

УДК 511.311.21.(234.9)

ГЛЯЦИОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ ЛЕДНИКА КОЛКА В 2002–2014 гг.

Н.В. Коваленко¹, Д.А. Петраков², А.А. Алейников³,
К.А. Аристов⁴, Е.С. Бойко⁵, В.Н. Дробышев⁶, С.С. Черноморец⁷

Абстракт. В августе 2014 г. проведены очередные съемки местности в цирке ледника Колка. В состав наземных работ входили топографическая съемка масштаба 1:5 000, цифровая стереосъемка калиброванными фотокамерами и цифровая стереосъемка с беспилотного летательного аппарата, а также космическая стереосъемка сенсором SPOT-6. Проведено сопоставление и анализ преимуществ и недостатков различных методов съемки местности в горных условиях. Совместное использование традиционных и инновационных методов съемки местности позволяет максимально точно закартировать современную поверхность ледника, оценить текущие темпы восстановления ледника Колка и уточнить прогноз событий, подобных катастрофе 2002 г. Установлено, что в 2004–2014 гг. на фоне неблагоприятных для кавказского оледенения климатических условий в цирке ледника Колка накопилось около 30 млн м³ льда, а фронт новообразованного ледника продвинулся на 800 м. Это единственный на Кавказе случай значительного наступания ледников в XXI в.

Ключевые слова: горные ледники, гляциальная катастрофа, опасные процессы, дистанционные методы, прогноз.

Введение. В сентябре 2002 г. в Северной Осетии в бассейне реки Геналдон произошла масштабная гляциальная катастрофа. Более 100 млн м³ льда, воды и камней были сброшены из цирка ледника Колка в Кармадонскую котловину и преодолели почти 20 км за 5,5 минуты. Теснина Скалистого хребта остановила ледяную массу, но порожденный ею дистальный селевой поток прошел еще 17 км [9] и не дошел всего 2 км до селения Гизель с населением более 7 000 чел. [7]. Это событие стало полной неожиданностью для населения и органов власти. По последним оценкам, погибли 135 чел., а экономический ущерб составил 1 385 млн руб. [2].

Большинство исследователей подчеркивает комплексную природу катастрофы, определенную роль в зарождении которой сыграли как эндогенные, так и экзогенные факторы [5]. Вопрос о возможности, сроках повторения и масштабах подобного события не решен по сей день. Пороговым фактором при реализации катастрофического сценария, судя по всему, является объем ледника Колка. Такую точку зрения разделяют В.М. Котляков с соавторами [4], В.Л. Познанин [8] и др. Для прогнозирования вероятных гляциальных катастроф в долине р. Геналдон требуется проводить регулярный мониторинг ледника Колка. Гляциологические наблюдения на леднике Колка после катастрофы 2002 г. проводились рядом исследователей [1; 3; 10], но большинство работ носило, по сути, полуквантитативный характер. Первые оценки скорости накопления

льда в цирке ледника Колка, основанные на сопоставлении материалов разновременных (2004 и 2009 гг.) топографических съемок масштаба 1 : 5 000, убедительно свидетельствовали о аномально быстром восстановлении ледника [7]. В результате было решено проводить инструментальную съемку Колки с интервалом в 5 лет, что соответствует стандартным требованиям к пере­съемке ледников. В будущем по мере роста вероятности катастрофического сценария или снижения темпов восстановления ледника частота инструментальных наблюдений может быть изменена.

Целью данной работы стала инструментальная оценка темпов изменения объема Колки в 2004–2014 гг. на основе сопоставления данных разновременных топографических съемок ледника, а также апробация наиболее современных, но мало опробованных методов гляциологического мониторинга – воздушных, наземных и космических стереосъемок, анализ их точности и возможностей использования в будущем.

ТОПОГРАФИЧЕСКИЕ СЪЕМКИ

Первая топографическая съемка цирка ледника Колка после катастрофы 2002 г. проводилась В.Н. Дробышевым, В.В. Макликовым и Ш.С. Муратовым в августе 2004 г. теодолитом 4Т15П и безотражательным лазерным дальномером ЛП-1. Семь опорных точек планово-высотного

¹ Коваленко Николай Владимирович – к. г. н., ст. н. с., Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (kovalko_n@mail.ru).

² Петраков Дмитрий Александрович – к. г. н., ст. н. с., Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова (dpetrakov@gmail.com).

³ Алейников Александр Анатольевич – ... Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, ИТЦ «СканЭкс», г. Москва.

⁴ Аристов Константин Александрович – к. г. н., н. с., Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова, г. Москва.

⁵ Бойко Евгений Сергеевич – к. г. н., Кубанский государственный университет, Географический факультет, ЗАО «СевКавТИ-СИЗ», г. Краснодар.

⁶ Дробышев Валерий Николаевич – сотрудник Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ.

⁷ Черноморец Сергей Семенович – к. г. н., доцент, ст. н. с., Географический факультет МГУ имени М.В. Ломоносова.

