

УДК 624.137

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-123-135](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-123-135)

# ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ МЕТОДОВ АЭРОФОТОСЪЁМКИ НА ОСНОВЕ БПЛА ДЛЯ ПРОЕКТИРОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ИНЖЕНЕРНОЙ ЗАЩИТЫ ОТ ОПАСНЫХ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

## THE USE OF MODERN METHODS OF AEROPHOTOGRAPHY BASED ON UAVs FOR THE PROJECT OF ENGINEERING PROTECTION MEASURES AGAINST DANGEROUS GEOLOGICAL PROCESSES

А. И. ХАРИЧКИН  
К. С. РОГОВ  
А. В. ДРАНИЦЫН

*С развитием и упрощением систем дистанционного зондирования Земли появляется возможность применения данных перспективных методов и технологии в инженерных изысканиях. Одним из таких методов является аэрофотосъёмка и получение цифровых моделей поверхности Земли на основе стереофотограмметрии при помощи беспилотного летательного аппарата (БПЛА).*

*В статье описан опыт использования указанного метода для проектирования мероприятий инженерной защиты от опасных геологических процессов на острове Парамушир (город Северо-Курильск, реки Матросская и Кузьминка), в Кабардино-Балкарской Республике (гора Эльбрус) и в Московской области (деревня Летово, искусственная насыпь).*

*With the development and simplification of Earth remote sensing systems, it becomes possible to use these promising methods and technologies in engineering surveys. One of these methods is aerial photography and obtaining digital models of the Earth's surface based on stereophotogrammetry using an unmanned aerial vehicle (UAV).*

*The article describes the experience of using this method for the project of engineering protection measures against dangerous geological processes on Paramushir Island (the city of Severo-Kurilsk, the Matrosskaya and Kuzminka rivers), in the Kabardino-Balkarian Republic (Mount Elbrus) and the Moscow Region (the Letovo village, an artificial hill).*

## Ключевые слова:

*Аэрофотосъёмка, БПЛА, горизонталы, инженерная защита, карта высот, опасные геологические процессы, ортофотоплан, 3D-модель*

## Key words:

*Aerophotography, UAV, contours, engineering protection, elevation map, dangerous geological processes, orthomosaic, 3D model*

### Введение

Инженерная защита территорий, зданий и сооружений – это комплекс инженерных сооружений и мероприятий, направленный на предотвращение отрицательного воздействия опасных геологических, экологических и других процессов на территорию, здания и сооружения, а также на защиту от их последствий. К опасным геологическим процессам, требующим учёта топографии участка, относятся оползни, обвалы, карст, селевые потоки, снежные лавины. Многие из этих процессов представляют особую опасность из-за своей редкой повторяемости, стремительности развития и масштаба явления, особенно при стечении ряда неблагоприятных факторов.

Для разработки и проведения инженерной защиты необходимо определить состояние и характерные особенности территории, склонной к таким процессам. В связи с этим всегда проводятся инженерные изыскания. В качестве одного из основных видов работ, выполняют геодезическую съёмку классическими или спутниковыми методами.

Указанные методы обоснованы и широко применимы, но сроки проведения таких работ, как правило, значительны, особенно если в качестве объекта изысканий выступает территория в несколько гектаров. Кроме того, результатом таких изысканий является геоподоснова – топографический план, который охватывает не всю рассматриваемую территорию в целом, а лишь отдельные характерные точки, густота которых на местности соответствует выбранному классу точности и масштабу съёмки. Этот факт обычно является критически важным в случае проектирования мероприятий инженерной защиты, для которых важны особенности изменения рельефа местности, которые могут остаться без внимания при проведении стандартной съёмки. Кроме того, плоское изображение на листе трудно для интерпретации и не обладает наглядностью для непрофессионала. Дополнительным фактором, осложняющим проведение работ и влияющим на их качество, является преодоление значительных маршрутов пешком, что увеличивает сроки изысканий. И зачастую при проведении полевых работ классическим методом их актуальность утрачивается еще до завершения, так как на рассматриваемой территории ситуация в геологическом отношении изменяется.

