

ИНЖЕНЕРНАЯ ГЕОЛОГИЯ, МЕРЗЛОТОВЕДЕНИЕ И ГРУНТОВЕДЕНИЕ

Научная статья

УДК 528.7, 528.952, 625.7

doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.001

ПРИМЕНЕНИЕ АЭРОФОТОСЪЕМКИ И ВОЗДУШНОЙ ЛИДАРНОЙ СЪЕМКИ ДЛЯ ОТСЛЕЖИВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ РОВНОСТИ ДОРОЖНОГО ПОЛОТНА В АРКТИЧЕСКИХ УСЛОВИЯХ

*Руслан Михайлович Ильясов¹, Владислав Евгеньевич
Пушкарев², Кирилл Александрович Плесовских³*

^{1, 2, 3}Научный центр изучения Арктики, Салехард, Россия

¹frandy@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9071-8574>

²vladpuskr@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4713-209X>

³plesovskih.ka@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0000-0631-7656>

Аннотация. При исследовании состояния дорожного покрытия в арктических условиях была применена новая методика получения и обработки информации с помощью аэрофотосъемки и воздушного лазерного сканирования. Информация об изменениях дорожного полотна в арктических условиях в современных исследованиях раскрыта недостаточно. Результаты воздушного лазерного сканирования позволяют получить подробную информацию об изменениях дорожного полотна в условиях арктической лесотундры. Для проверки возможностей воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки дорожного полотна был выбран 250-метровый участок дороги Салехард – Надым вблизи города Салехарда. При использовании данного метода была получена цифровая модель местности дороги. Эта модель помогла определить неровности дорожного покрытия. Исследования позволили получить подробную информа-

цию о местонахождении провалов на изучаемых поверхностях дороги с точностью до дециметра.

Ключевые слова: аэрофотосъемка (АФС), высотная лидарная съемка (ВЛС), лазерная съемка, облако точек, ортотрансформирование, 3D-модель, БПЛА, лесотундра, автомобильная дорога Салехард – Надым, Ямало-Ненецкий автономный округ.

Цитирование: Ильясов Р.А., Пушкарев В.Е., Плесовских К.Е. Применение аэрофотосъемки и воздушной лидарной съемки для отслеживания изменений ровности дорожного полотна в арктических условиях // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа. 2023. (120). № 3. С. 6-18. doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.001

Original article

USING OF AERIAL PHOTOGRAPHY AND AERIAL LIDAR MAPPING TO TRACK CHANGES IN ROAD EMBANKMENT IN ARCTIC

Ruslan M. Ilyasov¹, Vladislav E. Pushkarev², Kirill A. Plesovskikh³

^{1, 2, 3}Arctic Research Center, Salekhard, Russia

¹frandly@mail.ru <https://orcid.org/0000-0001-9071-8574>

²vladpuskr@mail.ru <https://orcid.org/0000-0002-4713-209X>

³plesovskih.ka@yandex.ru <https://orcid.org/0009-0000-0631-7656>

Abstract. When studying the structure of the road surface in arctic conditions, a new technique for receiving and processing information using aerial photography and airborne laser radiation was applied. Information about changes in the road surface in arctic conditions in low light conditions. The results of airborne laser exposure provide detailed information about changes in the roadway in the conditions of the Arctic forest tundra. To test the possibility of using ground-based laser equipment and aerial photography on the Salekhard-Nadym road, a site was selected in the Priuralsky district, near the city of Salekhard, 250 meters long. A method for obtaining a digital terrain model and a road with decimeter memory is given. These models help to determine the unevenness of the road surface. Studies have revealed detailed information about the location

of accidents on the studied fires on the roads with a probability of up to a decimeter.

Keywords: aerial photography (AFS), high-altitude lidar survey (HLS), point cloud, orthorectification, 3D model, UAV, Salekhard-Nadym highway, Yamalo-Nenets Autonomous Okrug.

Citation: R.M. Ilyasov, V. E. Pushkarev, K. A. Plesovskikh Using of aerial photography and aerial lidar mapping to track changes in road embankment in Arctic // Scientific Bulletin of the Yamal-Nenets Autonomous District. 2023. (120). № 3. P. 6-18. Doi: 10.26110/ARCTIC.2023.120.3.001.