обоснования (далее – ПВО) располагались на орографически левой береговой морене ледника Колка. Координаты точек определялись методом триангуляции с привязкой к трем пунктам государственной геодезической сети: Чижит-хох, Майли-раг и Реком-раг. Передача высот проводилась посредством тригонометрического нивелирования в двух направлениях. При расчетах перепадов высот и горизонтального проложения линий учитывались кривизна Земли и рефракция. По завершении данных работ была выполнена топографическая съемка ледникового цирка в масштабе 1 : 5 000, в ходе которой были определены координаты более 1 000 съемочных точек путем проложения съемочных планово-высотных ходов с пунктов ПВО.

Последующие топографические съемки цирка ледника Колка проводились в августе 2009 и 2014 гг. К.А. Аристовым, В.Н. Дробышевым, Д.А. Петраковым и Н.В. Коваленко тем же оборудованием. Для съемки масштаба 1 : 5 000 были использованы опорные точки планово-высотного обоснования, заложенные в 2004 г. Повторные определения координат точек ПВО осуществлялись с применением глобальных навигационных спутниковых систем «ГЛОНАСС и GPS» двухчастотными GPS/ГЛОНАСС-приемниками JAVAD в режиме «быстрая статика». При проведении топографических съемок 2009 и 2014 гг. количество съемочных точек было сокращено, поскольку не требовалось повторять измерения для относительно стабильных скальных поверхностей.

По результатам топографических съемок 2004, 2009, 2014 гг. в программе Surfer составлены карты рельефа ледниковой поверхности и скального обрамления масштаба 1:10 000 в единой системе координат и высот, а также цифровые модели рельефа (ЦМР) местности. Последующее наложение ЦМР и основанные на нем математические вычисления позволили оценить изменения высоты ледниковой поверхности и объема льда в цирке ледника Колка с 2004 по 2014 г.

СТЕРЕОСЪЕМКА С БОРТА БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА (БПЛА)

В августе 2014 г. помимо вышеупомянутых наземных инструментальных топографических работ была апробирована инновационная методика цифровой стереоскопической фотосъемки ледника с БПЛА (рис. 1). Подобные работы выполнялись на ледниках Шпицбергена [12] и Монголии [11].

Полевой этап работ заключался в создании наземного съемочного геодезического обоснования и выполнении стереофотосъемки. В качестве исходных пунктов при создании и увязке



Рис. 1. Малый квадрокоптер DJI Phantom с установленной камерой для съемки

данных геодезического обеспечения аэросъемки использованы пункты ПВО, заложение которых выполнялось при топографических работах 2004 г. В ходе работ по созданию ПВО участка ледника Колка произведены спутниковые измерения в режиме «быстрая статика» с применением двухчастотных GPS/ГЛОНАСС-приемников JAVAD. Опознавательные знаки были нанесены на камни поверхностной морены и хорошо читаются на снимках (рис. 2). Всего было замаркировано и измерено 22 опознака, равномерно распределенных по изучаемой территории, из них удалось распознать и использовать при построении модели 15. При выборе местоположения закрепляемых опознавательных знаков мы стремились обеспечить равномерное их распределение по изучаемой территории. Предпочтение отдавалось объектам, хорошо идентифицируемым на снимках, таким как крупные, отдельно стоящие валуны поверхностной и боковой морены. Заложение опознаков произведено с целью обеспечения сопряжения системы координат производимых наблюдений с единой системой координат выполняемых работ, ортотрансформирования отдельных снимков и объединения их в единую мозаику.

Стереофотосъемка выполнялась камерами Canon с помощью малого БПЛА. Вес летательного аппарата с камерой составляет 1,3 кг. Съемка выполнялась по определенным маршрутам,