Современные методы аэрофотосъёмки с применением БПЛА позволяют минимизировать указанные сложности. При этом в результате получается более подробный и наглядный материал, что позволяет проанализировать ситуацию как в целом, так и любые отдельные участки. Для такой съёмки фактор выбора характерных точек на местности неактуален и, как следствие, упрощается работа по назначению проектных решений, например, при проектировании противооползневых или противоселевых мероприятий.

Другими словами, применение аэрофотосъёмки с использованием БПЛА для анализа текущей ситуации на территории изысканий и разработки решений по инженерной защите

позволяет получить исчерпывающую информацию при сравнительно той же точности, большей безопасности, а также при удобстве и скорости выполнения самих работ (как полевых, так и камеральных).

## 1. Сущность метода

Интенсивное развитие цифровой фототехники, малогабаритных беспилотных летательных аппаратов, персональной вычислительной техники предоставляет широкие возможности по решению прикладных инженерных и научных задач в изысканиях, проектировании, строительстве, геотехнике и др.

Основной принцип метода заключается в стереофото съемке обследуемого объекта или территории цифровой камерой с высокой разрешающей способностью с последующей обработкой полученного материала на персональном компьютере. Обработка представляет собой масштабирование фотографии и внесения в нее различных поправок. После всех произведенных операций изображение представляет собой масштабный план поверхности.

Аэрофото съемка с БПЛА расширяет возможности фотограмметрии и дополнительно позволяет выполнять масштабную топографическую съемку, съемку труднодоступных мест (горная местность, крупные котлованы, высотные здания). Применение БПЛА со встроенной съемочной фотосистемой, позволяет выполнять съемку в автоматическом режиме из расчетных точек по заранее определённым маршрутам, с ориентацией съемочной системы в пространственных координатах, вычисляемых по сигналам спутниковых навигационных систем.

Схема проведения аэрофото съёмки с применением БПЛА приведена на рис. 1.



Рис. 1. Схема проведения аэрофото съёмки с применением БПЛА

Для выполнения работ применяется следующее оборудование:

– БПЛА, модернизированный спутниковым приёмником и дополнительной цифровой камерой, для получения снимков высокого качества, позволяющие присваивать снимкам точные координаты центров, а также в большинстве случаев исключить маркировку наземных опознаков. Кроме того, можно оснащать БПЛА мультиспектральными, тепловизионными камерами, лидарами и т. д. На рис. 2 показаны примеры БПЛА с дополнительным оборудованием для выполнения геодезической аэрофотосъёмки.



**Рис. 2.** Квадрокоптер Topodrone DJI Mavic 2 Pro со спутниковым приёмником и цифровой фотокамерой высокого разрешения

– Спутниковый приёмник (рис. 3), применяемый для определения положения контрольных точек или опознаков, а кроме того он может выступать в качестве базовой станции (если в округе нет доступных постоянно действующих).



**Рис. 3.** Двухчастотный спутниковый приёмник Emlid Reach RS2



**Рис. 4.** Планшет на базе Android в процессе выполнения полётов по маршрутам

– Персональный компьютер, планшетный компьютер (рис. 4) или смартфон для планирования полётных заданий и для управления БПЛА, а также для корректировки полётных заданий в полевых условиях.

– Высокопроизводительная ЭВМ (ПК) с предустановленным специализированным программным обеспечением для постобработки спутниковых измерений и присвоения точных координат центров фотоснимкам, для фотограмметрической обработки полученных материалов; для получения облака точек / 3D-модели / ортофотоплана.

## **2. Опыт применения**

### **2.1. Остров Парамушир, г. Северо-Курильск, русла рек Кузьминка и Матросская, селеопасный район**

Осенью 2019 г. сотрудниками лаборатории №17 НИИОСП им. Н. М. Герсевича выполнены работы по оценке селевой опасности территории г. Северо-Курильска, а также по разработке мер противоселевой защиты. Основной целью работ являлся сбор актуальных данных о состоянии селеопасных зон вдоль рек Матросская и Кузьминка, а также составление карты селевой опасности г. Северо-Курильск. Полученный в результате работ материал предназначался для проведения научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по проектированию и оценке объемов необходимых мероприятий инженерной защиты.