Введение

Использование технологий аэрофотосъемки (АФС) и воздушного лидарного сканирования (ВЛС) на беспилотных летательных аппаратах становится все более популярным в картографии и геодезии, а с появлением за последние 5 лет относительно доступных для приобретения датчиков типа DJI Zenmuse L1 на российском рынке создало целое научное сообщество исследователей и специалистов, занимающихся обработкой, оптимизацией и улучшением качества получаемых данных. Среди множества исследовательских задач использование этих технологий большей частью концентрируется в промышленной картографии и геодезии, связанных с управлением территориями, кадастром, землепользованием и мониторингом строительства [1, 2]. В данной статье предлагается рассмотреть использование данных АФС и ВЛС в относительно новой для данной методики сфере отслеживания состояния уже имеющегося дорожного покрытия.

Целью статьи является обсуждение и подведение результатов использования нового метода сбора и обработки полевых данных с помощью воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки при исследовании ровности участка дорожного покрытия длиной 250 метров.

Основные задачи исследования:

1. Апробировать особенности применения воздушного лазерного сканирования в лесотундровой зоне с линейными инфраструктурными элементами местности.
2. Рассмотреть возможности использования аэрофотосъемки и воздушной лазерной съемки в контексте мониторинга изменений дорожного полотна.
3. Проанализировать преимущества и недостатки применения АФС и ВЛС данных при измерении ровности дорожного полотна.
4. Определить оптимальные способы проведения аэрофотосъемки и

воздушного лазерного сканирования для анализа ровности дорожного полотна.

5. Выявить геометрические характеристики и наличие деформаций автомобильной дороги и их местоположения с помощью АФС и ВЛС с дециметровой точностью.

6. Предложить рекомендации по необходимости проведения ремонтных работ дорожного покрытия.

Материалы и методы

В ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (далее – Научный центр) как в процессе апробации, так и в постоянной научно-исследовательской работе технология АФС с БПЛА применяется с начала 2016 г. для решения различных задач, таких как авиаучет гнездовых территорий стерхов, пространственная оценка изменений водных объектов, определение ландшафтных характеристик, рекогносцировочное обследование местности и др.

Апробация новой методики воздушной лазерной съемки с БПЛА в Научном центре была применена в 2023 г. в целях геотехнического мониторинга автомобильной трассы Салехард – Надым. Предварительно было проведено 7 обследований различных проблемных участков дороги. Для обсуждения и подведения предварительных результатов использования нового метода в целях оптимизации рабочего времени для примера был выбран самый ближайший и менее трудоемкий участок дороги в районе г. Салехарда (рис. 1).

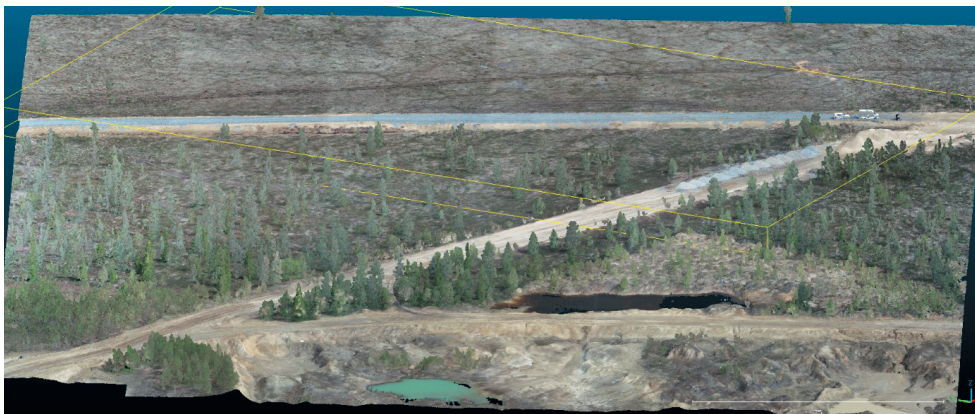


Рис. 1. Облако точек участка съемки, полученное с помощью лидар L1 в цветовой кодировке RGB

Исследуемый участок дороги находится на лесотундровых возвышенных равнинах. Местность сложена кустарничково-моховой тундрой и ело-

во-лиственничным редколесьем с задернованной и заболоченной почвой. В ходе предварительной площадной съемки на заболоченных участках в восточной части дороги был обнаружен полигонально-жильный рельеф (рис. 2 и рис. 3), согласно которому мы можем предположить, что в районе дороги происходят криогенные деформации: растрескивание сезонно мёрзлого слоя [3].