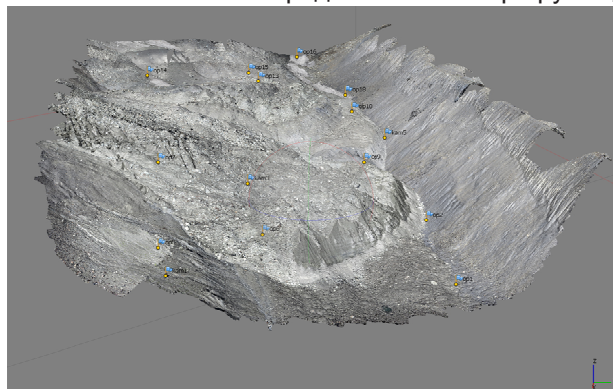


Рис. 2. Схема опознаков на трехмерной модели поверхности ледника

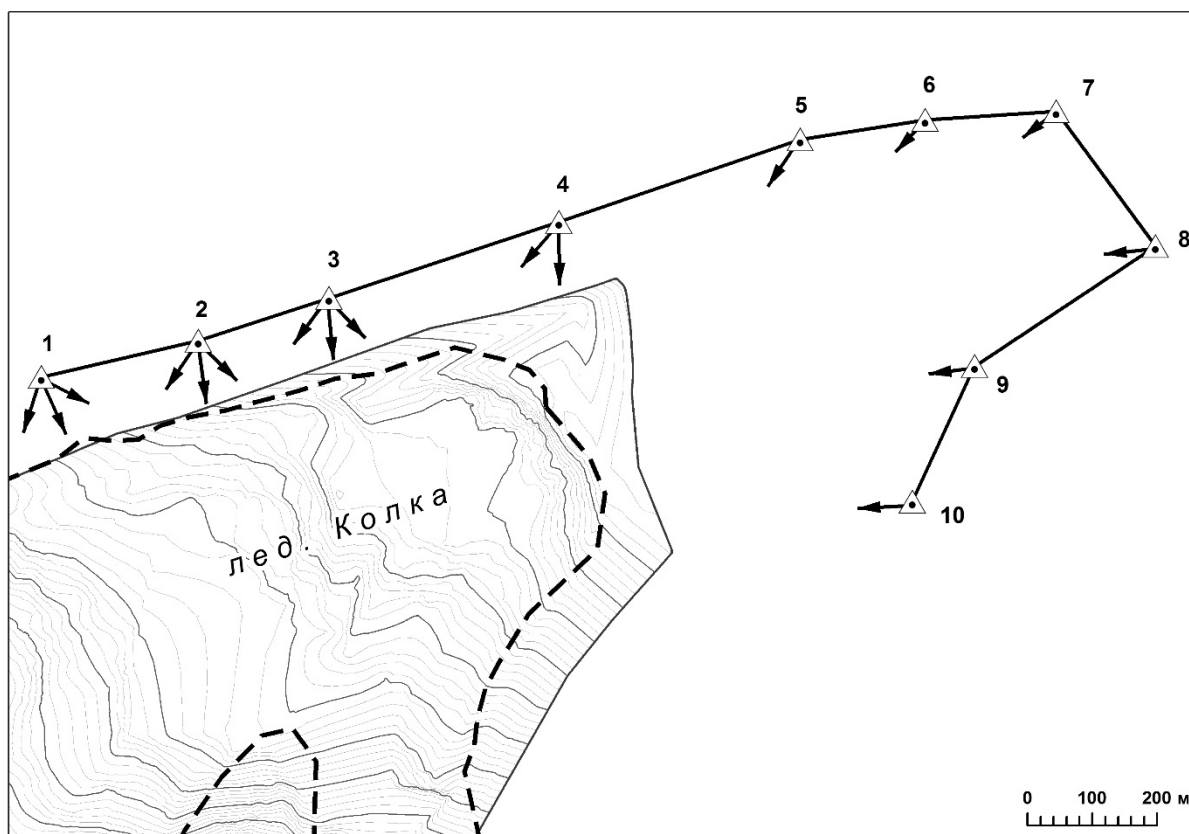


Рис. 3. Положение точек наземной стереосъемки. Стрелками показано направление фотографирования

всего были отсняты 11 маршрутов и получено 466 фотографий. В ходе стереофото съемки получены снимки местности с высоты 70–200 м с продольным перекрытием 65–75 % и поперечным перекрытием не менее 30 %. Пространственное разрешение снимков составило 3,5 см.

Камеральная обработка стереофото съемки ледника с БПЛА на первоначальном этапе выполнялась в программном продукте Agisoft PhotoScan. ПО PhotoScan позволяет создавать цифровые модели рельефа, ортофотопланы и текстурированные 3D модели объекта. Эти цели достигаются посредством четырех этапов обработки, в ходе которых осуществляется сбор цифровых данных о положении и ориентации съемочных камер, создание плотного облака точек, описывающих положение поверхности, и, на его основании, построение полигональной модели объекта, дальнейшее текстурирование данных и оформление предварительных ортофотопланов исследуемой местности.

По завершении предварительной обработки результатов съемки в ПО PhotoScan дальнейшая обработка проводилась в программном комплексе TerraScan (Terra Solid) и далее в ArcGIS. Полученные облака точек были классифицированы и подверглись фильтрации и оптимизации. На первом этапе количество пространственных

точек плотной модели составило 249 млн. Плотность описания модели равнялась значениям до 350 точек измерений на 1 м². После фильтрации ложных точек и выбора оптимального количества было сформировано облако из 4 824 476 точек, которое подверглось дальнейшей фильтрации и классификации. К классу «земля» были отнесены 3 714 316 точек, на основе которых были построены цифровые модели рельефа (ЦМР) местности с высотой сечения рельефа 1, 5 и 10 м.

НАЗЕМНАЯ СТЕРЕОСЪЕМКА КАЛИБРОВАННОЙ ЦИФРОВОЙ КАМЕРОЙ

Наземная стереосъемка – это комплекс работ, связанных с фотографированием объектов земной поверхности с наземных базисов, составлением планов местности по стереопарам полученных фотоснимков и определением пространственных координат заданных точек [6].

При съемке ледника Колка использовались цифровые зеркальные фотоаппараты Nikon D6000 и Canon 450D с объективами 24 и 70 мм соответственно. Съемка производилась с точек на поверхности левой боковой морены, остаточных обломочных пород в днище и на правом борту цирка ледника Колка (рис. 3).

