения 3300 – 3400 м (рис. 75).

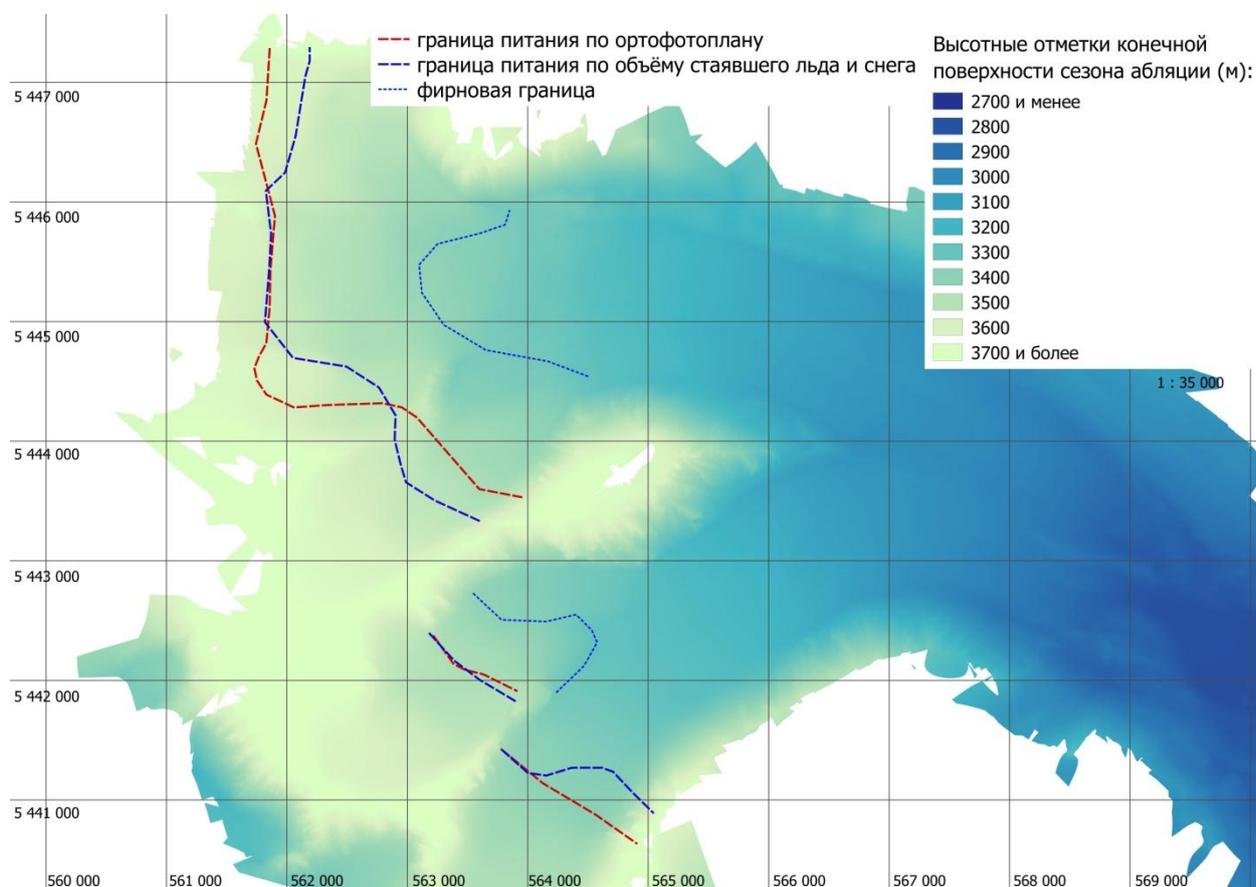


Рис. 75. Граница питания и фирновая граница на ЦМР конечной поверхности сезона абляции.

Таким образом, помимо необходимого расчёта объёма стаявшего снега и льда, по результатам аэрофотосъемки можно проводить дополнительные расчёты с помощью геоинформационного анализа, которые будут предоставлять вспомогательные данные для проведения более сложных и комплексных исследований.

Глава 5. Разработанная методология.

Одним из главных результатов работ стала разработанная и опробованная технология проведения подобных исследований. Но нужно учитывать условия, в которых будут проводиться работы, а также цели их проведения.

Для того чтобы получить в качестве результата оценку объема стаявшего снега и льда ледника за сезон абляции, прежде всего, необходимо запланировать два периода проведения экспедиции, а именно в начале и в конце сезона активного таяния на леднике. Этот период может изменять свои границы в зависимости от исследуемой территории, поэтому сначала требуется ознакомиться со среднемноголетними климатическими наблюдениями будущего района изучения. Для непосредственного проведения измерений необходим БПЛА самолётного типа с достаточной для исследуемых площадей длительностью полёта, точным геодезическим приёмником на борту и всем остальным, необходимым для осуществления аэрофотосъемки (фотоаппарат, катапульта, НСУ, аккумуляторы и другое). Геодезическое оборудование в виде двух ГНСС приёмников двухчастотных, двухсистемных, один из которых должен работать на той же частоте, что и приёмник на борту БПЛА. Необходимо также соответствующее дополнительное оборудование, такое как штативы, центрыры, измерительные инструменты (рулетка), контроллер ГНСС-приёмников, арматуры или другой материал для закладки пунктов, электрогенератор.

