

САЛАМАТИНА Ю.М., КУЗИКОВ С.И.

¹ИС РАН, Бишкек, Кыргызская Республика

SALAMATINA YU.M., KUZIKOV S.I.

¹RS RAS in Bishkek, Bishkek, Kyrgyz Republic

(salam@gdirc.ru ksi@gdirc.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ФОТОГРАММЕТРИЧЕСКОЙ СЪЕМКИ

RESEARCH OF POSITIONING ACCURACY BASED ON PHOTOGRAMMETRY

Жер үстүндөгү жана космостук геодезиянын ыкмалары жер бетиндеги айрым геодезиялык чекиттердин позицияларын миллиметрдик тактыкта аныктоого мүмкүндүк берет. Фотограмметриялык ыкманын техникалык жана программалык жабдыктары изилденүүчү аймактын 3D санариптик моделин түзүүгө мүмкүндүк берет. Бул макаланын максаты Бишкек геодинамикалык полигон аймагында геодезия жана фотограмметрия ыкмалары менен салыштырмалуу жайгашуунун тактыгын баалоо болуп саналат.

Өзөк сөздөр: геодезия, фотограмметрия, сызыктуу-бурчтук өлчөө, базалык түз сызык узундуктары, өлчөөлөрүн тактыгы

Методы наземной и космической геодезии позволяют с миллиметровой точностью определять позицию отдельных реперных точек на поверхности Земли. Технические и программные средства аэрофотограмметрического метода дают возможность построения 3-мерной цифровой модели исследуемой территории. Цель данной работы посвящена сравнительной оценке точности относительного позиционирования методами геодезии и фотограмметрии в пределах Бишкекского геодинамического полигона.

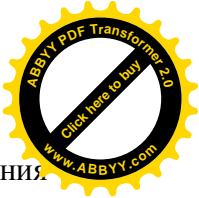
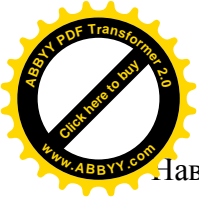
Ключевые слова: геодезия, фотограмметрия, линейно-угловые измерения, длины базовых линий, точность измерений

The methods of ground and space geodesy allow to determine with millimeter accuracy the position of separate geodetic points on the Earth's surface. The hardware and software of the photogrammetry method make it possible to build a 3D digital model of the observed geodetic area. The purpose of this work is to compare and evaluate the accuracy of relative positioning using geodesy and photogrammetry methods within the Bishkek geodynamic area.

Key words: geodesy, photogrammetry, linear-angular measurements, lengths of baselines, measurement accuracy

Для сотрудников Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (ИС РАН) тема данной работы представляет интерес в плане геодинамических исследований. Длительные наблюдения методами космической и наземной геодезии за отдельными точечными реперами на земной поверхности дают возможность судить о современных движениях земной коры с учетом геологических, сейсмологических и других геофизических данных [1-3]. Геодинамические смещения земной поверхности в пределах Центральной Азии варьируют в пределах 1-20 мм/год, поэтому для наших исследований важен вопрос точности географического или относительного позиционирования наблюдаемых объектов [4].

Кроме традиционных методов позиционирования (наземной и космической геодезии) в последнее время активно развивается метод картографирования и фотограмметрии с использованием компактных беспилотных летательных аппаратов (БПЛА или дронов), оснащенных видеокамерами и средствами позиционирования ГНСС (Глобальных



Навигационных Спутниковых Систем). Если традиционные методы позиционирования могут характеризовать только отдельные точки в 3-мерном пространстве, то метод фотограмметрии дает возможность получить относительные превышения по заданной сетке горизонтальных координат исследуемого участка поверхности. Совмещение традиционных методов позиционирования с методом фотограмметрии может представлять практический интерес не только для инженерной геодезии и картографии, но и для исследований современных движений земной коры.

Территория НС РАН расположена на северных склонах Киргизского хребта, в этом же районе находится один из площадных объектов для регулярных наблюдений за движениями геодезических пунктов земной коры (рис.1).