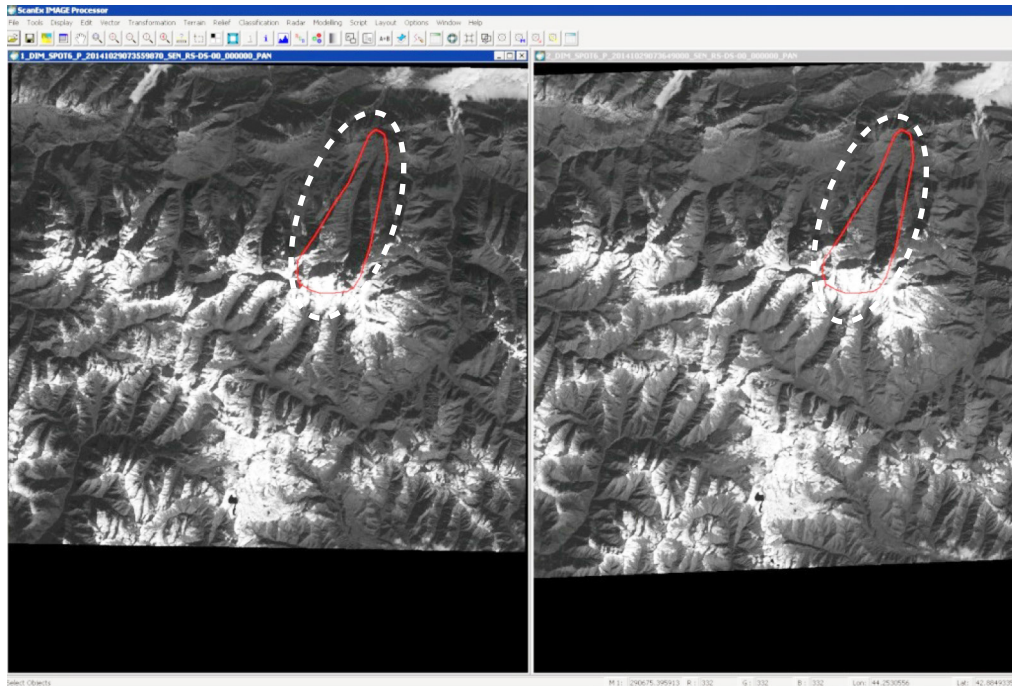


Рис. 4. Стереопара космического спутника SPOT-6 от 29 октября 2014 г., пространственное разрешение 1,6 м; красным контуром обозначен район Геналдонской катастрофы 2002 г.

Выбор точек был обусловлен необходимостью съемки ледника с разных ракурсов, минимизации «мертвых зон», а также пешей доступностью (т. е. возможностью добраться без использования альп. снаряжения). Координаты точек фотосъемки измерялись с помощью GPS/ГЛОНАСС-приемников JAVAD в дифференциальном режиме. На каждой точке фотографирования выполнялось несколько снимков с перекрытием не менее 20 %.

Для обработки стереопар фотоснимков и построения облака точек был использован программный комплекс Agisoft PhotoScan. В идеале процесс обработки фотоснимков состоит из нескольких этапов: загрузка, поиск соответствий и составление облака точек, построение плотного облака точек, построение модели, текстурирование модели, экспорт ортофотоплана или модели. Однако, ввиду достаточно вытянутой формы ледника и сложности его рельефа, автоматическая обработка всех фотоснимков в едином массиве не представлялась возможной. Для обработки фотоснимков их пришлось сначала разделить на блоки, т. е. выделить фотографии, изображающие одни и те же формы рельефа. По возможности в блок добавлялось три и более фотоснимков. Поскольку съемка производилась с нескольких точек, целесообразным было сгруппировать снимки по точкам съемки.

После загрузки фотоснимков в проект для каждого фотоснимка задавались координаты его местоположения, определенные при производ-

стве спутниковых измерений двухчастотными GPS/ГЛОНАСС-приемниками.

Калибровка камеры производилась в процессе первичной обработки блока. Программное обеспечение позволяет определять не только координаты главной точки снимка и размер пикселя, но также параметры дисторсии объектива. Однако, как показала практика, полученные параметры имеют невысокую точность и варьируются от одного блока к другому, поэтому в программе предусмотрена загрузка уточненных параметров калибровки камеры.

После построения отдельных блоков фотоснимков, покрывающих поверхность ледника, проводилось их выравнивание и объединение в единую модель. Этот процесс может проводиться по соответствиям на фотографиях, т. е. в автоматическом режиме, либо по координатам камер или маркеров. Наиболее точным является способ выравнивания по маркерам, но он требует наличия не менее трех одинаковых маркеров на выравниваемых блоках, что зачастую трудно выполнимо. В связи с этим выравнивание производилось по соответствиям. Полученная после выравнивания единая модель ледника содержит 34 фотоснимка, облако из 216 235 точек.

По облаку точек построена TIN-модель. Полигоны модели, выходящие за область интереса, удалены. На полученную модель наложены фотоснимки и получены т.н. текстуры, которые позволяют создать вид модели, близкий к естественному.