По прибытию на место в первой части экспедиции требуется провести рекогносцировку с целью нахождения мест для закладки базового пункта, а также двух других – контрольных, где будет больше уверенности в том, что за период всей экспедиции смещения возможны с наименьшей вероятностью. С базового пункта будут проводиться одновременные с аэрофотосъемкой наблюдения, поэтому лучше подобрать его расположение максимально близко к точке старта, но так, чтобы была меньшая вероятность задеть и сместить базу случайно. На контрольных пунктах измерения будут проводиться всего лишь дважды, поэтому они должны быть в пешей доступности, но на достаточном расстоянии друг от друга равнобедренным или правильным треугольником, чтобы были заметны возникшие смещения. После подбора мест необходимо заложить базовый пункт, обозначить его на местности, нарисовать абрис и провести двенадцатичасовые статические наблюдения. Затем один приемник должен быть оставлен на этом же пункте, второй устанавливается на первую контрольную точку, которую перед этим также закладывают и обозначают на местности, дополняют абрис. Проводятся двухчасовые наблюдения, в течение которых можно заложить второй контрольный пункт, аналогично обозначить и нанести на

абрис. По окончанию наблюдений приемник с базовой станции переносится на второй контрольный пункт, проводятся двухчасовые наблюдения между двумя контрольными пунктами. По истечению времени, приемник с первой контрольной точки переносится на базовый пункт, проводятся двухчасовые наблюдения между базовым и вторым контрольным пунктом. Таким образом, будет обеспечено плано-высотное обоснование аэрофотосъемки в виде одной базовой станции. Разработанная технология не предполагает использования дополнительных закрепленных на земле и опознаваемых с воздуха точек, с целью уменьшения риска и времени проводимых исследований. Такой подход был ранее апробирован и показал получение ошибок около 10 - 20 см (Whitehead and Hugenholtz, 2014; Turner et al., 2014). Данный вид работ должен быть выполнен в течение двух дней, далее приступают непосредственно к аэрофотосъемке.

Перед проведением съемки нужно определиться со сроками и порядком её проведения. Необходимо учитывать, что таяние в зоне абляции идет значительно интенсивнее, чем в зоне аккумуляции. Поэтому, во избежание появления больших ошибок, съемку зоны абляции требуется провести в наикратчайшие сроки – 1-2 дня. Остальную часть ледника тоже нужно отснять до появления больших смещений, но тут появляется сильная зависимость от метеоусловий. Редко, когда на леднике устанавливаются 4-5 дней подряд с благоприятными для аэрофотосъемки условиями, но при их наличии необходимо уложиться именно в такое время. Обеспечив работу ГНСС-приёмника на базовом пункте с частотой записи данных аналогичной частоте записи данных бортового высокоточного геодезического приёмника, необходимо приступить к подготовке полётных заданий и сбору и проверке БПЛА. Полётные задания необходимо составлять с большой поправкой на метеорологические условия, а также на время осуществления полёта. Более того, желательно не оставлять участков без покрытия, чтобы в конечном итоге получить непрерывные поверхности по всей площади ледника и прилегающих территорий. Перед проведением съемки дополнительно нужно решить вопрос с основными параметрами полёта, такими как продольное и поперечное перекрытия и пространственное разрешение или высота полёта. Более безопасно выбирать параметр полёта на одной высоте. Но, если условия не слишком сложные, то можно сфокусироваться на необходимом пространственном разрешении. Между полётами производится получение с борта всех полученных данных, заменяется аккумулятор, разряженный при этом ставится на зарядку, проверяется парашют, комплектуется борт заново и готовится к следующему полёту. Во время полёта необходимо тщательно следить за состоянием аккумулятора, количеством получаемых снимков и их паспортов, а также

видимых спутников. При возникновении внештатной ситуации лучше переходить в ручной режим управления. Так, например, на некоторых очень длинных подлётах, которые обычно сопровождаются активным набором высоты, часто происходит просадка высоты, на набор которой затрачивается дополнительная энергия аккумуляторов. Это грозит тем, что на обратный перелёт энергии БПЛА не хватит. В таких ситуациях ручной набор высоты будет значительно эффективнее. При наличии сильного ветра на высотах полёта рекомендуется вернуть БПЛА и отложить полёт на другое время или попробовать провести их на соседних территориях. Также, если во время полёта было замечено, что другая ориентация полёта требовала бы меньших энергетических затрат, то лучше изменить полётное задание и учесть этот факт при составлении последующих на соседние территории. При планировании работ также следует учесть, что особый интерес представляет зона аккумуляции, поэтому её аэрофотосъемка должна быть проведена обязательно. Остальные области более или менее могут быть охвачены гляциологическими наземными исследованиями, но зона питания всегда была наиболее опасной для пеших маршрутов. После окончания аэрофотосъемочных работ проверяется покрытие ледника аэрофотосъемкой, сохраняются полётные задания, настройки. Все материалы должны храниться хотя бы на двух носителях во избежание их потери. Также во время проведения аэрофотосъемки рекомендуется вести дневник прохождения полётов, погодных условий, экстренных ситуаций и других происшествий. Эта информация может оказаться полезной при проведении камеральной обработки данных.

Между экспедициями желательно провести геодезическую обработку полученных данных. Двенадцатичасовые наблюдения на базовом пункте должны быть уравнены на ближайшие станции сети ITRF, также образующие равнобедренные треугольники с базой, так как данная фигура в геодезических измерениях считается наиболее надежной, с использованием точных эфемерид. Полученные координаты базового пункта используются в обработке наблюдений контрольных пунктов в качестве закрепленных и в плане и по высоте. Фиксируются полученные координаты контрольных точек, а также эллипсоидальные расстояния между пунктами наблюдений.

Во второй части экспедиции перед аэрофотосъемкой повторяются наблюдения по треугольнику между базовым и контрольными пунктами. Если имеется возможность, то проводится расчёт новых координат базового пункта и эллипсоидальных расстояний, с использованием закрепленных рассчитанных координат контрольных пунктов. Допустимы смещения в диапазоне нескольких миллиметров. Расхождение в пару сантиметров тоже допустимо, но в таких случаях для обработки будущих аэрофотограмметрических данных

второго периода экспедиции лучше использовать их. Или, если нет уверенности в достоверности полученных данных, произвести повторные наблюдения, но при этом учитывать остающееся время на аэрофотосъемку.