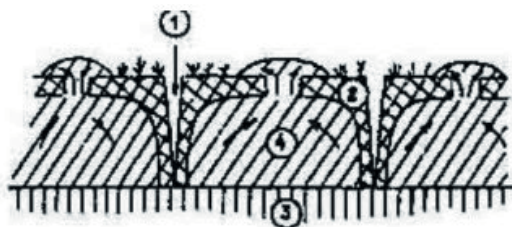


Рис. 2. Схема миграции воды и сортировки обломочного материала:
1 – трещина в сезонномерзлом слое; грунт: 2 – сезонномерзлый,
3 – вечномерзлый, 4 – талый [3]



Рис. 3. Общий вид в надир ортотрансформированного изображения участка съемки

Для получения данных проводилась АФС и ВЛС съемка с помощью беспилотного летательного аппарата Matrice 300¹ с полезной нагрузкой Zenmuse L1 и P1 35mm. Для исследования состояния дорожного покрытия целью применения АФС и ВЛС было получение высокоточных пространственных изображений поверхности исследуемой территории участка с минимально на это затраченным временем. На практике трёх

¹Учётный номер J068087.

предварительных заверочных съемок было выявлено, что полученные облака точек лазерного сканирования и ортотрансформированные данные с высокой степенью разрешения (1,91 см/пиксель) дают возможность обнаружения плановых изменений дорожного полотна в подробных (дециметровых) пространственных масштабах.

Пролёты БВС (беспилотное воздушное судно) были проведены согласно Федеральным правилам использования воздушного пространства Российской Федерации [4] и согласно краткой информации Росавиации о требованиях российского законодательства в части использования воздушного пространства [5]. Полёты осуществлялись на высоте до 50 метров, в светлое время суток, в прямой видимости оператором, вне диспетчерских зон и населённых пунктов. Было осуществлено два полёта не более 10 минут с 30-минутным интервалом по предварительно заданному маршруту. Осуществление двух полётов было продиктовано необходимостью замены полезной нагрузки для АФС и ВЛС съёмки. Для примера, воздушная лазерная съёмка составила от начала взлёта до посадки 7 минут 50 секунд полётного времени. Общее расстояние полёта составило 2156 м по 5 галсов с поперечным перекрытием в 45% и с продольным в 70% над территорией площадью 7,9 га (рис. 4).



Рис. 4. Полётное задание для БПЛА над территорией исследования (7,9 га)

Первым направлением работы было создание ортотрансформированного изображения территории площадью 7,9 га в географической системе WGS 84 (EPSG: 4326) с качеством съёмки 1,91 см/пиксель. Для получения фотоматериала полёт осуществлялся в надир под углом 90° относительно поверхности земли на высоте 50 м. Полёт составил 8 мин. 42 сек., общее расстояние полёта — 4008 м по 11 галсов в поперечном

перекрытии 70% и в продольном 80%, с фокусным расстоянием 35 мм на камеру DJI Zenmuse P1 и фиксированным решением GNSS-приёмника, что дало возможность после обработки изображений в программе DJI Terra получить дециметровую точность геопозиционирования. Наземных марок для получения опорных точек не предусматривалось, однако контрольными точками послужили полученные GNSS-приёмником наборы пикетажа и отбивка контрольных точек участка дороги. Опорными точками были выбраны высококонтрастные и хорошо заметные объекты на дороге, при этом учитывался триангуляционный метод геодезической съёмки. Полученная реконструкция изображения территории была валидирована в Agisoft metashape с сетью полученных геодезических контрольных точек. Объем полученных данных фотоизображения составил 1,6 Гб [6]. Работа по созданию цельного ортотрансформированного изображения была разбита на 3 этапа [7, 8].

Этап 1. Цветокоррекция. Коррекция контраста и выравнивание цвета растрового изображения (при недостаточности качества полевых материалов) в графическом редакторе без потери геопространственной привязки. Данная работа проводилась с целью приближения объектов на карте к реальной, но не менее контрастной цветопередаче, обеспечивающей различие объектов (корректировка баланса светотени), выравнивание цветов (чтобы в отдельных цветовых категориях было минимальное значение посторонних оттенков) и баланс светотени. Необходимость исправления данных недостатков возникает в результате низкой цветопередачи в пасмурную погоду или избыточного контраста при солнечной. Как правило, это происходило на ровной или относительно одноцветной в видимом излучении поверхности и выражалось в потере резкости объекта и его текстур (исчезновение валунов на песчаном раздуве, потеря резкости контура ржавой бочки на поверхности тундры, сглаживание текстур на относительно гладкой поверхности и т.п.).