ПОСТРОЕНИЕ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ПО СТЕРЕОПАРАМ СО СПУТНИКА SPOT-6

Стереопары космических снимков высокого разрешения широко используются для составления ЦМР местности. По заказу коллектива авторов 29 октября 2014 г. спутником SPOT-6 была проведена прицельная стереосъемка зоны катастрофы разрешением 1,6 м/пиксель. Стереопара космических снимков SPOT-6 (рис. 4) состоит из «левого» снимка, снятого с наименьшим углом наклона вдоль траектории от надира, и «правого», снятого под большим углом. Для данных снимков «левый снимок» снят под углом 11 градусов, «правый снимок» – под углом 17 градусов.

Для создания ЦМР в абсолютных значениях высот использовалась базисная ЦМР SRTM-90, построенная благодаря интерферометрической обработке данных SIR-C в 2000 году. Она распространяется свободно и представляет собой прямоугольные фрагменты охватом 1 на 1 градус.

Построение цифровой модели рельефа осуществлялось в программе обработки данных дистанционного зондирования Земли – Scanex Image Processor. Процесс построения ЦМР включал следующие шаги: эпиполярное трансформирование, создание анаглифического 3D изображения, собственно построение ЦМР и ее редактирование. В ходе редактирования выполнялась фильтрация, сглаживание, интерполяция «ошибочных» значений, ортокоррекция по строгой модели, то есть с восстановлением орбитальных параметров спутника в момент съемки. Опорные точки при этом были выставлены в автоматическом режиме. В результате были получены ортотрансформированный космический снимок и цифровая модель местности, взаимосвязанные между собой.

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Сопоставление различных методов съемки

1. Топографическая съемка. При построении цифровых моделей рельефа по данным топографической съемки использовался метод тригонометрической интерполяции, при котором погрешность интерполяции высотных отметок не превышала 5 м.

2. Стереосъемка с БПЛА. Для оценки точности полученных данных проанализированы



Рис. 5. Профиль 2-2

источники возможных ошибок и погрешностей. Их можно разделить на погрешности расчетов и моделирования. По материалам поверочных расчетов, погрешности ЦМР, составленной по результатам стереофотосъемки относительно точек опорной съемочной сети (опознавательных знаков), составляют:

средние погрешности:

по X = 0,048 м; по Y = 0,165 м; по Z = 0,2158.

Общая ошибка не превышает 0,276 м;

максимальные:

по X = 0,090 м; по Y = -0,310 м; по Z = 0,63.

Полученные результаты соответствуют точности построения ортофотопланов масштаба 1 : 500 с высотой сечения рельефа 1 м, что для высокогорной труднодоступной местности является высокоточной съемкой.

3. Наземная стереосъемка. Общая ошибка в положении маркеров по результатам произведенных расчетов составляет 14,6 м.

4. Космическая стереосъемка. Пространственное разрешение космического спутника SPOT-6, по которому делалась модель – 1,6 м. Пространственное разрешение модели около 5 м. Точность по вертикали, если использовать только орбитальные параметры и SRTM, составляет 5–10 м. При использовании контрольных точек точность можно повысить до 2 м.

Оценка погрешностей

Из представленных выше значений погрешностей видно, что наибольшей точностью обладают топографическая съемка и стереосъемка с борта БПЛА. Сопоставление поверхностей, полученных этими методами, было выполнено путем построения профилей на основе двух ЦМР: созданной по результатам стереосъемки с борта БПЛА и по результатам наземных топографических измерений.

Как видно из представленного графиче-

ского материала, сходимость пространственных данных, полученных обозначенными методами в ряде случаев, достаточно велика. При детальном рассмотрении представленных профилей и изогипс (рис. 5, 6) становится очевидным, что данные топографической съемки масштаба 1 : 5 000 в значительной степени уступают материалам воздушной стереофотосъемки в своей детальности: в нашем случае разрешение фотоснимков 3,5 см/пиксель при наличии 15 опознаков позволяет строить план масштаба 1 : 500. Участки с существенными расхождениями значений высот чаще всего приурочены к зонам, где данные наземных инструментальных наблюдений интерполированы.

Разница в масштабах съемки приводит к различной детальности горизонталей (рис. 7). Очевидно, стереосъемка с борта БПЛА способна отобразить рельеф поверхности ледника гораздо подробнее. С другой стороны, взаимная компенсация положительных и отрицательных ошибок при топографической съемке не приводит к существенным погрешностям при определении объемов льда, накапливающихся в цирке Колки.