После проведения всех геодезических работ необходимо переходить к выполнению аэрофотосъемки, которая должна быть проведена в те же сроки, желательно по тем же полётам и настройкам. Зачастую погодные условия не позволяют этого сделать, но охватываемая площадь, безусловно, должна сохраниться.

По окончании экспедиции все материалы должны быть собраны и обработаны в соответствующем программном обеспечении, с получением необходимых материалов, таких как ЦМР и ортофотопланы двух поверхностей ледника за два периода наблюдений. Обработка полученных материалов будет включать в себя несколько этапов. Первый – это обработка базовой станции, получение её координат. Второй – это геодезическая обработка координат центров фотографирования. Третий – самый продолжительный – непосредственная фотограмметрическая обработка полученных снимков с целью получения ортофотопланов и ЦМР ледника. Необходимо учитывать, что количество обрабатываемых материалов растёт пропорционально площади отснятой территории, поэтому заранее необходимо позаботиться о техническом обеспечении обработки.

Если расчёт координат базовой станции был произведен между двумя частями экспедиции, а также непосредственно во время проведения второго периода, то необходимо переходить к следующим этапам. Если нет, то производятся расчёты, контроль получаемых данных по высоте базового пункта и эллипсоидальным расстояниям. Рекомендации по точностям получаемых результатов описаны выше.

Для оптимизации времени обработки сначала можно сформировать проект по обработке аэрофотоснимков и запустить первый этап обработки – уравнивание снимков, не требующий точных геодезических координат. Программное обеспечение для обработки рекомендуется выбирать максимально автоматизированное, так как объём обрабатываемых данных достаточно велик, а его ручная обработка приведет к слишком сильному увеличению временных затрат. Таких проектов будет два – каждый на отдельный период проведения аэрофотосъемки.

В то время как происходит уравнивание снимков, необходимо произвести обработку высокоточного бортового геодезического приёмника и получить уточненные координаты центров фотографирования. Обработка должна производиться также с использованием файла базовой станции, работающей в тот же период времени. Полученные координаты

должны быть сохранены и использованы в следующих этапах фотограмметрической обработки. При получении неудовлетворительных среднеквадратических ошибок возможно использование точных эфемерид, запрошенных со сторонних ресурсов, или отключение отдельных, подозрительных спутников из обработки.

После окончания этапа уравнивания снимков необходимо заменить навигационные, грубые координаты центров на рассчитанные, высокоточные. Дальнейшая обработка сильно зависит от используемого программного обеспечения. Конечными продуктами должны стать ЦМР и ортофотопланы двух поверхностей ледника начала и конца сезона абляции с удовлетворяющими среднеквадратическими ошибками. Для дальнейшей оценки точностей получаемых результатов могут быть экспортированы новые, рассчитанные в течение фотограмметрической обработки центра снимков, с записанными полученными ошибками в плане и по высоте. Экспорт результатов стоит проводить в системе координат обработки, при этом пространственное разрешение продуктов двух периодов должно быть соответственно одинаковое.

После того, как были получены необходимые материалы для дальнейшего геоинформационного анализа, необходимо привести данные последнего периода к первому, или наоборот, в зависимости от полученных точностей обработки. По всей отснятой территории, исключая сам ледник, необходимо набрать достаточное количество точек, покрывающих её равномерно. Точки выбираются такие, что опознаются на обоих ортофотопланах и скорее всего не были подвергнуты смещению. Лучше всего подходят крупные камни на пологих склонах, там, где не происходит подтопление местности. Данные точки послужат опорой для привязки ортофотоплана одного периода наблюдений ко второму. По ним же производится совмещение ЦМР. Это справедливо, так как ЦМР создается по тем же данным, что и ортофотопланы. После проведения совмещения всех материалов необходимо перепроецировать данные из географической системы координат в любую подходящую для исследуемой территории проекцию, так как все расчёты для удобства будут производиться с указанием параметров в метрах.

Для расчёта объёма стаявшего снега и льда за период абляции в первую очередь необходимо выделить границы проводимых вычислений. За помощью в выделении границ ледника рекомендуется обратиться к специалисту – гляциологу. Это достаточно трудоёмкая работа, которая должна быть выполнена со всей тщательностью, чтобы оценка затронула всю интересующую область. Выделение производится по ортофотоплану начала сезона абляции, для того, чтобы в границы вошли и области, полностью лишившиеся покрова в

виде снега и льда за период активного таяния. После выделения области интереса по ней производится обрезка обеих ЦМР. Далее с помощью растрового калькулятора рассчитывается разность этих двух поверхностей, принципиально запомнить из какой поверхности производилось вычитание, чтобы в дальнейшем правильно интерпретировать полученные положительные и отрицательные значения. Полученный растр необходимо внимательно изучить на наличие больших подозрительных значений, обычно они возникают на краях, где ошибка полученных данных резко возрастает за счет небольшого перекрытия снимков. Если такие значения имеются, то для дальнейших расчетов лучше произвести повторное обрезание на этот раз уже рассчитанного растра по маске, в которую ошибочные области входить не будут. Проведя проверку и при необходимости обрезку данных, в растровом калькуляторе необходимо перемножить полученную поверхность на площадь пиксела в m^2 , получив таким образом объём стаявшего снега и льда за сезон абляции в каждом пикселе. После этого, с помощью того же калькулятора, произвести создание маски – все положительные значения должны быть приравнены к единице, все отрицательные – к нулю. С данной маской проводится расчёт зональной статистики по рассчитанной поверхности стаявшего объёма, а именно суммы. По окончании данной операции будет получен растровый файл, в каждом пикселе которого, в зависимости от того, происходило там таяние или накопление снега, будет записан суммарный объём соответствующего процесса.

