



УДК 551.435.5(571.54)
DOI <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.31>.

Применение беспилотников при анализе криогенных форм рельефа долины реки Сенцы Окинского плоскогорья

В. А. Пеллинен, А. А. Светлаков

Институт земной коры СО РАН, г. Иркутск, Россия

Аннотация. В рамках научно-исследовательских работ, проводимых на территории Окинского плато, использовалась аэрофотосъемка для оценки динамики рельефа, на котором широко распространение имеют бугры пучения. На ключевом участке была осуществлена аэрофотосъемка с помощью дистанционно пилотируемого летательного аппарата для установления характера распределения бугров пучения и построения ортофотоплана местности. Определен общий характер распределения бугров пучения по ландшафтным элементам, а также рассчитана пораженность территории криогенным процессом в виде процентного соотношения свободных от пучения участков к общей площади ключевого участка. В результате анализа данных о динамике отступления бровки берега, полученных с мониторинговых профилей, установлена скорость переработки берега на р. Сенце. В дополнение к аэрофотосъемке были выполнены горнопроходческие работы. Для исследования физико-механических свойств грунтов, слагающих бугры пучения и абразионный уступ реки, были выкопаны шурфы и расчистки. Мониторинг температурного режима многолетнемерзлых грунтов осуществлялся методом температурного замера в створе скважин, пробуренных на различных элементах рельефа. Определена мощность линз ледяного ядра бугров пучения, сезонно-талого слоя. Получены данные термодинамического состояния многолетнемерзлых пород в цикле годовых теплооборотов.

Ключевые слова: криогенные процессы, криогенный рельеф, бугры пучения, дистанционно пилотируемый летательный аппарат.

Для цитирования: Пеллинен В. А., Светлаков А. А. Применение беспилотников при анализе криогенных форм рельефа долины реки Сенца Окинского плоскогорья // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2020. Т. 31. С. 58–67. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.31.58>

Введение

В последние годы заметно увеличилось количество публикаций, касающихся использования дистанционно пилотируемых летательных аппаратов (ДПЛА). Современные ДПЛА не отличаются от пилотируемых аппаратов (ПА) и оснащены системами наведения, бортовыми радиолокационными комплексами, датчиками и видеокамерами. ДПЛА, или беспилотные самолеты – дроны (англ. *drone*), стали разрабатываться в 60-е гг. прошлого столетия [Классификация БПЛА и системы ... , 2016]. Гражданское и коммерческое применение ДПЛА еще недостаточно хорошо развито, однако область потенциального использования ДПЛА весьма обширна и включает в

себя доставку грузов, мониторинг окружающей природной среды (выявление очагов загрязнения, наблюдение за погодой и решение научных задач), мониторинг лесных пожаров, обеспечение национальной безопасности, картографирование, а также контроль дорожного движения, точное земледелие, оказание помощи при стихийных бедствиях и исследования в области сельского хозяйства. По типу ДПЛА разделяются на самолетные, вертолетные и конвертоплановые. Самолетный и вертолетный типы имеют соответствующие внешний вид и характеристики самолета и вертолета, а конвертоплановый аппарат объединяет характеристики этих двух аппаратов [Общие виды и характеристики ... , 2008].

В научных целях в основном используют ДПЛА самолетного и в большей мере вертолетного типов. Такой метод исследования применяется главным образом для получения снимков местности высокого разрешения, а дальнейшее их дешифрирование с помощью специализированного программного обеспечения позволяет получать большой объем количественных данных. Главным достоинством применения ДПЛА является экономия людских и финансовых ресурсов.

Особую актуальность в последнее время приобрели исследования криогенных процессов в связи с изменениями климатических условий в области распространения многолетнемерзлых пород. Так, при изучении особенностей распределения снежного покрова [Андреев, Беляева, Чабан, 2004; Полякова, Игловский, 2012] использовался ДПЛА CropCam, который позволил создать цифровую модель местности, выделить незамерзающие участки, оценить площади, а также построить карту распределения снежного покрова. Исследование поступления газа в атмосферу в результате развития термокарста показывает, что в ходе работы могут быть решены задачи, связанные с выявлением и картированием поверхностных газопроявлений, наблюдаемых в воде и донных отложениях термокарстовых озер, посредством съемки ДПЛА в комплексе с космосъемкой. С помощью летательных аппаратов получено большое количество цифровых данных об активности гравитационных процессов. Особенно эффективно их применение в нефтегазовой промышленности при мониторинге опасных процессов в полосе нефтегазопроводов [Андреев, Беляева, Чабан, 2004; Detection and spatiotemporal ... , 2016].