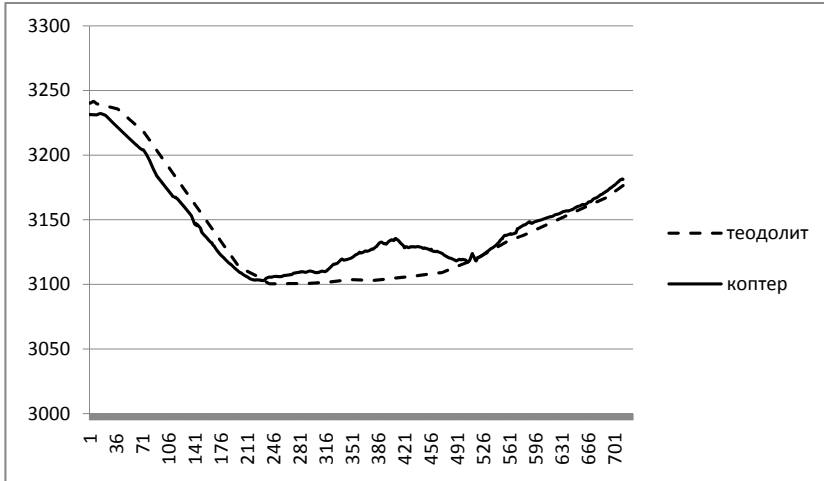


Рис. 6. Профиль 3-3

ИЗМЕНЕНИЯ В ЦИРКЕ ЛЕДНИКА КОЛКА В 2004–2014 ГГ.

В результате сопоставления разновременных топографических карт масштаба 1 : 10 000 проведен анализ изменений, произошедших с ледником Колка в 2004–2014 гг. Ранее [7] было установлено, что в 2004–2009 гг. в цирке ледника Колка накопилось 16,3 млн м³ материала, преимущественно льда. В 2009–2014 гг. было аккумулировано еще 17,6 млн м³ льда. Темпов замедления восстановления ледника пока не

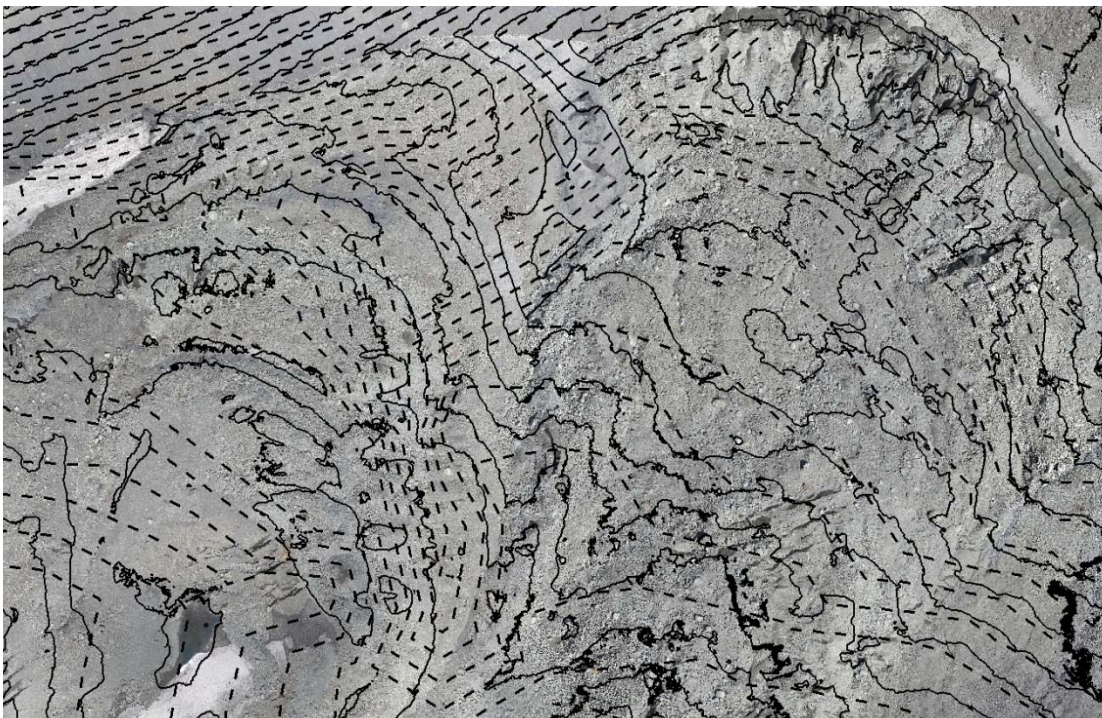


Рис. 7. Сопоставление изогипс, полученных путем топографической съемки (пунктирная линия) и съемки с борта БПЛА (сплошная линия)

произошло. Фронт ледника Колка продвинулся на 800 м. Это единственный случай быстрого наступления ледника на Кавказе в начале XXI века. Аномально высокие темпы накопления льда в цирке Колки резко контрастируют с неблагоприятными для кавказского оледенения современными условиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе полевых работ августа 2014 г. четырьмя различными методами были получены цифровые модели рельефа цирка ледника Колка. Наибольшую точность, соответствующую масштабу 1 : 500, продемонстрировала стереосъемка с борта БПЛА. Точность топографической съемки соответствовала масштабу 1 : 10 000, а точность наземной и космической стереосъемки оказалась ниже. Все полученные материалы сопоставимы. Обнаруженные расхождения в рисунке изогипс и значениях абсолютной высоты связаны с различным масштабом съемки, отличиями в методах интерполяции в системах координат (для космической съемки).