#### *Краткая справка*

Бассейны рек Кузьминка и Матросская расположены на о. Парамушире. Остров Парамушир имеет вулканическое происхождение, находится на востоке Российской Федерации. Административно входит в состав Северо-Курильска. Это один из островов Северной группы Большой гряды Курильских островов. Площадь острова 2053 км<sup>2</sup>. В длину 120 км, в ширину – до 30 км. На севере острова имеется один постоянный населенный пункт – город Северо-Курильск.

Метеорологические условия бассейна рек Кузьминка и Матросская представляют собой комплекс селеформирующих факторов:

1. Селеобразующая сумма осадков на высоте АЭ «Северо-Курильск» составляет 80 мм и более при интенсивности осадков более 20 мм/ч (в зависимости от степени предшествующего увлажнения пород потенциальных селевых массивов);

2. В верхних точках селевых бассейнов за одно явление может выпасть осадков более 800 мм;

3. При прохождении тайфунов вертикальный градиент осадков может достигать 100 мм /100 м, а разница между осадками, отмечаемыми за одно явление в прибрежной части острова и осадками в верхних частях селевых бассейнов, может составлять более 1000 мм за одно явление;

4. Длительный сход снежного покрова, сохранение снежников-перелетков и высокая влажность воздуха способствуют постоянному обводнению верхних горизонтов селеформирующих грунтов;

5. Фёновые процессы вызывают быстрое и интенсивное таяние снежного покрова, обеспечивая быстрый сток и подъем воды в реках, с формированием паводков;

6. Селеопасный период для селей дождевого генезиса заключен в промежутке с июля по октябрь:

– лимитирующий фактор весной и в начале лета – снежный покров, покрывающий селевые очаги и сглаживающий гидрограф стока за счет поглощения дождя толщей снега;  
– лимитирующий фактор осенью – начало становления снежного покрова и переход температуры через 0 °С в горах, обеспечивающий смерзание потенциальных селевых масс;

7. Селеопасный период для вулканогенных прорывных селей (прорыв термального кратерного озера в результате эруптивной активности) не лимитирован метеорологическими параметрами. Дополнительный селеформирующий фактор – наличие больших запасов снега в течение всего года в русле реки Кузьминка, которые могут быть вовлечены в селевой процесс.

Особенностью селевых процессов на рассматриваемой территории является то, что формирование селей связано с вулканической деятельностью. Твердая составляющая селей в районе формируется за счет неконсолидированного пирокластического материала, слагающего вулканические сооружения. Мелкодисперсная фракция формируется за счет:

- 1) широко развитых суглинков в почвенно-пирокластических чехлах селевых бассейнов;
- 2) пеплов размером фракции менее 0,065 мм как свежих извержений, так и из состава ППЧ. Наличие значительного количества легкоразмываемых рыхлообломочных пирокластических пород обуславливает возможность формирования селевых потоков больших объемов.

Формирование вулканогенных селей (лахаров) при вулканических извержениях на территории района может быть вызвано интенсивным таянием большого количества снега и прорывом термальных кратерных озер при мощных извержениях вулкана Эбеко. Последнее сильное событие, сопровождавшееся прохождением лахара по руслу р. Кузьминка и достигшим территории г. Северо-Курильска, наблюдалось во время извержения вулкана Эбеко в 1934-35 гг. Лохары, сформировавшиеся при извержении вулкана Эбеко в 1987-90 гг., сошли по истокам рек Юрьева и Зеленой. На территории формируются как связные грязекаменные сели плотностью до 1900 - 2000 кг/м<sup>3</sup>, так и несвязные, наносоводные. Возможно формирования селевых потоков объемом, превышающим 500 000 м<sup>3</sup>.

Формирование селевых потоков невулканогенного происхождения по долинам водотоков может происходить в теплый период, с июня по октябрь, при выпадении большого количества жидких осадков. Селеформирующая сумма осадков составляет 80 мм и более при интенсивности более 5 мм/10 мин. Формирование вулканогенных селей (лахаров) возможно в любое время года, но наиболее разрушительные последствия может вызвать лахар, сформировавшийся при наложении сильного вулканического извержения с выбросом огромного количества горячей пирокластики на снеготаяние в начале лета. Селевые потоки, угрожающие территории г. Северо-Курильск, формируются в бассейне рек Матросская и Кузьминка-Снежная.