Целесообразность применения ДПЛА в профиле геологических наук совместно с геоинформационным программным обеспечением состоит в получении высококачественных цифровых моделей местности и огромного массива качественных данных, обработка которых позволяет проводить исследования с наименьшим коэффициентом погрешности.

Объект и методы исследования

Объектом исследования являются бугры пучения, развивающиеся в днище долины р. Сенцы в ее нижнем течении на Окинском плоскогорье. Высотные отметки рельефа плоскогорья изменяются от 1800 до 2400 м над уровнем моря. Эрозионный врез Сенцы, являющейся притоком р. Оки, имеет глубину 800 м. Долина Сенцы представляет собой классический трог с

элементами ледникового рельефа в виде боковых и конечных морен позднеплейстоценового возраста. Меандрирующее русло реки и большое количество стариц и озер свидетельствуют о перегруженности долины осадочным материалом (рис. 1). Отложения аллювиального, озерного, гляциального, делювиального и пролювиального генезиса, выполняющие долину реки, представлены суглинками, супесями, песками, галечниками, валунами. Мелкозернистые отложения, формировавшиеся в озерных котловинах и речной долине при низких скоростях течения воды, явились благоприятной средой для активизации процессов пучения поверхности поймы и террасы Сенцы в период многолетнего промерзания [Литология и строение бугров ... , 2017].



Рис. 1. Долина р. Сенцы

Аэрофотосъемка выполнена с помощью ДПЛА (DJI Inspire 1 pro), оснащенного камерой для получения аэрофотоснимков с разрешением 3840×2160 пикселей. Полеты были запрограммированы при помощи DJI GO. Высота съемки составила 100 м над земной поверхностью, а перекрытие фотографии – 80 %. Подробное описание квадрокоптера приведено на сайте <http://www.dji.com>.

Генерация ортотрансформированных фотографий, полученных во время полетов, в цифровую модель местности была выполнена с помощью специального программного обеспечения. Эта программа выравнивает фотографии, используя алгоритм SfM (Structure from Motion) [Ullman, 1979], который идентифицирует характерные точки, полученные с фотографий, и отслеживает их движение по всем имеющимся изображениям. Оценка положения камеры является одним из основных компонентов в SfM [Assessment and integration ... , 2010] и осуществляется в три этапа. Первый этап включает в себя создание трехмерной точки, представляющей геометрию исследуемой территории; определение относительного положения камеры в

момент получения изображения и внутренних параметров калибровки (фокусное расстояние, положение опорной точки, три радиальных и два тангенциальных коэффициента искажения). Первые шаги обработки позволяют оценить параметры калибровки и не требуют применения дополнительной калибровки камеры и оптики на стадии получения изображения [Verhoeven, 2011]. Второй этап состоит в создании плотного облака точек. При проведении съемки в прибрежной зоне большую часть изображений покрывает вода, которая должна быть исключена из рассмотрения путем ручного удаления облака точек воды с фотографии. На третьем этапе алгоритм работает по значениям пикселей при построении большинства геометрических деталей. Все пиксели используются в алгоритме реконструкции MVS (Multi-view Stereo) [Scharstein, Szeliski, 2002; Comparison and evaluation ... , 2006]. Программное обеспечение, применяемое в этом алгоритме, основано на передовых компьютерных знаниях, которые позволяют создавать высококачественные ортофотоснимки и трехмерные модели из серии перекрывающихся аэрофотоснимков [Verhoeven, 2011]. Далее полученные данные экспортируются в ГИС-программу с открытым кодом QGIS (<https://www.qgis.org/>), в которой проводится оценка морфологических изменений рельефа и темпов роста или разрушения бугров пучения.