Опыт наземной стереосъемки ледника Колка показал, что для картографирования в горной местности вполне возможно использовать бытовую цифровую фотокамеру с известными параметрами калибровки. Перспективность этого метода в горах очевидна [6], а точность можно увеличивать за счет развития сети планово-высотного обоснования.

Опыт применения БПЛА при проведении стереофотосъемки ледника Колка, безусловно, демонстрирует высокую точность и потенциал развития данного направления. Особенно ценным может быть вклад от применения подобных систем в исследования и мониторинг горных ледников, лежащих вне зон пешей доступности. К недостаткам данного метода относится зависимость съемки от ветрового режима, т. к. при средних и высоких скоростях ветра велик риск падения БПЛА.

Применение метода космической стереосъемки также представляется перспективным при условии полевого геодезического обеспечения

съемочных работ. Следует отметить, что в данном исследовании мы сознательно не использовали наземные данные при составлении ЦМР по данным со спутника SPOT-6.

Традиционная топографическая съемка была и остается хоть и трудозатратным, но достаточно надежным источником данных о посткатастрофических изменениях ледника Колка. В ходе сопоставления топографических карт 2009 и 2014 гг. установлено, что объем ледника Колка за 5 лет увеличился еще на 17,6 млн м³ льда. Быстрое восстановление ледника продолжается, несмотря на неблагоприятную в целом для кавказского оледенения климатическую ситуацию. При сохранении современных темпов накопления льда на Колке ледник сможет практически восстановить предкатастрофический объем уже к 2025–2030 гг.

Стоит отметить, что применение описанных новых методов мониторинга изменений высоты ледниковой поверхности в областях развития горного оледенения открывает широкие, ранее недоступные горизонты перед исследователями. Детальность и достоверность ЦМР, построенных на основе стереосъемок, в перспективе может качественно превосходить результаты наземных топографических съемок, проведение которых в труднодоступной высокогорной местности сопряжено с рядом проблем. Преимущество апробированных технологий сбора данных особенно актуальны для таких ледников, как Колка, поскольку позволяют обеспечить повышение частоты выполняемых наблюдений без существенного увеличения временных затрат и оперативность получения актуальных обработанных данных о состоянии ледника.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 15-05-08694, и программы поддержки ведущих научных школ РФ, проект 335.2014.5. Стереопара космических снимков SPOT-6 была получена при помощи Геопортала МГУ им. М.В. Ломоносова. Авторы выражают благодарность директору ЗАО «СевКавТИСИЗ» И.А. Матвееву за предоставление оборудования для съемочных работ, В.Г. Адцееву, В.А. Иванову, О.Н. Рыжанову и К. Царахову за логистическую поддержку, М.Р. Мирзоеву и П.С. Штаничеву за помощь при проведении полевых работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васюков И.М., Валиев А.Л. Ледники Колка и Майли сегодня // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2010, т. 10, № 1, с. 29–33.
2. Кортиев Л.И., Кортиева В.Л., Чочиев С.В. Анализ социального, экологического и экономического ущерба от разрушений ледника Колка // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2009, т. 9, № 3, с. 41–42.
3. Котляков В.М., Рототаева О.В., Носенко Г.А., Десинов Л.В., Осокин Н.И., Чернов Р.А. Кармадонская катастрофа: что случилось и чего ждать дальше. – М.: Издательский дом «Кодекс», 2014. 184 с.
4. Котляков В.М., Рототаева О.В., Осокин Н.И. Пульсирующие ледники и ледниковая катастрофа на Северном Кавказе // Вестн. Владикавказ. науч. центра, 2004, т. 4, № 3, с. 65–71.
5. Ледник Колка: вчера, сегодня, завтра/ [отв. ред. акад. Ю.Г. Леонов, В.Б. Заалишвили]; Центр геофиз.исслед. Владикавказ. науч. центра РАН и РСО-А. – Владикавказ, 2014. 432 с.
6. Новаковский Б.А., Пермяков Р.В. Цифровая наземная стереосъемка: возможности и перспективы // Геодезия и картография, 2014, № 10, с. 37–41.
7. Петраков Д.А., Дробышев В.Н., Алейников А.А., Аристов К.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Изменения

в зоне Геналдонской гляциальной катастрофы в период 2002–2010 гг. // Криосфера Земли, 2013, т. XVII, № 1, с. 35–46.

8. Познанин В.Л. Механизмы селевых ледниковых катастроф. – М., ИМГРЭ, 2009, 182 с.

9. Поповнин В.В., Петраков Д.А., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Гляциальная катастрофа 2002 года в Северной Осетии // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 1, с. 3–17.

10. Чернов Р.А., Рототаева О.В. О развитии посткатастрофических процессов в цирке ледника Колка и долине р. Геналдон (северный склон Казбекского массива) // Лед и снег, 2010, вып. 4 (112), с. 25–29.

11. Bliakharskii D., Syromyatina M. The use of unmanned aircraft system for mapping glaciers of the Tavan Bogd mountains (northwest Mongolia). Proceedings of the Kathmandu International Symposium on Glaciology in High-Mountain Asia, 71A1554, 1–5 March 2015, Kathmandu, Nepal.