Помимо селевой опасности, из-за сейсмичности района г. Северо-Курильск может быть подвержен влиянию цунами. После нескольких землетрясений в Тихом океане возле южной части Камчатского полуострова в 1952 г. был зарегистрирован разрушивший почти весь город цунами. Высота заплеска волн составила, по данным геодезической съёмки, 9–10 м.

#### *Результат*

В ходе проведения работ была выполнена аэрофотосъёмка с применением БПЛА. В результате съёмки были получены ортофотоплан, 3D-модель и карта высот (с горизонталями) русла реки Кузьминка и откосы вдоль оси русла. Полученные материалы были переработаны

(рис. 5) в карту селевой опасности г. Северо-Курильска (рис. 6). Также на основе материалов 3D-модели были разработаны и предложены варианты инженерной защиты территории от селевой опасности.

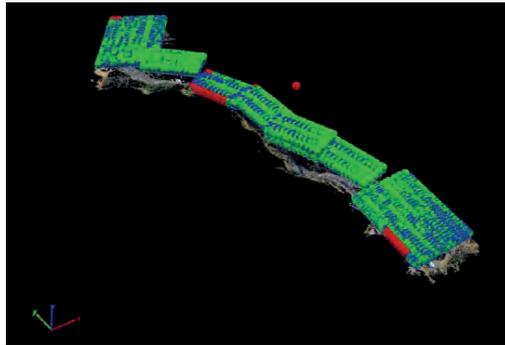


Рис. 5. Процесс фотограмметрической обработки полученных стереопар с выдавливанием облака точек



Рис. 6. Карты селевой опасности г. Северо-Курильска по руслу реки Кузьминка

## 2.2. Город Москва, искусственная насыпь «ADRENALINE BEAT», геотехнический мониторинг

С 2018 по 2019 гг. лаборатория №17 НИИОСП им. Н. М. Герсеванова проводила геотехническое сопровождение строительства искусственного насыпного сооружения.

Целью выполнения геотехнического сопровождения строительства является технический контроль за реализацией проекта. В рамках геотехнического сопровождения одной из основных задач являлся геотехнический мониторинг, в ходе которого решались следующие задачи:

- визуальное наблюдение за ходом строительства;
- периодический геодезический контроль геометрических параметров тела насыпи;
- геодезический контроль деформаций массива грунта;
- анализ полученных материалов и составление заключения о ходе строительства.

В свою очередь, мониторинг осуществлялся средствами аэрофотосъёмки с применением БПЛА.

Полученные материалы предназначались для оценки состояния насыпи относительно проектных решений; кроме того, по этим данным анализировалась и контролировалась ситуация с объемом отсыпки и деформациями грунтового массива.

#### *Краткая справка*

Площадь территории возведения искусственной насыпи превышает 35 га. Площадь отсыпки насыпи 33560 м<sup>2</sup>. Объем насыпи 9401460 м<sup>3</sup>. Объем выемки 5715 м<sup>3</sup>. Максимальная отметка достигает 278 м в Балтийской системе высот. Площадь верхней площадки 6000 м<sup>2</sup>.

Концепция объекта предусматривает отсыпку насыпи высотой до 100 м, с устройством склонов для всесезонных видов активного и экстремального спорта: с высококачественными трассами для катания на лыжах и сноубордах, комплексами активных развлечений и популярных видов спорта, смотровых площадок, торговых помещений и ресторанов, природным парком с дорожками для прогулок, бега, катания на велосипедах и зонами спокойного отдыха, пляжная зона и пр.

Площадка изысканий повсеместно сформирована насыпными грунтами, строительным мусором, арматурой, кирпичом. Абсолютные отметки поверхности на момент проведения изысканий (апрель 2018 г.) изменяются от 183,38 до 189,34 м. Объект расположен на открытой, незастроенной территории. Непосредственно на площадке изысканий водные объекты отсутствуют. На момент проведения инженерно-геологических изысканий (апрель 2018 г.) территория оценивается как подтопленная.