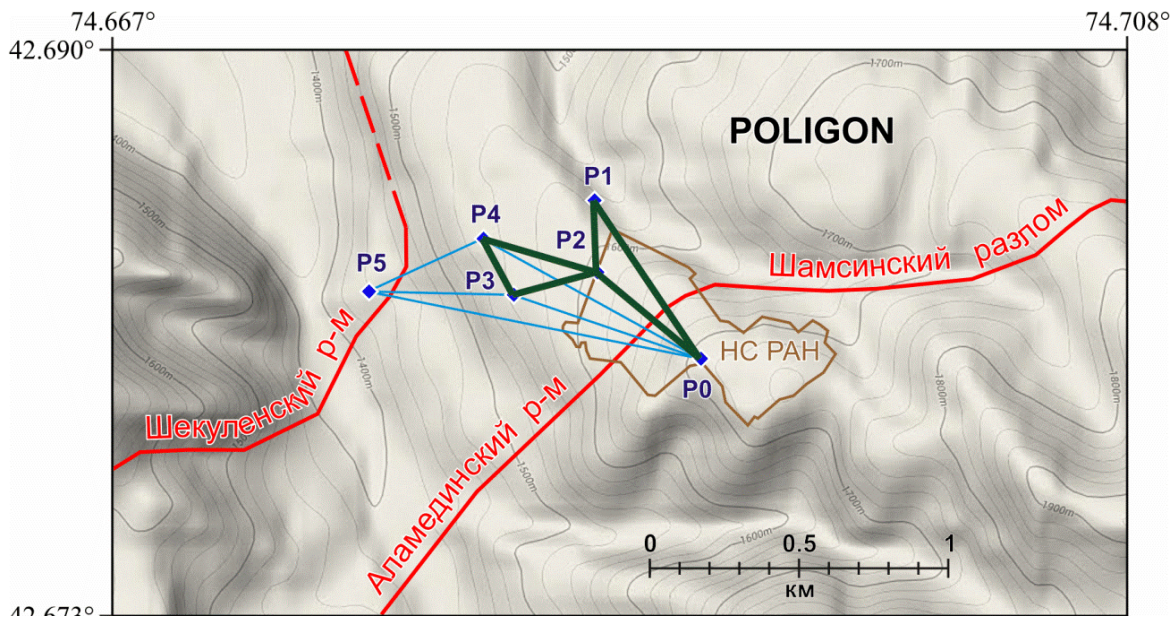


Рис. 1. Положение геодезических реперов (P0÷P5), и 11 связывающих их базовых линий площадки POLIGON для космогеодезических и линейно-угловых измерений.

Утолщенные прямые линии – дистанции для сравнительного анализа разных методов позиционирования. Красные линии – активные разломы

На фундаментальных реперах площадки POLIGON с июня 2012 года и по настоящее время проводятся регулярные GPS (Global Positioning System) и линейно-угловые измерения (ЛУИ), представление о таких совмещенных измерениях можно получить из рисунка 2.

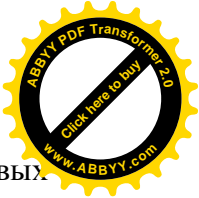
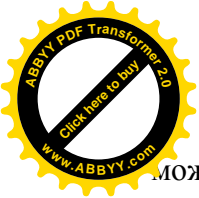
На 11 базовых линиях (БЛ) площадки POLIGON (рис.1) проводятся еженедельно линейно-угловые измерения и 4 раза в год на 4 реперах осуществляются 36-часовые сеансы GPS позиционирования. Кроме этого, на реперах P0 и P1 ГНСС измерения проводятся в непрерывном режиме с 2019г. Сходимость результатов и точность таких измерений можно продемонстрировать следующим графическим представлением (рис.3). Идентификация базовых линий осуществляется нами по следующему принципу, например для линии P0=2:

"P" – первая буква названия площадки POLIGON,

"0" и "2" – номера реперов БЛ (знак угла наклона БЛ определяется от "0" к "2"),

"=" – знак прямого и обратного (двустороннего) измерения БЛ при ЛУИ.