Для оценки скоростей таяния можно произвести дополнительные вычисления. Поверхность разности высот необходимо разделить на примерное количество суток, прошедших между проведением двух периодов наблюдений. Так будет получена суточная скорость таяния или накопления снега и льда за сезон абляции.

Оценка ошибки вычисления объёма производится с использованием центров фотографирования. Как было описано ранее, необходимо было произвести экспорт рассчитанных центров совместно со среднеквадратическими ошибками определения пространственных координат из программы фотограмметрической обработки. Данные должны быть конвертированы в точечный векторный файл с соответствующими атрибутами. Таким образом, будут получены два векторных файла центров фотографирования на два периода проведения аэрофотосъёмки с атрибутивными данными на каждый центр в виде ошибки определения плановых и высотных координат. Ошибки определения высот должны быть приведены к абсолютному виду. Далее по данным точкам необходимо провести интерполяцию методом обратных взвешенных расстояний, с установкой необходимого

максимального радиуса и минимального количества точек, которые будут зависеть от продольного и поперечного перекрытия снимков. Также указывается пространственное разрешение, оно должно быть одинаковым для всех создаваемых растров. Такие поверхности строятся по обоим периодам по абсолютным значениям определения ошибки высоты центров фотографирования. После создания двух таких поверхностей необходимо произвести их сложение, а затем умножение на площадь пиксела, который был выбран при проведении интерполяции. Так будет получен растр, содержащий в каждом пикселе значение ошибки определения объёма. По маске положительных и отрицательных значений объёма стаявшего и накопленного снега и льда, созданной ранее, проводится аналогичная зональная статистика с получением суммы по заданной маске. Таким образом будут получены две суммарные ошибки определения объёма стаявшего и накопленного снега и льда соответственно. Полученные значения должны быть разделены на результаты первого расчёта объёмов. Так будет вычислена относительная ошибка его расчёта. Как говорилось в части описания проведенных расчётов, данный метод оценки ошибок вычисления объёмов нуждается в дальнейшем совершенствовании и доработке, являясь на данный момент достаточно грубым.

Заключение.

Главной целью представленной работы являлась разработка методологии проведения беспилотной аэрофотосъемки долинных ледников в горных условиях с целью расчёта объёма стаявшего снега и льда за период абляции. Данная технология была разработана и представлена, а также апробирована в рамках экспедиции 2015 года на территории хребта Монгольского Алтая горного узла Табын-богдо-ола ледников Потанина и Александры. Экспедиция была проведена и организована сотрудниками кафедры физической географии и ландшафтного планирования при участии кафедры картографии и геоинформатики Санкт-Петербургского государственного университета при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований.

Для достижения цели был проведён ряд работ. К ним относится развитие геодезического обоснования аэрофотосъёмки, проведение непосредственно самой беспилотной аэрофотосъёмки большей части ледников Потанина и Александры в начале и в конце сезона абляции, а также был пройден весь цикл камеральной фотограмметрической обработки в комплексе с геодезическими данными с целью получения ЦМР и ортофотопланов двух поверхностей ледника. Кроме того был разработан и проведён весь комплекс геоинформационного анализа данных для расчёта объёма стаявшего и накопленного снега и льда за сезон активного таяния, оценки ошибки его расчёта, а также определение других вспомогательных характеристик, наличие которых может позволить произвести более комплексное гляциологическое исследование ледников.

Для валидации полученных данных был разработан метод оценки ошибок с использованием центров фотографирования, полученных после фотограмметрической обработки. Более достоверная проверка может быть выполнена с использованием наземных гляциологических наблюдений, проводимых одновременно с аэрофотосъемкой, в те же периоды. Так как классический гляциологический метод применяется давно, его методология полностью разработана и оценена численно, то такие данные идеально подходят для проверки точностей нового разрабатываемого метода.

Валидация разработанной методологии с помощью гляциологических исследований является одной из наиболее необходимых перспектив развития метода. Также нужно развить технические аспекты проведения аэрофотосъемки для возможности проведения полётов над всей площадью ледника, в том числе наиболее интересной для изучения зоной аккумуляции. Возможно, что применение не оптической, а, например, мультиспектральной камеры, будет давать больше данных для обработки, которые смогут углубить исследования состояния

ледников. Более того, установка на БПЛА температурного датчика и датчика влажности также позволит расширить и уточнить составляемые на основе беспилотной аэрофотосъемки прогнозные сценарии.

Аэрофотосъемка с беспилотных летательных аппаратов в целях гляциологических исследований развивается большими темпами. Её применение позволяет получать данные более оперативно и комплексно, а также и сам характер получаемых данных более подробен, что позволяет производить расчёты объемов, баланса масс, составление прогнозов и остального более точно, с охватом большего количества факторов. Данное направление становится популярнее не только благодаря развитию беспилотных технологий, но и тому, что сама наука гляциология становится более значимой в условиях всё менее стабильного развития индустриального общества, влияние которого на окружающую среду пытаются оценить, сократить и предотвратить.

Список литературы.