Из физико-геологических процессов и факторов, неблагоприятных для проектируемого строительства на площадке, необходимо отметить наличие в разрезе специфических и сильносжимаемых грунтов.

Площадка строительства безопасна в отношении возможного проявления карстово-суффозионных процессов. На площадке имеются специфические грунты, представленные насыпными грунтами и грунтами, обладающими пучинистыми свойствами.

#### *Результат*

В результате серии аэрофотосъёмок на участок были получены ортофотоплан, 3D-модель и карта высот (с горизонталями) для каждого цикла измерений. Полученные материалы анализировались как самостоятельно (в текущем цикле), так и в сравнении с предыдущими циклами. В результате с помощью используемого метода удалось проследить различные склоновые и эрозионные процессы, изменение геометрических характеристик насыпи по ходу строительных работ. Также анализ результатов помог выявить некоторые ошибки в производстве работ по отсыпке. В ходе мониторинга накопилась обширная база материалов, которая позволила разработать эскизный проект с решением проблем, возникших во время возведения насыпи. На рисунках 7 – 10 представлен некоторый графический материал, получившийся в результате выполнения работ.

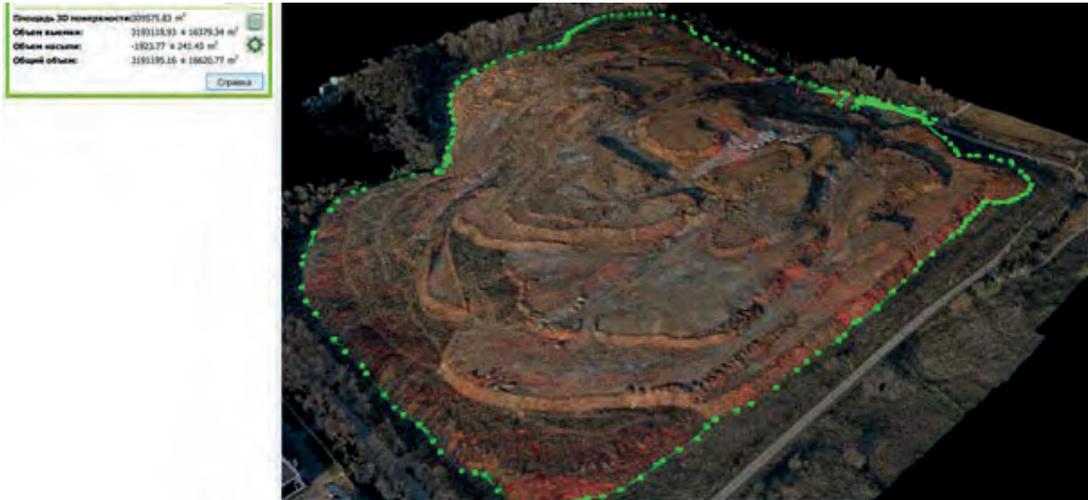


Рис. 7. Процесс вычисления объема насыпи в специализированном программном обеспечении по полученной 3D-модели