В нашем случае под "фоновыми вариациями" понимается набор всех измеренных длин исследуемых линий методом ЛУИ за исключением экстремального увеличения длин БЛ до 17 мм с 12 по 26 сентября 2018 года (3 измерения). Данные GPS наблюдений представлены на основе усреднённого позиционирования за 36 часов наблюдений 4 раза в год после полного цикла обработки программой GAMIT/GLOBK [5]. Такое усреднение само по себе исключает экстремальные выбросы данных. Для других базовых линий примерно такое же распределение вариаций длин: как по методу ЛУИ, так и по методу GPS наблюдений. Различия в оценке длины одной и той же БЛ в одно и то же время для методов ЛУИ и GPS



может достигать 2-3 мм. Но при этом надо учитывать тот факт, что данные линейно-угловых измерений формируются в течение 10-60 минут, а данные GPS измерений за 36 часов. Тектонические или иные факторы могут влиять на определение дистанций разными методами за разные промежутки времени.



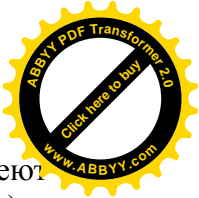
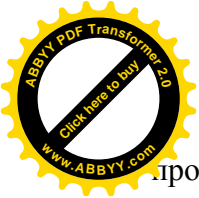
Рис. 2. Пример совмещенных GPS и линейно-угловых измерений на геодезическом репере слева; рефлектор на репере справа для отражения луча тахеометра и определения длины базовой линии



Рис. 3. Вариации длин БЛ P0=2 по данным еженедельных линейно-угловых измерений (ЛУИ), и по данным эпизодических 36-часовых GPS наблюдений (после полного цикла обработки программой GAMIT/GLOBK)

Технология высокоточного (до первых миллиметров) GPS позиционирования не имеет ограничений по дистанциям между геодезическими реперами на земной поверхности, но требует как минимум суточных измерений и длительное время для обработки данных до получения высокоточных координат [4]. Используемый нами метод ЛУИ ограничивается дистанциями до 3 км, но позволяет получить качественные данные по относительному позиционированию 2 геодезических реперов в течение первых десятков минут. Поэтому, в качестве эталонных длин базовых линий мы будем использовать данные, полученные по методу ЛУИ.

Аэрофотосъемка земной поверхности может быть использована в методе аэрофотограмметрии (АФГМ) для построения детальных топографических планов и цифровых 3D моделей рельефа. В настоящее время разрабатываются и доступны



профессиональные дроны для решения различных геодезических задач. Они имеют встроенные ГНСС приемники и оснащены технологиями PPK (Post-Processed Kinematics) и RTK (Real Time Kinematic) [6]. Заявленная точность съемки может достигать до 5 см по горизонтали, и до 10 см по вертикали в зависимости от дрона и его оснащённости, технологии обработки данных и сложности наблюдаемой местности.

Для эксперимента по оценке точности относительного позиционирования на основе данных аэрофотосъемки и метода обработки снимков нами использовался любительский дрон Mavic Air (рис. 4) компании DJI [7].



Рис. 4. Внешний вид пульта управления и дрона Mavic Air от компании DJI

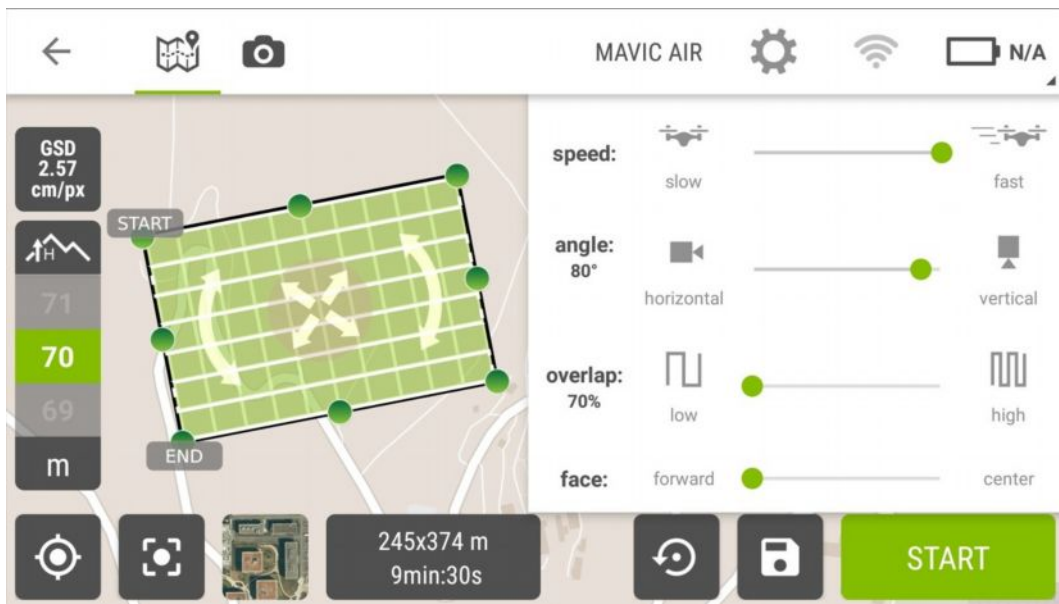
Такой дрон имеет следующие технические характеристики: Навигация: GPS+ГЛОНАСС. Точность зависания в GPS-режиме: по вертикали ± 0.5 м; по горизонтали ± 1.5 м. Камера: HDR 12 МП. Дальность съемки: от 0.5 м. Размер неподвижного изображения 4:3 - 4056×3040 пикселей, или 16:9 - 4056×2280 пикселей. Формат фото: JPEG.