1. Войтковский К. Ф. Основы гляциологии. М.: Наука, 1999, 254 с.
2. Галахов В. П., Имитационное моделирование как метод гляциологических реконструкций горного оледенения. Новосибирск: Наука, 2001, 130с.
3. Геоинформатика. Толковый словарь основных терминов. Под ред. А.М. Берлянта и А.В. Кошкарева. М.: ГИС-Ассоциация, 1999, 204 с.
4. Гляциологический словарь. Чл.-корр. АН СССР Котляков В.М., Алексеев В.Р., Волков Н.В. и др. Л.: Гидрометеиздат, 1984, 528 с.
5. Дюргеров М.Б., Мониторинг баланса массы горных ледников. М.: Наука, 1993,127 с.
6. Калесник С.В., Очерки гляциологии. М.: Географгиз, 1963, 551 с.
7. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. и др. Геоинформатика. М.: ИЦ Академия, 2005, 479 с.
8. Книжников Ю.Ф. Исследование движения льда горных ледников стереофотограмметрическим методом. М.: "Наука", 1973, 103 с.
9. Котляков В.М. Снежный покров Земли и ледники. Л.: Гидрометеиздат, 1968, 480 с.
10. Кунахович М.Г. Подобие полей внешнего массообмена и расчет баланса массы горных ледников : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. АН СССР. Ин-т географии, 1991, 24 с.
11. Мейл Д.Х., Патерсон У.С.Б., Перма Р.И. Динамика масс снега и льда.; Пер. с англ. и ред. А.Н. Кренке. Л.: Гидрометеиздат, 1985, 456 с.
12. Основы геоинформатики в 2х книгах. Под ред. Тикунова А.В. М.: ИЦ Академия, 2004, 347 с.
13. Отгонбаяр Д. Современное оледенение Монгольского Алтая; (на примере хребтов Мунххайрхан, Сутай, горного узла Цамбагарав). Барнаул : Бизнес-Коннект, 2013, 141 с.
14. Патерсон У.С.Б., Физика ледников. Пер. с англ. М.Г. Гросвальда и др.; Под ред. В.М. Котлякова. М.: Мир, 1984, 472 с.
15. Сапожников В.В. По Русскому и Монгольскому Алтаю. М.: Географгиз, 1949, 580 с.
16. Словарь терминов, употребляемых в геодезической и картографической деятельности (термины и словосочетания) Под ред. А.И. Спиридонова. М.: Проспект, 2006, 144 с.
17. Сыромятина М.В., Курочкин Ю.Н., Чистяков К.В., Аюрзана Ч. Современное состояние и изменение ледников горного массива Табын-богдо-ола (Монголия). // Лед и снег, 2014, № 54 (3), с.31-38.
18. Тронов М. В. Ледники и климат. Л.: Гидрометеиздат, 1966, 407 с.

19. Тронов М.В., Очерки гляциоклиматологии. Томск: Изд-во Том. ун-та, 1981, 152 с.
20. Уваров В.Н., Пространственно-временная изменчивость и расчет баланса массы ледников Заилийского Алатау : Автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. геогр. наук. АН СССР. Ин-т географии, 1990, 20 с.
21. Цветков Д.Г. Определение изменения объемов горных ледников по материалам стереофотограмметрических съёмок. // МГИ, №15, 1969, с.182-191.
22. Bhardwaj A., Sam L., Martín-Torres F., Kumar R. UAVs as remote sensing platform in glaciology: Present applications and future prospects. // Remote Sensing of Environment, 2016, №175, с.196-204.
23. Bhardwaj A., Sam L., Martín-Torres F. LiDAR remote sensing of the cryosphere: Present applications and future prospects. // Remote Sensing of Environment, 2016, №177, с. 125-143.
24. 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, #108, с. 327-338.
25. 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, №8, с. 342–356.
26. 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 ,20076 №112.
27. Immerzeel W., Kraaijenbrink P., Shea J., Shrestha A., Pellicciotti F., Bierkens M., De Jong S. High-resolution monitoring of Himalayan glacier dynamics using unmanned aerial vehicles. // Remote Sensing of Environment, 2014, №150, с.93-103.
28. Kadota T., Davaa G., Kalsan P., Namgur D., Ohata T. Glaciological research in the Mongolian Altai, 2003 – 2009. // Bulletin of Glaciological Research, 2011, №29, с.41-50.
29. Kargel J. S., Abrams M. J., Bishop M. P., Bush A., Hamilton G., et al. Multispectral imaging contributions to global land ice measurements from space. // Remote Sensing of Environment, 2015, №99, с.187– 219.
30. Kraaijenbrink P., Meijer S., Shea J., Pellicciotti F., De Jong S., Immerzeel W. Seasonal surface velocities of a Himalayan glacier derived by automated correlation of unmanned aerial vehicle imagery. // Annals of Glaciology, 2016, №57 (71), с.103-113.

31. Konya K., Kadota T., Davaa G., Yabuki H., Ohata T. Meteorological and ablation features of Potanin Glacier, Mongolian Altai. // *Bulletin of Glaciological Research*, 2010, №28, c.7-16.
32. 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, №31, c.9-18.
33. Nakazawa F., Konya K., Kadota T., Ohata T. Reconstruction of the depositional environment upstream of Potanin Glacier, Mongolian Altai, from pollen analysis. // *Environmental Research Letters*, 2012, №7, c.1 – 6.
34. Nakazawa F., Konya K., Kadota T., Ohata T. Depositional and summer snow melting features in 2007–2011 on the upstream side of Potanin Glacier, Mongolian Altai, reconstructed by pollen and oxygen isotope analysis. // *Environ Earth Science*, 2015, №7, c.1851–1859.
35. Nuth C., Kääb A. Co-registration and bias corrections of satellite elevation data sets for quantifying glacier thickness change. // *Cryosphere*, 2011, №5, c.271-290.
36. Przybilla H., Wester-Ebbinghaus W. Bildflug mit ferngelenktem Kleinflugzeug. *Bildmessung und Luftbildwesen* 1979, №47, c. 137-142.
37. Toth C., Józkó G. Remote sensing platforms and sensors: A survey. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2015, №115, c. 22-36.
38. Turner D., Lucieer A., Wallace L. Direct georeferencing of ultrahigh-resolution UAV imagery. // *IEEE Trans Geosci Remote Sens*, 2014, № 52 (5), c.2738–2745.
39. Wagnon P., Linda A., Arnaud Y., Kumar R., Sharma P., Vincent C., Pottakkal J., Berthier E., Ramanathan A., Hasnain S., Chevallier P. Four years of mass balance on Chhota Shigri Glacier, Himachal Pradesh, India, a new benchmark glacier in the western Himalaya. // *Journal of Glaciology*, 2007, № 53 (183), c.603-611.
40. 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*, 2007, №27, c. 53– 60.
41. Whitehead K., Hugenholtz CH. Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 1: a review of progress and challenges. // *J. Unmanned Veh Syst*, 2014, № 2, c.69–85.