Рис. 8. Снимки с БПЛА на высоте 90 – 110 м, видны следы склоновых процессов



Рис. 9. Вид негативных геологических процессов на поверхности насыпи

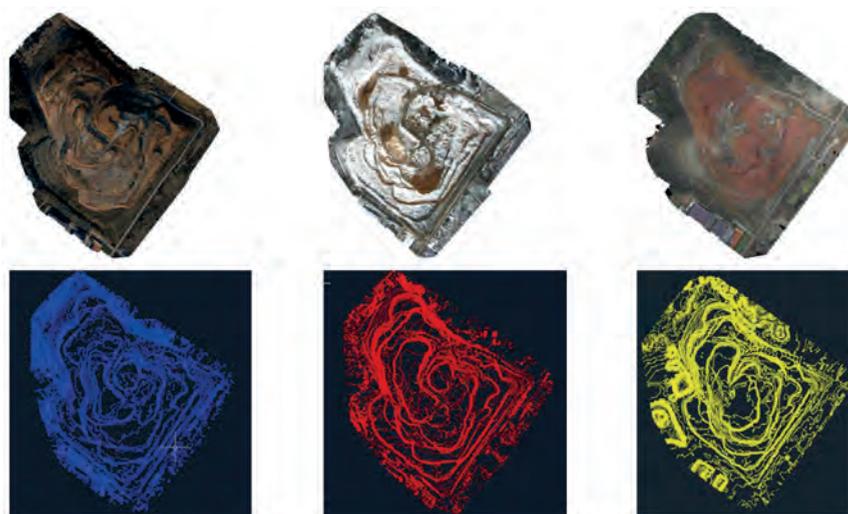


Рис. 10. Сравнение результатов съёмок трёх циклов (сверху – ортофотоплан, снизу – изображение в горизонталях)

### 2.3. Кабардино-Балкарская Республика, гора Эльбрус, аэрофотосъёмка для инженерно-геологических изысканий (в составе научно-технического сопровождения)

В Кабардино-Балкарской Республике в районе горнолыжного комплекса «Эльбрус» при участии сотрудников НИИОСП им. Н. М. Герсеванова проводилось научно-техническое сопровождение (НТС) строительства новых горнолыжных трасс и станций канатной дороги. Основной задачей при выполнении аэрофотосъёмки было отражение фактической ситуации на месте запроектированных трасс и дополнение архивных инженерно-геологических материалов.

#### *Краткая справка*

Природные условия района в целом сложные. Основными факторами, усложняющими строительство в районе, являются: расчлененный рельеф, высокая сейсмическая опасность, многолетняя мерзлота, сложная тектоника и неотектоника, наличие на склонах гор крупнообломочных, несцементированных образований, наличие опасных геологических процессов.

Массив г. Эльбрус представляет собой округлый в плане конический вулкан, подошва которого находится на высоте 3 - 3,5 тыс. м. До высоты 5,0 - 5,2 тыс. м это усеченный конус. Выше этой отметки располагаются два равновеликих конуса, образуя западную и восточную вершины горы. Современный рельеф района строительства обусловлен вулканической деятельностью горы Эльбрус. Первичный рельеф был преобразован древним оледенением (экзарационной и аккумулятивной деятельностью ледников). Преобразование рельефа проходило в несколько этапов. В среднем плейстоцене после поднятия и значительного оледенения наблюдалась новая мощная вспышка вулканической деятельности, которая и привела к завершению формирования основного вулканического сложения Эльбруса.

Участок изысканий расположен на южном склоне с углами наклона до 10 – 45° и имеет абсолютные отметки поверхности от 3100 до 3700 м.