Для проверки точности построения модели рельефа использован электронный тахеометр (Trimble TS635), который позволяет проводить замеры координат, высот труднодоступного или недоступного объекта; вычисление необходимых величин; вынос на местность проектных точек и т. д. Максимальная дальность измерения со стандартной призмой составляет 5000 м, точность измерения варьируется в пределах $\pm(10+5 \text{ ppm} * D)$ мм. Станция тахеометра Trimble TS635 устанавливалась с использованием обратной засечки на известные точки с высотной и GPS-привязкой, что позволило отснять исследуемый участок с пяти разных направлений и выделить все элементы рельефа с высокой точностью, а также определить их превышение. На участке площадью 0,13 км² было записано более 1200 точек разной степени детальности – разреженно на выровненных участках рельефа и более густо в приграничных участках. Каждая точка записывалась в виде координат X, Y, Z , что в дальнейшем позволило перевести данные в электронный вид для построения трехмерной модели рельефа при помощи программ AutoCAD и Surfer. Съемку осуществляли в пределах участка, отражающего все морфологические особенности обширного развития бугров пучения. Также на выбранном участке была заложена сеть реперов. Частью реперов являются скважины, пробуренные для установления строения разреза и мониторинга температурного режима грунтов. Привязка GPS-приемника Garmin eTrex 20 (www.garmin.ru) к измеряемому рельефу, плановым и высотным координатам была необходима для сопоставления с результатами съемок ДПЛА. Увязка модели, построенной с помощью тахеометра, с цифровой моделью по результатам аэрофотосъемки реализована в программе QGIS.

Результаты исследования

Выполненная работа является частью большого исследования эволюции криогенных процессов Восточного Саяна, начавшегося в 2011 г. Основная задача – выявление закономерностей формирования и динамики бугров пучения в долине р. Сенцы.

В результате экспедиционных работ получена серия высококачественных снимков, проведена их цифровая обработка. По данным дешифрованного ортофотоплана и геодезической съемки, выполненной при помощи тахеометра, выявлено, что высотные отметки изменяются от 1381,0 до 1390,4 м. абс., а превышение между точками составляет 9,4 м. На участке выделяются два полигона, включающие в себя серию бугров пучения.

Первый полигон покрыт лесным массивом, что оказывает сильное влияние на развитие геокриологических процессов, граничит со старичными озерами с северо-востока и запада, а также с Сенцей на юге. Превышение от бровки террасы реки до эпикальной части бугра пучения составляет 6,5 м. Второй полигон представлен открытой поверхностью, ограниченной с запада старичным озером, которое в период поднятия уровня более чем на 1 м соединяется с р. Сенцей. Высота самого крупного бугра пучения относительно бровки равна 5,1 м (рис. 2). Дополнительно при дешифрировании ортофотоплана был рассчитан площадной коэффициент пораженности участка [Comparison and evaluation ... , 2006], который составил 0,4, что соответствует высокой степени пораженности процессом пучения данной территории.

Для анализа литологического строения на участке исследования были пробурены и задокументированы четыре скважины, более 10 шурфов и расчисток. По данным лабораторных исследований, выполненных в Институте земной коры СО РАН, бугры пучения имеют сходную морфологию и строение. В целом бугры пучения сложены пылеватыми слабокарбонатными светло-коричневыми суглинками, ниже глубины слоя сезонного протаивания разрез представлен мерзлыми пылеватыми суглинками со шлирами льда мощностью до 5–7 мм. В интервале 1,4–2,1 м вскрыт ледогрунт с прослоями пылеватого серо-коричневого суглинка. Ледяные шлиры прозрачные, криотекстура керна в основном массивная и крупношлировая. Ледогрунт с прослоями тяжелого серо-голубого суглинка зафиксирован на глубине 6,5 м. В разрезе лед – от прозрачного до молочно-белого, криотекстура в основном слоистая со шлирами льда от 1 до 5 см [Литология и строение бугров ... , 2017].

Климат в долине р. Сенцы резко континентальный. Среднегодовая температура воздуха изменяется от –2,7 до –6,4 °С. Температура воздуха в годовом цикле варьируется от –39,9 до 22,8 °С. Протаивание грунтов начинается во второй половине апреля. Мощность сезонно-талого слоя в пределах бугров пучения составляет 1,0–1,5 м. Промерзание отложений начинается в первой половине октября и заканчивается во второй половине ноября. Происходит смыкание слоя сезонного промерзания и кровли многолетнемерзлых пород. Таким образом, активное разрушение (деградация) бугров возможна со второй половины апреля и до конца ноября. Для наблюдения динамики этого процесса на участке в пределах первого полигона был органи-

зован пункт, представляющий собой профиль между двумя закрепленными реперами. Первый репер заложен в эпикальной части бугра, второй – на надпойменной террасе реки, не подверженной процессу пучения. Предварительные результаты наблюдений показали, что за период 2017–2018 гг. произошло незначительное оседание бугра пучения.