Ресурсы сети интернет:

1. <http://www.agisoft.com> – документация к программному обеспечению Agisoft Photoscan
2. <http://cddis.gsfc.nasa.gov> – точные эфемериды спутников группировки ГЛОНАСС
3. <http://www.ctie.monash.edu.au> – подробная история развития беспилотных технологий (Remote piloted aerial vehicles: An anthology)
4. <http://igscb.jpl.nasa.gov> – точные эфемериды спутников группировки GPS
5. <http://itrf.ensg.ign.fr/> - общая информация по сети станций ITRF
6. <http://www.tectonics.caltech.edu> – документация к программному обеспечению COSI-CORR
7. <http://sopac.ucsd.edu> – данные геодезических наблюдений на станциях сети ITRF
8. <http://sopac.ucsd.edu> – уравненные координаты станций сети ITRF

Приложение 1. Технические характеристики комплекса Геоскан 101.

Наименование	Геоскан 101
Тип БВС	самолётный
Взлёт/посадка	с катапульты / на парашюте,
Тип двигателя	электрический
Продолжительность полета	до 1 часа
Максимальная протяжённость маршрута	60 км
Площадь участка съемки за 1 полёт (зависит от требуемого масштаба)	3–8 км.кв.
Рекомендуемая допустимая скорость ветра	до 10 м/с
Максимально допустимая скорость ветра	до 15 м/с
Скорость полёта	54-108 км/ч

Максимальная влётная масса	2,3 кг
Максимальная масса полезной нагрузки	0,5 кг
Габаритные размеры БЛА	Размах крыльев 1,3м
Минимально безопасная высота полета	100 м
Максимальная высота полёта	4000 метров
Время подготовки к взлёту	10 мин
Температура эксплуатации	От -20 до +40 °С (доп. опция от -40 до +50 °С)
Защитный транспортировочный кейс IP67 для БЛА	размер: 80x52x31см вес брутто: 20,5 кг
Чехол со складной катапультной	размер: 115x19x16см вес брутто: 7кг

Приложение 2. Отчёт об уравнивании базового пункта «Мозгулин» на сеть станций ITRF.

Результаты уравнивания

Количество итераций для правильного уравнивания: 2

Опорный коэффициент сети: 1,89

Доверит. вероятность для точности: 95%

Степеней свободы: 25

Сравнение опорных координат.

Имя точки	Δ Восток Y (М)	Δ Север X (М)
<u>NVSK</u>	-0,002	-0,005
<u>SUMK</u>	0,001	-0,015
<u>ULAB</u>	-0,010	0,002

Ограничения опорных точек.

Имя точки	Тип	Восток σ (М)	Север σ (М)	Высота σ (М)	Отметка σ (М)
<u>BADG</u>	Глобальные	Фиксированное	Фиксированное	Фиксированное	
<u>NVSK</u>	Глобальные			Фиксированное	
<u>SUMK</u>	Глобальные			Фиксированное	
<u>URUM</u>	Глобальные	Фиксированное	Фиксированное	Фиксированное	
Фиксированное = 0,000001(М)					

Уравненные плоские координаты.

Имя точки	Восточное указание (М)	Восточное указание Ошибка (М)	Север X (М)	Север X Ошибка (М)
<u>BADG</u>	1548220,885		5846051,403	
<u>mozgulin</u>	568760,454	0,003	5444542,403	0,003

<u>NVSK</u>	258292,078	0,004	6083550,745	0,005
<u>SUMK</u>	539036,889	0,007	4977924,760	0,004
<u>ULAB</u>	1996086,664	0,004	5499300,484	0,003
<u>URUM</u>	548313,304		4850717,929	

Уравненные геодезические координаты.

Имя точки	Широта	Долгота	Высота (М)
<u>BADG</u>	X51°46'10,93693"	Y102°14'05,95506"	811,425
<u>mozgulin</u>	X49°08'59,46931"	Y87°56'34,53614"	3045,222
<u>NVSK</u>	X54°50'26,19975"	Y83°14'07,61511"	123,106
<u>SUMK</u>	X44°12'29,27382"	Y73°59'49,59928"	1012,151
<u>ULAB</u>	X47°51'54,24194"	Y107°03'08,38518"	1575,558
<u>URUM</u>	X43°48'28,61949"	Y87°36'02,41261"	858,872

Компоненты эллипса ошибок.

Имя точки	Большая полуось (М)	Малая полуось (М)	Азимут
<u>mozgulin</u>	0,004	0,004	36°
<u>NVSK</u>	0,007	0,005	10°
<u>SUMK</u>	0,008	0,005	94°
<u>ULAB</u>	0,005	0,004	122°

Уравненные GPS измерения.