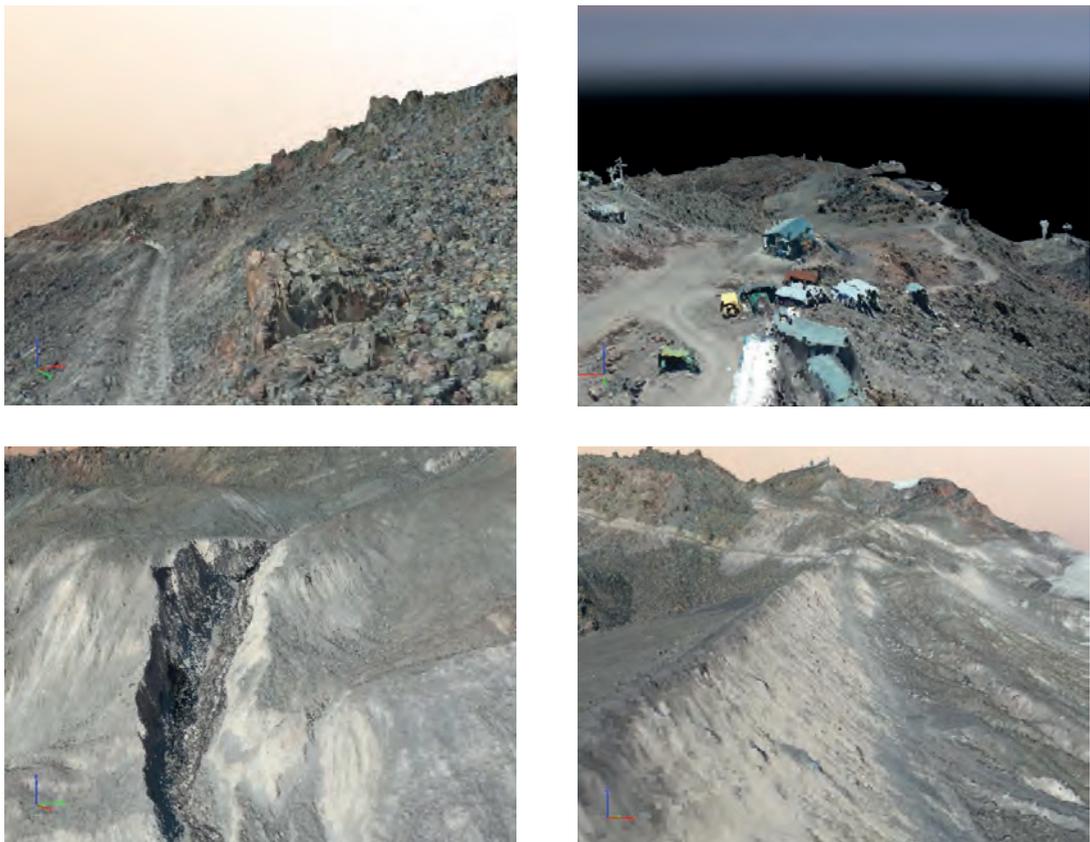
Описываемая работа выполнялась в рамках решения задачи снижения требующихся мероприятий инженерной защиты, так как согласно данным проектных материалов большая часть склонов находилась в неустойчивом состоянии и требовала крепления.

#### *Результат*

Площадь аэрофотосъёмки территории будущих горнолыжных трасс составила 224 га. В результате работ были получены ортофотоплан, 3D-модель и карта высот (с горизонталями) местности (рисунки 11-14), которые, в свою очередь, способствовали созданию топографических планов масштаба 1:2000 опасных геологических процессов и инженерно-геокриологического районирования, а также облегчили анализ новых и архивных материалов. По ссылке QR-кода (<https://youtu.be/ipJ968dEL4Y>) предоставлен доступ на видеоматериал, показывающий результаты аэрофотосъёмки и возможность работы с ними.



В процессе проведения работ были заново переопределены выходы скальных грунтов на поверхность, в зонах с крутизной уклона свыше  $40^\circ$ , что позволило значительно сократить объемы мероприятий, так как в первоначальной съёмке местности, выполненной классическим методом для масштаба 1:2000, указанные участки были отмечены как не скальный песчаный и глыбовый грунт.



**Рис. 11.** Фрагменты 3D-модели и облака точек территории изысканий

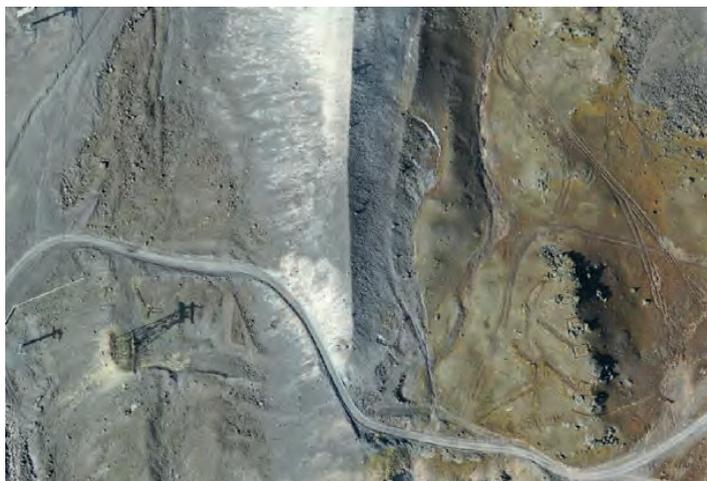


Рис. 12. Фрагмент ортофотоплана

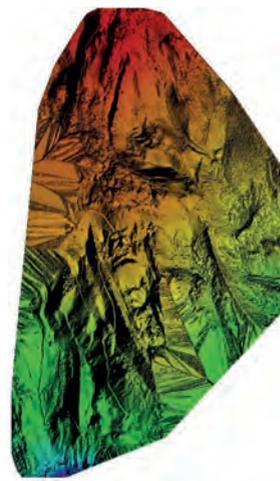


Рис. 13. Карта высот (без нанесения горизонталей)