Этап 2. Построение изображения поверхности местности в фотограмметрической системе DJI Terra. Данная работа проводится с целью реконструкции аэротриангуляции для последующей её валидации с сетью полученных геодезических контрольных точек на местности. Стоит подчеркнуть, что в отличие от «PHOTOMOD Lite» 6 или Agisoft Metashape добавить в ручном режиме связующие и опорные точки невозможно, программа делает всё автоматически. По окончании работы формируется единое геопривязанное изображение для дальнейшей компоновки и анализа в ГИС [9, 10].

Этап 3. Создание макета карт в геоинформационной системе. На завершающем этапе были выявлены площадные характеристики автодороги на основе ортофототрансформированного изображения, проводилась компоновка полученной мозаики растрового изображения с уже имеющимися

пространственными данными в виде векторной графики (границы, точки, полигоны), были классифицированы дорожные объекты [11, 12].

Вторым направлением работы было создание трехмерной реконструкции исследуемой территории, а также создание плотного облака точек путем воздушной лидарной съемки. Для этого потребовалось 2,2 гигабайта цифровой памяти. Воздушная лидарная съемка выполнялась в надири, под углом 90 градусов к поверхности, на высоте 50 метров.

Данные АФС были реконструированы с помощью программы DJI Terra в облако точек, далее облако точек было обработано и проанализировано в программном обеспечении CloudCompare. На участках без фиксированного решения GNSS-приёмник устанавливался в статическом режиме и независимо от АФС записывал корректирующую информацию геопозиционирования для дальнейшей постобработки и определения дециметровой точности координат.

Результаты исследования и их обсуждение

При загрузке облака точек в CloudCompare первоочередным предустановленным типом отображения метаданных полученного облака точек в 3D-расширении LAS является диапазон скалярного значения лазерного сканирования и данные видимого спектра облака точек в кодировке RGB (рис. 5). Диапазон лазерного сканирования характеризует отраженный импульс волны в виде изображенного цветового градиента (рис. 4). Данный скалярный атрибут был полезен для контроля качества выполнения полетных заданий, их перекрытия и уточнения количества точек, полученных в результате сканирования поверхности, а также для определения различий отражающих характеристик различных участков поверхности. Согласно техническим характеристикам Zenmuse L1, при наилучших настройках и условиях скорость излучения одного импульса даёт возможность получить отражение 240 000 точек в секунду. Однако нами для оптимизации времени с минимальной потерей качества изображения были выставлены настройки с минимально возможным перекрытием и с максимально возможным количеством отраженных импульсов (три импульса) для определения слабо отражающейся подстилающей поверхности в лесной зоне, было задано 45%/70% перекрытия и повторяющееся сканирование в 160 КHz. Далее при соблюдении всех благоприятствующих условий полёта для съемки (высота, погода, поверхность местности и освещение) мы получили за 7 минут 50 секунд достаточно качественное для анализа ровности дороги плотное облако 54 731 461 точек на 12,5 га лесотундрового участка (рис. 5).

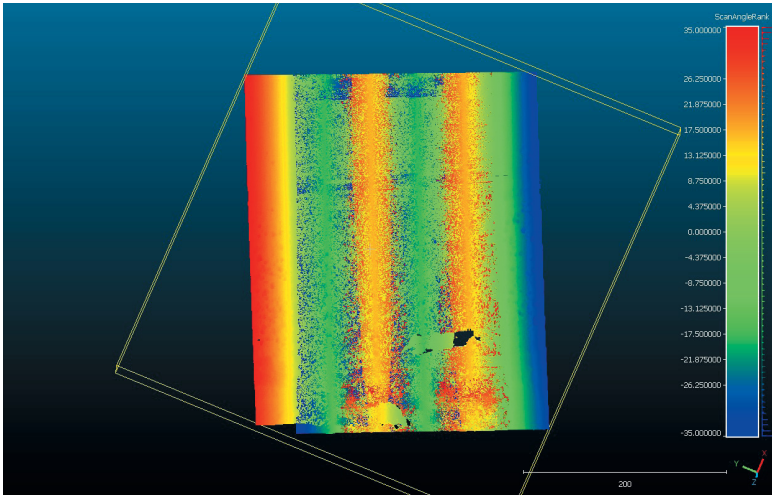


Рис. 5. Классификация угла лидарного сканирования относительно снимаемой поверхности для определения перекрытий и количества полётных галсов

После ручной фильтрации атмосферных шумов и удаления сорных участков с недостаточной плотностью точек на границах изображения нами была получена качественная модель территории в 10 га для дальнейшего пространственного анализа в 40 850 288 точек.