Имя измерения		Измерение	Апостериорная ошибка	Невязка	Станд. Невязка
<u>SUMK --></u> <u>mozgulin (PV33)</u>	Аз.	57°47'30"	0,001 сек	0,001 сек	2,504
	ΔНт.	2033,076 м	0,012 м	-0,011 м	-1,285
	Эллип. расст.	1197578,459 м	0,005 м	0,007 м	2,422
<u>BADG --></u> <u>ULAB (PV19)</u>	Аз.	139°32'12"	0,001 сек	-0,001 сек	-2,164

	ΔНт.	764,140 м	0,009 м	-0,001 м	-0,215
	Эллип. расст.	555447,447 м	0,003 м	-0,001 м	-0,768
<u>URUM --> mozgulin (PV6)</u>	Аз.	2°24'40"	0,001 сек	-0,001 сек	-1,640
	ΔНт.	2186,344 м	0,011 м	0,005 м	0,638
	Эллип. расст.	594388,845 м	0,003 м	0,002 м	0,636
<u>NVSK --> SUMK (PV32)</u>	Аз.	213°06'47"	0,001 сек	-0,001 сек	-1,274
	ΔНт.	889,048 м	0,008 м	0,002 м	0,405
	Эллип. расст.	1355954,721 м	0,005 м	-0,010 м	-1,571
<u>URUM --> ULAB (PV4)</u>	Аз.	66°31'35"	0,000 сек	0,000 сек	-0,258
	ΔНт.	716,690 м	0,011 м	-0,001 м	0,119
	Эллип. расст.	1572201,173 м	0,006 м	-0,009 м	-1,531
<u>URUM --> NVSK (PV5)</u>	Аз.	347°08'07"	0,001 сек	0,000 сек	1,464
	ΔНт.	-735,781 м	0,011 м	-0,004 м	-0,594

	Эллип. расст.	1266738,737 м	0,003 м	0,001 м	0,262
<u>URUM --></u> <u>SUMK (PV30)</u>	Аз.	277°03'36"	0,001 сек	0,000 сек	-1,440
	ΔНт.	153,268 м	0,008 м	0,002 м	0,352
	Эллип. расст.	1090600,656 м	0,005 м	-0,003 м	-1,314
<u>NVSK --></u> <u>ULAB (PV2)</u>	Аз.	105°21'54"	0,000 сек	0,001 сек	1,383
	ΔНт.	1452,472 м	0,012 м	0,005 м	0,416
	Эллип. расст.	1819768,485 м	0,005 м	-0,002 м	-0,300
<u>NVSK --></u> <u>mozgulin (PV1)</u>	Аз.	151°04'11"	0,001 сек	0,000 сек	-0,866
	ΔНт.	2922,125 м	0,012 м	0,003 м	0,289
	Эллип. расст.	710587,026 м	0,004 м	-0,006 м	-1,363
<u>NVSK --></u> <u>BADG (PV20)</u>	Аз.	97°19'18"	0,001 сек	0,000 сек	-0,923
	ΔНт.	688,332 м	0,009 м	-0,008 м	-1,054
	Эллип. расст.	1307313,671 м	0,005 м	0,005 м	1,240

<u>ULAB --></u> <u>mozgulin (PV3)</u>	Аз.	282°54'38"	0,000 сек	0,000 сек	-0,193
	ΔНт.	1469,652 м	0,013 м	-0,009 м	-0,607
	Эллип. расст.	1415403,092 м	0,006 м	0,003 м	0,595
<u>URUM --></u> <u>BADG (PV18)</u>	Аз.	45°48'55"	0,001 сек	0,000 сек	-0,030
	ΔНт.	-47,449 м	0,008 м	0,004 м	0,562
	Эллип. расст.	1404793,195 м	0,005 м	0,001 м	0,255
<u>BADG --></u> <u>mozgulin (PV21)</u>	Аз.	259°34'58"	0,001 сек	0,000 сек	-0,509
	ΔНт.	2233,792 м	0,012 м	-0,001 м	-0,056
	Эллип. расст.	1053921,225 м	0,005 м	0,000 м	-0,062

Приложение 3. Отчёт об уравнивании сети базового и контрольных пунктов в первой части экспедиции.

Результаты уравнивания

Количество итераций для правильного уравнивания: 2

Опорный коэффициент сети: 1,83

Доверит. вероятность для точности: 95%

Степеней свободы: 15

Сравнение опорных координат

Имя точки	Δ Восточное указание (М)	Δ Север X (М)
<u>NVSK</u>	0,000	0,010
<u>ULAB</u>	0,024	-0,013

Ограничения опорных точек

Имя точки	Тип	Восток σ (М)	Север σ (М)	Высота σ (М)	Отметка σ (М)
<u>mozgulin</u>	Глобальные	Фиксированное	Фиксированное	Фиксированное	

Фиксированное = 0,000001(М)

Уравненные плоские координаты

Имя точки	Восточное указание (М)	Восточное указание Ошибка (М)	Север X (М)	Север X Ошибка (М)
<u>aragorn</u>	568718,911	0,001	5444997,458	0,002
<u>potentilla</u>	569164,136	0,002	5444723,860	0,003
<u>mozgulin</u>	568760,453		5444542,400	
<u>NVSK</u>	258292,077	0,005	6083550,731	0,006
<u>ULAB</u>	1996086,630	0,010	5499300,499	0,004

Уравненные геодезические координаты

Имя точки	Широта	Долгота	Высота (М)
<u>aragorn</u>	X49°09'14,22027"	Y87°56'32,76506"	3167,919
<u>potentilla</u>	X49°09'05,18151"	Y87°56'54,57425"	3147,835
<u>mozgulin</u>	X49°08'59,46923"	Y87°56'34,53607"	3045,223
<u>NVSK</u>	X54°50'26,19928"	Y83°14'07,61506"	123,196

<u>ULAB</u>	X47°51'54,24268"	Y107°03'08,38387"	1575,657
-------------	------------------	-------------------	----------