12. Solbø S., Storbø R. MAPPING SVALBARD GLACIERS WITH THE CRYOWING UAS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, 2013, UAV-g2013, 4–6 September 2013, Rostock, Germany.

GLACIOLOGICAL MONITORING OF THE KOLKA GLACIER IN 2002–2014

N.V.Kovalenko¹, D.A. Petrakov¹, A.A. Aleinikov^{1,2}, K.A. Aristov¹,
Ye.S.Boyko^{3,4}, V.N. Drobyshev⁵, S.S. Chernomorets¹

¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography,
Moscow, Russia; kovalko_n@mail.ru; dpetrakov@gmail.com

²R&D Center ScanEx, Moscow, Russia

³JSC SevKavTISIZ, Krasnodar, Russia

⁴Kuban State University, Faculty of Geography, Russia

⁵Vladikavkaz Scientific Center of the RAS, Vladikavkaz, Russia

Abstract. In the August 2014 we performed repeated survey of the Kolka Glacier cirque. Our investigation included ground-based topographic survey (scale 1:5000), ground stereo survey using calibrated digital photogrammetry, stereo survey using unmanned aircraft system and stereo survey by SPOT-6 satellite. We compared and analyzed advantages and defects of the approaches listed above in mountain terrain. Joint use of traditional and innovation techniques allows to create most precise digital elevation models of the glacier surface, assess the rate of the Kolka Glacier regeneration and verify forecast of events similar to the 2002 disaster. We register accumulation of 30 M m³ in the Kolka Glacier cirque and 800 m advance of the glacier terminus in 2004–2014 despite unfavorable conditions for Caucasus glaciers. Rapid glacier advance is a unique case for the Caucasus in the 21st century.

Keywords: alpine glaciers, glacier disaster, natural hazards, remote sensing, forecast

REFERENCES

1. Vas'kov I.M., Valiev A.L. Ledniki Kolka i Mayli segodnya // Vestn. Vladikavkaz. nauch. tsentra, 2010, t. 10, № 1, s. 29–33.
2. Kortiev L.I., Kortieva V.L., Chochiev S.V. Analiz sotsial'nogo, ekologicheskogo i ekonomicheskogo ushcherba ot razrusheniy lednika Kolka // Vestn. Vladikavkaz. nauch. tsentra, 2009, t. 9, № 3, s. 41–42.
3. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Nosenko G.A., Desinov L.V., Osokin N.I., Chernov R.A. Karmadonskaya katastrofa: chto sluchilos' i chego zhdal' dal'she. – M.: Izdatel'skiy dom «Kodeks», 2014. 184 s.
4. Kotlyakov V.M., Rototaeva O.V., Osokin N.I. Pul'siruyushchie ledniki i lednikovaya katastrofa na Severnom Kavkaze // Vestn. Vladikavkaz. nauch. tsentra, 2004, t. 4, № 3, s. 65–71.
5. Lednik Kolka: vchera, segodnya, zavtra/ [otv. red. akad. Yu.G. Leonov, V.B. Zaalishvilij]: Tsentr geofiz.issled. Vladikavkaz. nauch. tsentra RAN i RSO-A. – Vladikavkaz, 2014. 432 s.
6. Novakovskiy B.A., Permyakov R.V. Tsifrovaya nazemnaya stereofotogrammetriya: vozmozhnosti i perspektivy // Geodeziya i kartografiya, 2014, № 10, s. 37–41.
7. Petrakov D.A., Drobyshev V.N., Aleynikov A.A., Aristov K.A., Tutubalina

- O.V., Chernomorets S.S. Izmeneniya v zone Genaldonskoy glyatsial'noy katastrofy v period 2002–2010 gg. // Kriosfera Zemli, 2013, t. XVII, № 1, s. 35–46.
8. Poznanin V.L. Mekhanizmy selevykh lednikovyx katastrof. – M., IMGRE, 2009, 182 s.
9. Popovnin V.V., Petrakov D.A., Tutubalina O.V., Chernomorets S.S. Glyatsial'naya katastrofa 2002 goda v Severnoy Osetii // Kriosfera Zemli, 2003, t. VII, № 1, s. 3–17.
10. Chernov R.A., Rototaeva O.V. O razvitii postkatastroficheskikh protsessov v tsirke lednika Kolka i doline r. Genaldon (severnnyy sklon Kазbekskogo massiva) // Лед и снег, 2010, вып. 4 (112), с. 25–29.
11. Bliakharskii D., Syromyatina M. The use of unmanned aircraft system for mapping glaciers of the Tavan Bogd mountains (northwest Mongolia). Proceedings of the Kathmandu International Symposium on Glaciology in High-Mountain Asia, 71A1554, 1–5 March 2015, Kathmandu, Nepal.
12. Solbø S., Storbø R. MAPPING SVALBARD GLACIERS WITH THE CRYOWING UAS. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XL-1/W2, 2013, UAV-g2013, 4–6 September 2013, Rostock, Germany.