Для экспериментальной съемки методом АФГМ был выбран участок площадки POLIGON, ограниченный 5 реперами (P0-P4) и 6 базовыми линиями (рис. 1, утолщенные линии). В этой работе мы представляем данные от 11 апреля 2019 по 2 видам аэрофотосъемки территории при разных условиях. В первом проекте 3 геодезических репера P2, P3 и P4 ограничивались четырёхугольным участком, с облетом через 35 метров между линиями съемки в режиме grid mission на высоте 70 м (от точки старта) и частотой съемки через каждые 13 м пути (рис. 5).

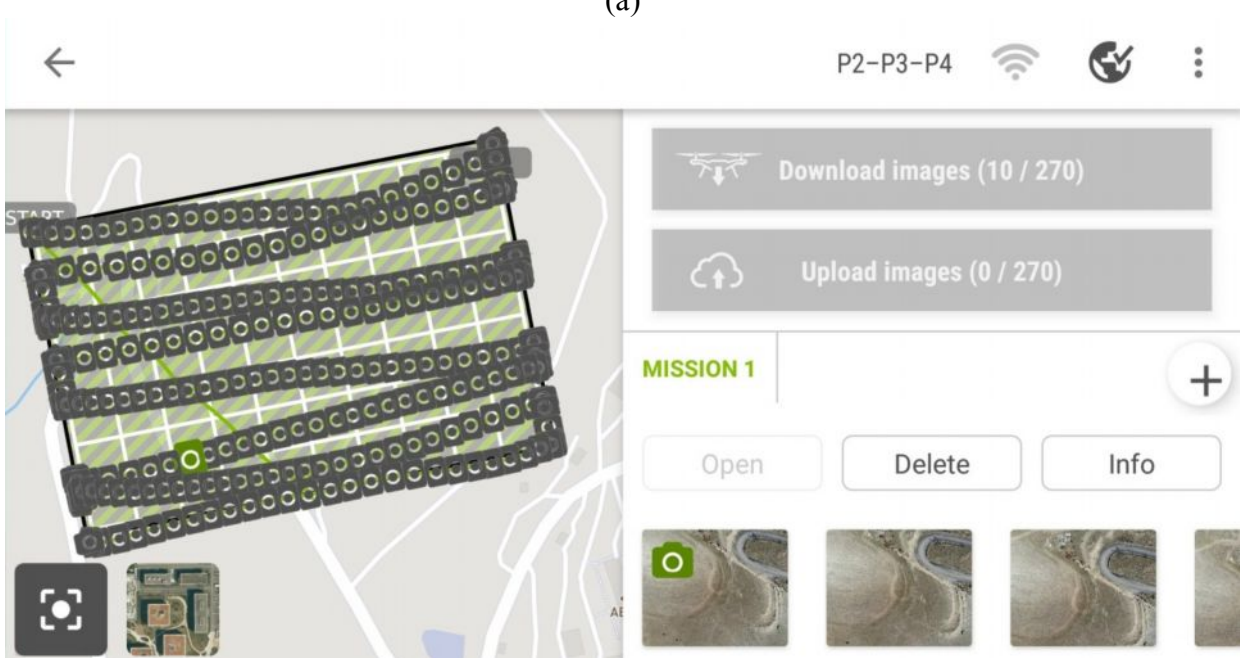
Из-за того, что нахождение дрона в воздухе ограничено по времени (~20 минут), второй проект состоял из 3 прямоугольных участков, охватывающих отдельно пары геодезических реперов и базовые линии P0=1, P0=2 и P1=2. В этом случае аэрофотосъемка осуществлялась вдоль каждой БЛ с аналогичным режимом grid mission и облетом через 12 метров между линиями съемки на высоте 30 м (от точки старта) и частотой съемки через каждые 10 м пути.