Компоненты эллипса ошибок

Имя точки	Большая полуось (М)	Малая полуось (М)	Азимут
<u>aragorn</u>	0,003	0,002	175°
<u>potentilla</u>	0,003	0,003	168°
<u>NVSK</u>	0,008	0,005	147°
<u>ULAB</u>	0,013	0,005	90°

Уравненные GPS измерения

Имя измерения		Измерение	Апостериорная ошибка	Невязка	Станд. Невязка
<u>mozgulin --> NVSK (PV11)</u>	Аз.	334°47'03"	0,001 сек	-0,001 сек	-0,256
	ΔНt.	-2922,027 м	0,023 м	0,040 м	2,081
	Эллип. расст.	710587,019 м	0,005 м	0,000 м	-0,018
<u>mozgulin --> aragorn (PV1)</u>	Аз.	355°29'50"	0,624 сек	0,018 сек	0,563

	ΔНт.	122,696 м	0,004 м	0,000 м	-1,979
	Эллип. расст.	457,106 м	0,002 м	-0,001 м	-1,870
<u>NVSK --> aragorn (PV10)</u>	Аз.	151°03'24"	0,001 сек	0,000 сек	-1,196
	ΔНт.	3044,723 м	0,023 м	0,026 м	1,651
	Эллип. расст.	710159,477 м	0,006 м	-0,004 м	-0,598
<u>ULAB --> potentilla (PV13)</u>	Аз.	282°55'02"	0,001 сек	0,005 сек	1,346
	ΔНт.	1572,179 м	0,026 м	-0,078 м	-1,036
	Эллип. расст.	1414992,655 м	0,010 м	0,024 м	1,110
<u>ULAB --> aragorn (PV14)</u>	Аз.	282°55'45"	0,001 сек	0,001 сек	0,658
	ΔНт.	1592,262 м	0,025 м	0,042 м	1,273
	Эллип. расст.	1415427,383 м	0,010 м	-0,016 м	-0,574
<u>mozgulin --> potentilla (PV2)</u>	Аз.	66°30'32"	1,191 сек	0,061 сек	1,001
	ΔНт.	102,612 м	0,005 м	0,000 м	-0,290

	Эллип. расст.	442,744 м	0,002 м	0,000 м	-0,542
<u>NVSK --> ULAB (PV12)</u>	Аз.	105°21'54"	0,001 сек	0,000 сек	-0,455
	ΔНт.	1452,460 м	0,022 м	0,006 м	0,830
	Эллип. расст.	1819768,458 м	0,007 м	-0,001 м	-0,613
<u>NVSK --> potentilla (PV9)</u>	Аз.	151°02'02"	0,001 сек	0,012 сек	0,713
	ΔНт.	3024,639 м	0,023 м	-0,224 м	-0,816
	Эллип. расст.	710600,480 м	0,007 м	-0,114 м	-0,684
<u>mozgulin --> ULAB (PV15)</u>	Аз.	88°32'15"	0,001 сек	0,000 сек	-0,286
	ΔНт.	-1469,566 м	0,026 м	0,006 м	0,382
	Эллип. расст.	1415403,067 м	0,009 м	-0,008 м	-0,560

Приложение 4. Отчёт об уравнивании сети базового и контрольных пунктов во второй части экспедиции.

Результаты уравнивания

Количество итераций для правильного уравнивания: 2

Опорный коэффициент сети: 0,87

Доверит. вероятность для точности: 95%

Степеней свободы: 3

Ограничения опорных точек

Имя точки	Тип	Восток σ (М)	Север σ (М)	Высота σ (М)	Отметка σ (М)
<u>mozgulin</u>	Глобальные	Фиксированное	Фиксированное	Фиксированное	
Фиксированное = 0,000001(М)					

Уравненные плоские координаты

Имя точки	Восточное указание (М)	Восточное указание Ошибка (М)	Север X (М)	Север X Ошибка (М)
<u>aragorn</u>	568718,926	0,001	5444997,459	0,001

<u>mozgulin</u>	568760,462		5444542,402	
<u>potentilla</u>	569164,140	0,001	5444723,864	0,001

Уравненные геодезические координаты

Имя точки	Широта	Долгота	Высота (М)
<u>aragorn</u>	X49°09'14,22032"	Y87°56'32,76581"	3167,835
<u>mozgulin</u>	X49°08'59,46929"	Y87°56'34,53656"	3045,207
<u>potentilla</u>	X49°09'05,18165"	Y87°56'54,57446"	3147,749

Компоненты эллипса ошибок

Имя точки	Большая полуось (М)	Малая полуось (М)	Азимут
<u>aragorn</u>	0,002	0,001	19°
<u>potentilla</u>	0,002	0,001	15°

Уравненные GPS измерения

Имя измерения		Измерение	Апостериорная ошибка	Невязка	Станд. Невязка
<u>potentilla --> aragorn (PV4)</u>	Аз.	302°17'21"	0,571 сек	-0,146 сек	-0,591
	ΔНt.	20,087 м	0,002 м	-0,001 м	-1,200
	Эллип. расст.	522,739 м	0,001 м	0,000 м	-1,377
<u>mozgulin --> potentilla (PV6)</u>	Аз.	66°30'30"	0,498 сек	0,199 сек	1,315
	ΔНt.	102,542 м	0,002 м	-0,001 м	-1,138
	Эллип. расст.	442,739 м	0,001 м	0,000 м	0,059
<u>mozgulin --> aragorn (PV5)</u>	Аз.	355°29'53"	0,404 сек	-0,034 сек	-0,231
	ΔНt.	122,628 м	0,002 м	0,001 м	0,777
	Эллип. расст.	457,105 м	0,001 м	0,000 м	0,580