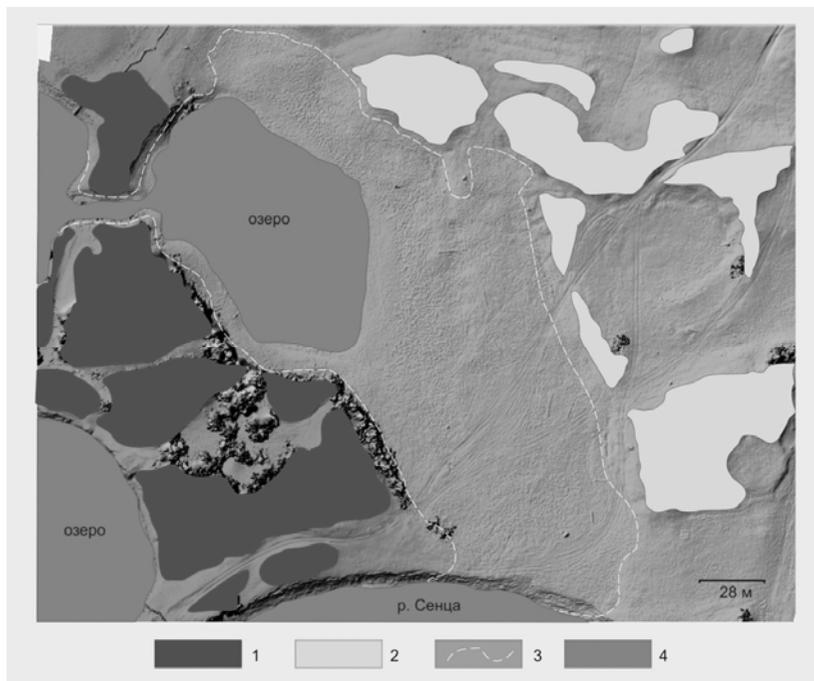


Рис. 2. Карта ключевого участка:

- 1 – бугры пучения полигона I, 2 – бугры пучения полигона II,
3 – граница затопляемой части террасы при паводке, 4 – водные объекты

Дополнительным процессом, разрушающим бугры пучения, является боковая эрозия р. Сенцы. Для фиксации динамики также были заложены шесть реперов и построены два профиля. В результате наблюдений установлено, что береговая линия отступает на 0,31 м в год (рис. 3) Довольно быстрому отступанию бровки террасы способствуют два фактора.

Первый фактор – это термодинамический режим многолетнемерзлых пород, связанный с современным изменением климата. С 2015 по 2018 г. среднегодовая температура на глубине 1,0 м имеет положительный тренд, который повысился с $-1,1$ до $-0,6$ °С. Положительно направленный тренд температуры пород указывает на современное изменение климата. На глубине 1,0 м создаются условия для образования таликовых участков, что приведет к последующей деградации многолетнемерзлых грунтов и соответствующему оседанию бугров пучения. Наиболее подвержены деградации мерзлые пылеватые супеси и суглинки со шлирами льда до 5–7 мм. Весьма интересны суглинки среднепылеватые, вскрытые на глубине 2,4 м, имею-

щие контакт с кровлей хорошо сортированного мелкозернистого песка. При оттаивании суглинков естественная влажность W достигает 78 %, что обеспечивает сильное увлажнение и переход суглинков в текучее состояние ($IL = 13,1$), особенно на границе с песком. Это приводит к сплыванию отложений к урезу реки, а также образованию блоков отседания в уступе террасы.