Один из простых и доступных способов обработки аэрофотоснимков и построения цифровых 2D и 3D моделей рельефа – использование облачного сервера Pix4D [8], который обрабатывает проекты на основе стандартных шаблонов (рис. 6).

На основе построенных цифровых 3D моделей рельефа по методу аэрофотограмметрии нами были определены дистанции между вышеуказанными геодезическими реперами для 6 базовых линий. Теперь точность выбранного метода фотограмметрии можно оценить на основе сравнения длин базовых линий, определённых методами АФГМ и ЛУИ (табл. 1).



(a)



(б)

Рис. 5. (а) Скриншот панели управления дрона для настройки аэрофотосъемки геодезических реперов P2, P3 и P4 на высоте 70 м. (б) Скриншот траектории совершённого полета дрона в режиме grid mission.

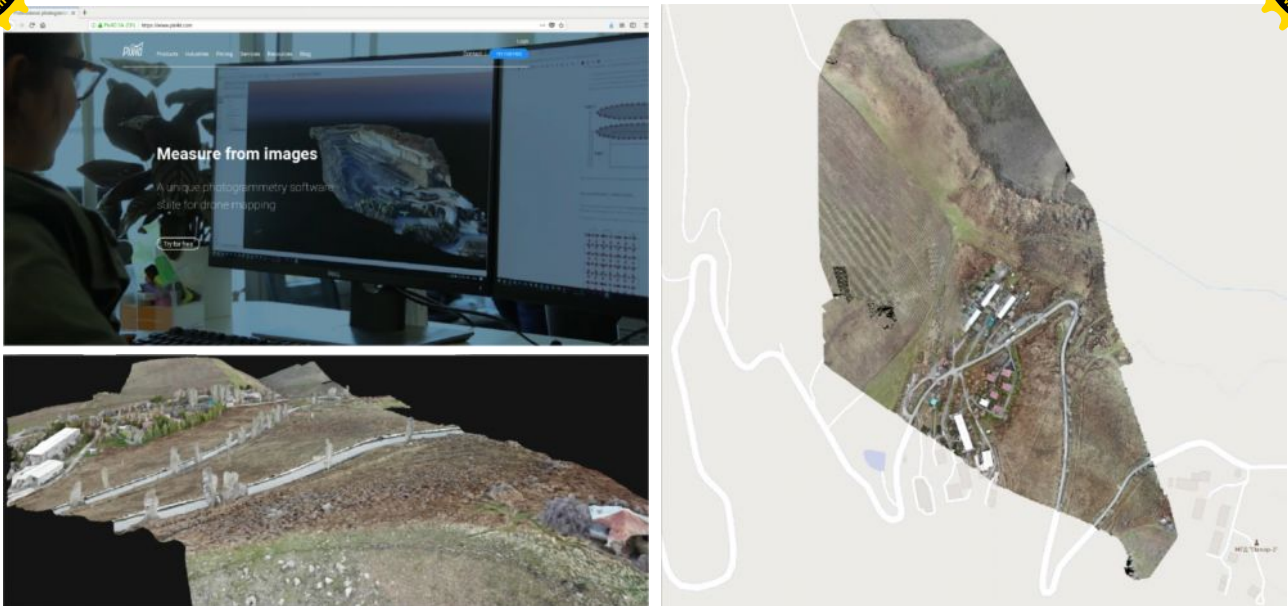
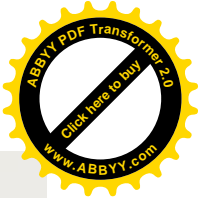
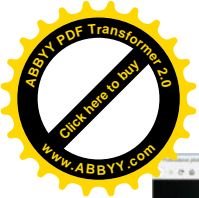