На основе полученной модели были заданы каждой точке дорожного полотна высотные характеристики путём экспорта координат высоты (z) в скалярное значение согласно их классификации по высоте в цветовом градиенте «Red-green-yellow-blue» в порядке увеличения значения высоты (рис. 6).

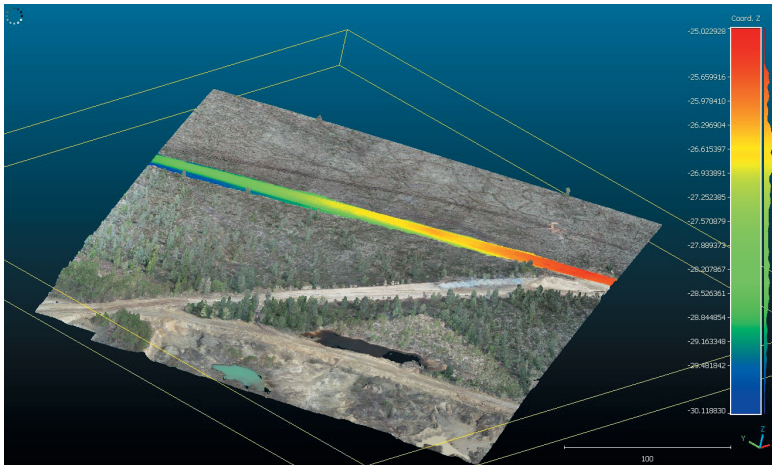


Рис. 6. Изображение высоты насыпи дороги в скалярном значении классификации точек по высоте в цветовом градиенте «Red-green-yellow-blue» (в порядке увеличения значения высоты)

При сравнительном анализе зафиксированных пространственных изменений в ходе полевых работ с пространственной моделью облака точек автодороги были валидированы незначительные отклонения со среднеарифметической ошибкой в 0,1 м. На основе небольшого отклонения можно констатировать, что на основе полученного облака точек мы можем определить наличие деформаций и их геометрические характеристики с дециметровой точностью.

При анализе значения общего перепада участка дороги, согласно полученным данным облака точек (рис. 5), был обнаружен максимальный перепад по оси дороги в 3,5 метра, что является отклонением от плановых значений данного участка дороги. Для определения поперечного перепада высот поверхности автомобильной дороги мы зафиксировали 4 интересующих нас сечения (где перепад наиболее значителен) в понижении (рис. 7 и 8).

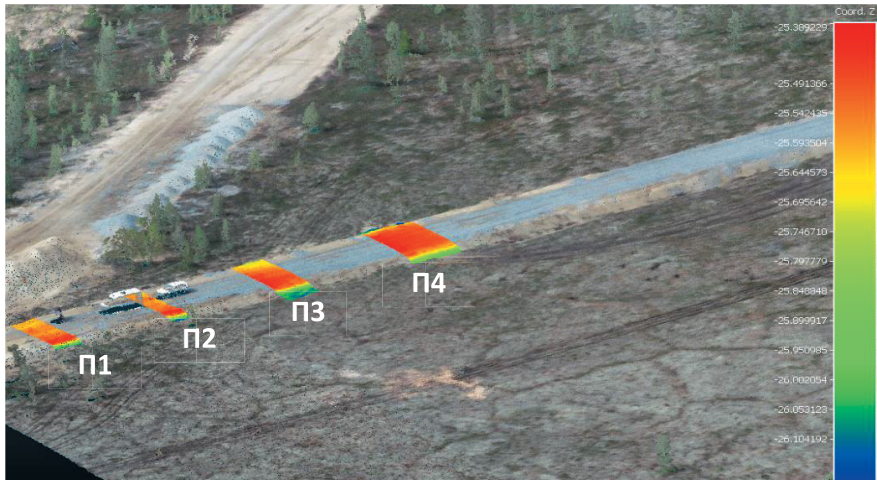


Рис. 7. Общий вид 4 участков поперечных профилей насыпи дороги

При оценке геометрических характеристик всех 4 профилей в поперечном сечении мы фиксируем перепад высот поверхности дороги в 30 см. И если рассматривать данный перепад относительно поперечного сечения плоскости поверхности дороги в трёхмерном пространстве, то можно утверждать, что формируется поперечная просадка, характеризующаяся кривизной плоскости дороги.