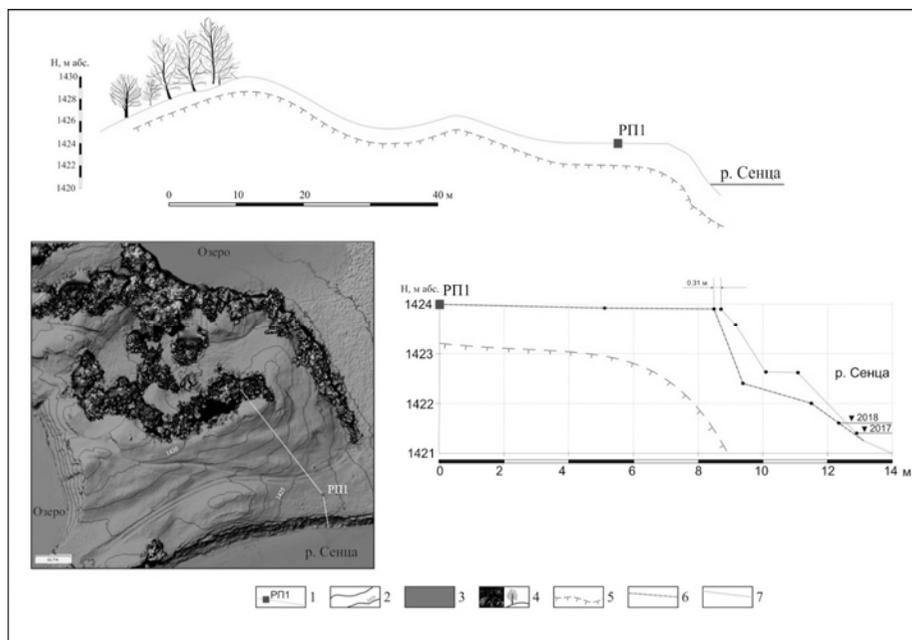


Рис. 3. Профиль по наблюдению за отступанием бровки берега р. Сенцы в пределах полигона I: 1 – репер; 2 – изолинии; 3 – водные объекты; 4 – растительность (лиственный лес); 5 – положение кровли мерзлых грунтов на 14.07.2018; профиль (инструментально измеренный) берега р. Сенцы: 6 – в 2017 г., 7 – в 2018 г.

Вторым фактором, который усиливает темпы отступления береговой линии, являются паводки в летний период, вызванные проливными дождями. Инструментально было установлено, что уровень реки за сутки поднимается на 0,52 м при продолжительности дождя около 12 ч. Поднимаясь, вода активно размывает оттаявшие отложения, находящиеся как в увлажненном, так и сухом ($W = 7\%$) состоянии, поскольку время размокания в среднем не превышает 4 ч. Мощность слоя сезонного протаивания береговой полосы контролируется боковой эрозией реки вдоль бугров пучения.

Заключение

В результате проведенных исследований с помощью наземных (тахеометр Trimble TS635 и дальномер Leica DISTO 510) и дистанционных (ДПЛА DJI Inspire 1 pro) инструментов были получены и сопоставлены данные по морфометрии территории. В итоге выполненных съемок были охарактеризованы компоненты ландшафта долины нижнего течения р. Сенцы, выделены процессы пучения грунта, а также оконтурены термокарстовые озера,

бровка берега реки и ее отложения. С помощью данных, полученных ДПЛА, построена цифровая модель ключевого участка, на которой оконтурены фрагменты бугров пучения и водные объекты. Рассчитана пораженность буграми пучения изученной территории. По результатам тахеометрической съемки построена карта рельефа местности, а по результатам нивелирной съемки – поперечные профили между буграми и рекой.

Бесспорные преимущества съемки с ДПЛА по сравнению с космической заключаются в максимальном разрешении полученных снимков, оперативной обработке данных *in situ*. Полеты в высокогорных районах могут осложняться быстрым изменением метеорологических условий. Несмотря на эти ограничения, данное исследование показывает, что дистанционно пилотируемые аппараты в сочетании с наземными морфометрическими методами могут быть успешно использованы в процессе изучения ландшафтов и процессов, их формирующих.

Дальнейшие мониторинговые исследования, обработка и накопление сезонных ортофотопланов ключевого участка позволят не только оценить темпы разрушения бугров пучения, но и дать прогнозную оценку распространения и развития различных процессов на данной территории. Экономически выгодная стоимость полета позволяет проводить измерения два раза в год и более, что обеспечивает получение оперативных количественных данных.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Иркутской области в рамках научного проекта № 20-45-380002 p_a.

Авторы выражают благодарность главному инженеру ИЗК СО РАН А. В. Дубынину за помощь в выполнении экспедиционных работ.