Рис. 6. Скриншот главной страницы вебсайта Pix4D (левый верхний), построенная 3D модель рельефа (левый нижний), построенная цифровая 2D модель рельефа (правый)

Таблица 1 - Длины 6 базовых линий, определённых методами АФГМ и ЛУИ, сравнительная точность метода аэрофотосъемки (АФГМ–ЛУИ) и углы наклона базовых линий

Метод	Высота съемки 30 м			Высота съемки 70 м		
	P0=1, мм	P0=2, мм	P1=2, мм	P2=3, мм	P2=4, мм	P3=4, мм
АФГМ 11.04.2019	658784.26	470900.60	245217.46	294070.30	405388.38	216920.84
ЛУИ 05.04.2019	660079.76	472204.26	245615.26	293978.41	405259.91	217072.18
АФГМ–ЛУИ	-1295.50	-1303.66	-397.80	91.89	128.47	-151.34
ЛУИ Верг. угол, °	-11.02955	-14.32375	2.16931	-8.95883	-8.19659	-3.19707

Из представленных в таблице данных следует, что при высоте аэрофотосъемки 30 м все дистанции по базовым линиям определены с меньшими значениями по сравнению с эталонными длинами БЛ (по ЛУИ). При высоте аэрофотосъемки 70 м наиболее длинные линии (P2=3 и P2=4) уже превышают истинные значения. В общем случае, чем длиннее базовая линия и круче ее угол наклона, тем хуже определяется истинная дистанция между геодезическими реперами по методу АФГМ. Теоретически можно подобрать высоту аэрофотосъемки, при которой для данного набора БЛ их длины будут определяться с минимальной ошибкой.

Оцененная нами точность в 90-1300 мм для выбранного метода АФГМ (вид дрона, разрешающая способность фотокамеры, алгоритм численной обработка фотоснимков) явно не удовлетворяет целям исследований современных движений земной коры в диапазоне первых миллиметров. С одной стороны, существует возможность увеличения точности АФГМ за счет улучшения технических и аналитических показателей. С другой стороны, есть возможность использовать в качестве опорных точек данные высокоточных GPS измерений при построении 3D моделей рельефа.

Работа выполнена в рамках государственного задания для Федерального государственного бюджетного учреждения науки Научной станции Российской академии наук в г. Бишкеке (Регистрационный номер № АААА-А19-119020190066-3).



Список литературы

1. Кузиков С. И. Структура поля современных скоростей земной коры в районе Центрально-Азиатской GPS сети [Текст] / С. И. Кузиков, Ш. Мухамедиев // Физика Земли. – 2010. – №7. – С. 33–51.
2. Ребецкий Ю.Л. Тектонофизическое районирование активных разломов Северного Тянь-Шаня [Текст] / Ю.Л. Ребецкий, С.И. Кузиков // Геология и геофизика. – 2016. – Т.57. – №6. – С.1225-1250. DOI: 10.15372/GiG20160609
3. Qiao X. Crustal Deformation Revealed by GPS and InSAR in the Northwest Corner of the Tarim Basin, Northwestern China [Текст] / X. Qiao, P. Yu, Z. Nie, J. Li, X. Wang, S.I. Kuzikov, Q. Wang, S. Yang // Pure and Applied Geophysics. – 2017. – Vol.174. – Iss.3 – Pp.1405–1423. DOI: 10.1007/s00024-017-1473-6.
4. Кузиков С.И. Методические задачи и проблемы точности GPS наблюдений (на примере Бишкекского геодинамического полигона) [Текст] / С.И. Кузиков // Физика Земли. – 2014. – №6. – С.55–69. DOI: 10.1134/S1069351314060032.
5. GAMIT/GLOBK. Home page at the Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences, MIT / [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://geoweb.mit.edu/gg/> (доступно 25 июня 2020)
6. Pix4D. Do RTK/PPK drones give you better results than GCPs? / [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.pix4d.com/blog/rtk-ppk-drones-gcp-comparison> (доступно 25 июня 2020)
7. DJI. Mavic Air / [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.dji.com/mavic-air> (доступно 25 июня 2020)
8. Cloud Pix4D / [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://cloud.pix4d.com/> (доступно 25 июня 2020)