2. Госьков Е.А., Воробьева Т.С., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование в исследовании структуры древостоев верхней границы леса на южном Урале. Леса России и хозяйство в них. 2022. № 2 (81). С. 4-10.
3. Архипов С.А., Исаева Л.Л., Ивановский Л.Н., Суходровский В.Л., Гравис Г.Ф., Волков И.А., Коржуев С.С., Троицкий С.Л., Кулаков А.П., Андреева С.М., Земцов А.А., Мизеров Б.В., Файнер Ю.Б. Проблемы экзогенного рельефообразования. Книга 1. Рельеф ледниковый, криогенный, эоловый, карстовый и морских побережий. М., «Наука», 1976. 450 с.
4. Постановление Правительства РФ от 11.03.2010 № 138 (ред. от 02.12.2020) «Об утверждении Федеральных правил использования воздушного пространства Российской Федерации» (с изм. и доп., вступ. в силу с 09.06.2021).
5. Министерство транспорта Российской Федерации, федеральное агентство воздушного транспорта. Письмо от 14 июня 2017 г. № исх-13154/02 информация по безопасности полетов № 7. Приложение к письму.
6. Сизов О.С., Приходько Н.В., Зах В.А. Опыт применения беспилотных аэрофотосъемочных и батиметрических систем для реконструкции динамики уровня воды в Андреевской озерной системе (Тюменская область) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции. Ответственный редактор С.А. Макаров. 2018, Иркутск.
7. Приходько Н.В., Сизов О.С., Ильященко В.А., Зимица О.Ю. Опыт использования БПЛА (гексакоптер) для построения высокодетальных моделей рельефа в целях археологических исследований // Третья международная конференция «Археология и геоинформатика» Москва, 24–26 мая 2017 года.
8. Ильясов Р.М. Использование беспилотного летательного аппарата в оценке состояния экосистем Ямало-Ненецкого автономного округа // Связь климатических изменений с изменениями биологического и ландшафтного разнообразия Арктики и Субарктики. Тезисы докладов международного симпозиума. Отв. редактор А.Ю. Левых, ред. перевода Н.В. Ганжерли. Ишим, 2022.
9. Ильясов Р.М., Колесников Р.А. Практика использования беспилотных летательных аппаратов при проведении мониторинга водных объектов и их водоохранных зон // Научный вестник Ямало-Ненецкого автономного округа, Салехард, 3 (116), 2022, с. 97-110.
10. Шуваев А.Н., Панова М.В., Пушкарев В.Е., Плесовских К.А. Долговечность цементгрунта в Арктической зоне // Материалы национальной научно-практической конференции «Энергосбережения и инновационные технологии в ГЭК», ТИУ, Тюмень, 2020 г., с. 150-153.
11. Мошева В.В. Применение лазерного сканирования для оценки состояния сельскохозяйственных земель. // 2018.

12. Низаметдинов Н.Ф., Моисеев П.А., Воробьев И.Б. Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев хибин// 2021.
13. Тартаковская Мария Викторовна. Оценка лесных территорий с использованием данных лидарной съемки // Северный Арктический Федеральный Университет им. М.В. Ломоносова, г. Архангельск, 2022.

Сведения об авторах

Ильясов Руслан Михайлович в 2018 году окончил аспирантуру РГПУ им. А.И. Герцена. С 2016 года – ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики», научный сотрудник. Область научных интересов: геоэкология, ГИС, картография, геодезия, дешифрирование, методы использования беспилотных летательных аппаратов.

Плесовских Кирилл Александрович в 2021 году окончил Тюменский индустриальный университет по специальности «строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей». С 2021 года – ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард, Россия), младший научный сотрудник. Область научных интересов: строительство автомобильных дорог в криолитозоне, конструкции земляного полотна с применением геосинтетических материалов.

Пушкарев Владислав Евгеньевич в 2021 году окончил Тюменский индустриальный университет по специальности «строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей». С 2021 года – ГАУ ЯНАО «Научный центр изучения Арктики» (г. Салехард, Россия), младший научный сотрудник. Область научных интересов: строительство автомобильных дорог в криолитозоне, мониторинг автомобильных дорог с применением геофизических методов исследования.

Участие авторов

Ильясов Р.М. – сбор и обработка материала, работа с текстом.

Плесовских К.А. – сбор и обработка материала, работа с текстом.

Пушкарев В.Е. – сбор и обработка материала, работа с текстом.

Все соавторы – утверждение окончательного варианта статьи, ответственность за целостность всех частей статьи.

Статья поступила в редакцию 06.07.2023 г., принята к публикации 29.09.2023 г.

The article was submitted on July 6, 2023, accepted for publication on September 29, 2023.