Список литературы

Андреев Г. Г., Беляева Н. В., Чабан Л. Н. Комплексное использование материалов космической и аэрофотосъемки в геоинформационных технологиях экологического мониторинга труднодоступных территорий Сибири и Крайнего Севера // Исследование Земли из космоса. 2004. № 4. С. 63–72.

Классификация БПЛА и системы их интеллектуального управления / С. И. Федоров, А. В. Хаустов, Т. М. Крамаренко, В. С. Долгих // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2016. № 74. С. 12–21

Литология и строение бугров пучения в долине р. Сенца (Окинское плоскогорье, Восточные Саяны) / С. В. Алексеев, Л. П. Алексеева, А. А. Светлаков, Е. А. Козырева, Ю. К. Васильчук // Арктика и Антарктика. 2017. № 2. С. 136–149. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23037>

Общие виды и характеристики беспилотных летательных аппаратов : справ. пособие / А. Г. Гребеников, А. К. Мяслица, В. В. Парфенюк, О. И. Парфенюк, С. В. Удовиченко. Харьков : Харьков. авиац. ин-т, 2008. 377 с.

Полякова Е. В., Игловский С. А. Особенности распределения снежного покрова в субарктическом гидротермальном урочище Пымвашор (Архангельская область) // Лед и снег. 2012. № 2. С. 76–80.

Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring / M. D. Harley, I. L. Turner, A. D Short, R. Ranasinghe // Coastal Engineering. 2010. Vol. 58. P. 194–205. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.09.006>

Comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms / S. Seitz, B. Curless, J. Diebel, D. Scharstein, R. A. Szeliski // *Vision and Pattern Recognition: computer Society Conf Computer*, In: Proc CVPR '06 I. E. Washington, DC. : IEEE Computer Society. 2006. Vol. 1. P. 519–526. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.19>

Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using highresolution optical aerial imagery / P. R. Lindgren, G. Grosse, K. M. Walter Anthony, F. J. Meyer // *Biogeosciences*. 2016. Vol. 13, N 1. P. 27–44. <https://doi.org/10.5194/bg.13.27.2016>

Scharstein D., Szeliski R. A. Taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms // *International Journal of Computer Vision*. 2002. Vol. 47. P. 7–42. <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>

Ullman S. The interpretation of structure from motion // *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 1979. Vol. 203. P. 405–426. <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>

Verhoeven G. Taking computer vision aloft-archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan // *Archaeological Prospection*. 2011. Vol. 18. P. 67–73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>

The Use of Drones to Investigate the Cryogenic Landforms of the Sentsa River Valley, the Oka Plateau

V. A. Pellinen, A. A. Svetlakov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russian Federation

Abstract. Research has been conducted on the permafrost in the Sentsa River valley. The paper considers the use of direct (total station) and remote (aerial photography) methods for studying cryogenic landforms. Morphometric measurements were performed on a key site using total station survey. The influence of the level regime of the Sentsa river on the dynamics of the landform relief is noted. Deciphering the images obtained using unmanned aerial vehicles (UAVs) made it possible to establish morphometric changes in the heaving hillocks, and the area affected by the cryogenic process was calculated in the form of the percentage of heaving-free areas to the total area of the key site. From the surface the frost mound consists of inter-layering silts, ice-rich clayey silts and pure ice lenses, cryostructures are layered, cross-laminated, lenticular, reticulate and basal. On one of the large frost mound in the Sentsa River valley the borehole was drilled to a several wells for the regime geothermal observations. Conclusions about the using UAVs for the study of cryogenic terrain represented.

Keywords: cryogenic processes, cryogenic relief, frost mounds, RPV.

For citation: Pellinen V.A., Svetlakov A.A. The Use of Drones to Investigate the Cryogenic Landforms of the Sentsa River Valley, the Oka Plateau. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2020, vol. 31, pp. 58-67. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2020.31.58> (in Russian)

References

Andreyev G.G., Belyayeva N.V., Chaban L.N. Kompleksnoye ispolzovaniye materialov kosmicheskoy i aerofotosyemki v geoinformatsionnykh tekhnologiyakh ekologicheskogo monitoringa trudnodostupnykh territoriy Sibiri i Kraynego Severa [Complex using materials of space and aerial photography in geo-information technologies of environmental monitoring of remote areas of Siberia and the Far North]. *Issledovaniye Zemli iz kosmosa* [Study of Earth from Space], 2004, no. 4, pp. 63-72. (in Russian)