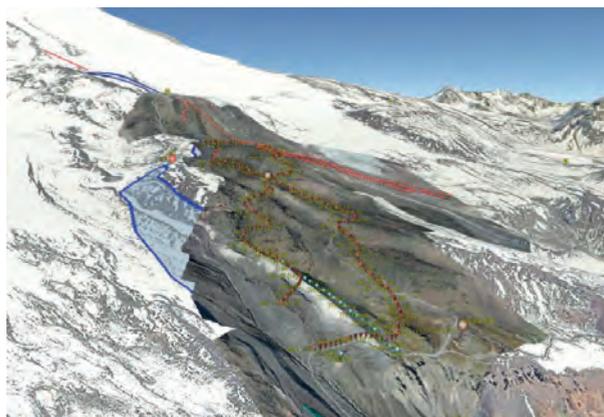
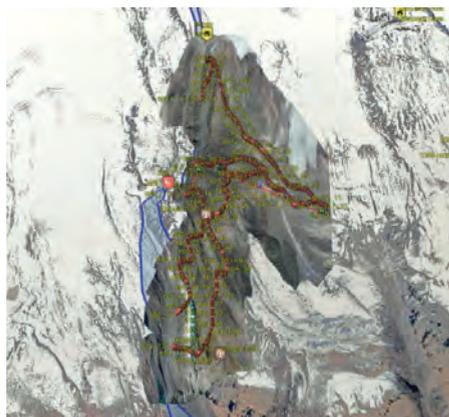


Рис. 14. Ортофотоплан и маршрутные GPS-метки

### Заключение

С развитием изыскательских технологий стало легче получать более наглядный и подробный материал: ортофотоплан, 3D-модель или карту высот территории, особенно в сложных условиях. Использование современных методов позволило с точностью классических методов ускорить получение более объёмной информации об объекте изысканий, а также обезопасить человека.

Как можно увидеть на примере опыта лаборатории №17 НИИОСП им. Н. М. Герсванова, современные методы аэрофотосъёмки с применением БПЛА позволяют активно использовать результаты современных методов съёмки для проектирования мероприятий инженерной защиты территории либо значительно оптимизировать решения уже готового проекта.

## Библиографический список

1. СП 47.13330.2016 Инженерные изыскания для строительства. Основные положения.
2. СП 317.1325800.2017 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ.
3. ГКИН 02-033-82 Инструкция по топографической съёмке в масштабах 1:5000, 1:2000, 1:1000 и 1:500.
4. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов. – М.: ЦНИИГАиК, 2002.
5. СП 116.13330.2012 Актуализированная редакция СНиП 22-02-2003 «Инженерная защита территорий, зданий и сооружений от опасных геологических процессов. Основные положения».
6. СП 22.13330.2017 Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*.
7. СП 45.13330.2017 Земляные сооружения, основания и фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 3.02.01-87.

### Авторы:

Андрей Игоревич ХАРИЧКИН, научный сотрудник лаборатории механики грунтов НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Andrey KHARICHKIN, the researcher of the Laboratory of soil mechanics of the NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: Andrei.Kharichkin@goolemail.com

тел.: +7 (926) 853-29-07

Кирилл Сергеевич РОГОВ, инженер НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Kirill ROGOV, the engineer of the NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: buttersrogov@gmail.com

тел.: +7 (925) 035-40-75

Алексей Владимирович ДРАНИЦЫН, научный сотрудник лаборатории механики грунтов НИИОСП им. Н. М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Aleksey DRANITSIN, the researcher of the Laboratory of soil mechanics NIIOSP named after N. M. Gersevanov JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: stkmdr16@gmail.com

тел.: +7 (968) 030-09-88