Fedorov S.I., Khaustov A.V., Kramarenko T.M., Dolgikh V.S. Klassifikatsiya BPLA i sistemy ikh intellektual'nogo upravleniya [Classification of UAVs and their intelligent control systems]. *Otkrytyye informatsionnyye i komp'yuternyye integrirovannyye tekhnologii* [Open information and computer integrated technologies], 2016, no. 74, pp. 12-21. (in Russian)

Alekseyev S.V., Alekseyeva L.P., Svetlakov A.A., Kozyreva Ye.A., Vasil'chuk Yu.K. Litologiya i stroyeniye bugrov pucheniya v doline r. Sentsa (Okinskoye ploskogor'ye, Vostochnyye Sayany) [Lithology and the structure of heaving bumps in the valley of the river.

Sentsa (Okinsky Plateau, Eastern Sayan Mountains)]. *Arktika i Antarktika* [Arctic and Antarctic], 2017, no 2, pp. 136-149. (in Russian) <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2017.2.23037>

Grebenikov A.G., Myalitsa A.K., Parfenyuk V.V., Parfenyuk O.I., Udovichenko S.V. *Obshchiye vidy i kharakteristiki bespilotnykh letatel'nykh apparatov. Sprav. posobiye* [General types and characteristics of unmanned aerial vehicles. Right allowance]. Kharkov, Kharkov Aviation Institute Publ., 2008, 377 p. (in Russian)

Polyakova Ye.V., Igllovskiy S.A. Osobennosti raspredeleniya snezhnogo pokrova v subarkticheskom gidrotermalnom urochishche Pymvashor (Arkhangelskaya oblast) [Features of the distribution of snow cover in the subarctic hydrothermal tract Pymvashor (Arkhangelsk region)]. *Led i sneg* [Ice and snow], 2012, no. 2, pp. 76-80. (in Russian)

Harley M.D., Turner I.L., Short A.D., Ranasinghe R. Assessment and integration of conventional, RTK-GPS and image-derived beach survey methods for daily to decadal coastal monitoring. *Coastal Engineering*, 2010, vol. 58, pp. 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.09.006>

Seitz S., Curless B., Diebel J., Scharstein D., Szeliski R. A. Comparison and evaluation of multi-view stereo reconstruction algorithms. *Vision and Pattern Recognition: computer Society Conf Computer. Proc CVPR '06 I.E.* Washington, DC., IEEE Computer Society, 2006, vol. 1, pp. 519-526. <https://doi.org/10.1109/CVPR.2006.19>

Lindgren P.R., Grosse G., Anthony K.M. Walter, Meyer F.J. Detection and spatiotemporal analysis of methane ebullition on thermokarst lake ice using highresolution optical aerial imagery. *Biogeosciences*, 2016, vol. 13, no. 1, pp. 27-44. <https://doi:10.5194/bg.13.27.2016>

Scharstein D., Szeliski R.A. Taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. *International Journal of Computer Vision*, 2002, vol. 47, pp. 7-42. <https://doi.org/10.1023/A:1014573219977>

Ullman S. The interpretation of structure from motion. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1979, vol. 203, pp. 405-426. <https://doi.org/10.1098/rspb.1979.0006>

Verhoeven G. Taking computer vision aloft-archaeological three-dimensional reconstructions from aerial photographs with PhotoScan. *Archaeological Prospection*, 2011, vol. 18, pp. 67-73. <https://doi.org/10.1002/arp.399>

Пеллинен Вадим Александрович

кандидат геолого-минералогических наук,
младший научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128
e-mail: vadim.a.pellinen@yandex.ru

Pellinen Vadim Alexandrovich

Candidate of Sciences (Geology
and Mineralogy), Junior Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: vadim.a.pellinen@yandex.ru

Светлаков Артем Александрович

кандидат геолого-минералогических наук,
научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
Россия, 664033, г. Иркутск,
ул. Лермонтова, 128,
e-mail: sir.swetlackov@yandex.ru

Svetlakov Artem Aleksandrovich

Candidate of Sciences (Geology
and Mineralogy), Scientific Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033,
Russian Federation
e-mail: sir.swetlackov@yandex.ru

Коды научных специальностей: 25.00.34, 20.00.25

Дата поступления: 14.12.2019

Received: December, 14, 2019