

УДК 630.2

ОЦЕНКА ЕСТЕСТВЕННОГО ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ЛЕСА НА ГАРИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А. В. Кабонен¹, О. И. Гаврилова¹, А. В. Грязькин², К. А. Пак³

¹ Петрозаводский государственный университет
185086, Республика Карелия, Петрозаводск, просп. Ленина, 33

² Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С. М. Кирова
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У

³ Кареллеспроект, филиал ФГБУ «Рослесинфорг»
185035, Республика Карелия, Петрозаводск, ул. Дзержинского, 9

E-mail: alexkabonen@mail.ru, ogavril@mail.ru, lesovod@bk.ru, pak.ka@roslesinforg.ru

Поступила в редакцию: 21.11.2021 г.

Анализ успешности лесовозобновления после пожара – важнейшая задача лесного хозяйства. Для этих целей летом 2021 г. проведена аэрофотосъемка с квадрокоптера Phantom 4 pro 15-летней гари (2006 г.) по северо-западной границе Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия). Дополнительно к этому выполнено натурное обследование по учетным площадкам, где до лесного пожара произрастал сосняк скальный из сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.). Работы проводились с целью оценки состояния естественного возобновления после пожара по скальным выходам путем комбинирования обработки данных аэрофотосъемки с натурными обследованиями. В результате фотограмметрической обработки реконструирован ортофотоплан с пространственным разрешением 4.6 см на пиксель, карта высот и трехмерные облака точек. Для анализа распределения породного состава растительности по территории выполнено маркирование деревьев на ортофотоплане по учетным площадкам натурных обследований, в результате которого определено количественное распределение древесных пород в соотношении 64 % сосна обыкновенная и 23 % береза повислая (*Betula pendula* Roth) (остальные виды не идентифицировались). Натурные обследования показали, что после пожара сформировался жизнеспособный молодняк смешанного состава с преобладанием сосны обыкновенной (71 % от общего количества древесных пород). В формировании молодняков участвовали также береза повислая (22 %), осина обыкновенная (*Populus tremula* L.) и ольха серая (*Alnus incana* (L.) Moench) (по 3.5 %). При сравнении высоты растений на трехмерных облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить ее только для крупной общепринятой категории (> 1.5 м), при этом зависимость этого показателя, полученного разными методами, оказалась весьма значительна ($R^2 = 0.95$). Максимальная высота деревьев на исследуемом участке составила 6 м, а средние значения – от 3.5 до 4.5 м, что свидетельствовало об успешности лесовозобновления после гари на скальных выходах.

Ключевые слова: лесовозобновление, сосняк скальный, гарь, подрост, аэрофотосъемка, инвентаризация.

DOI: 10.15372/SJFS20220202

ВВЕДЕНИЕ

Согласно «Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года» (Распоряжение..., 2021), около 60 % площади погибших лесов связано с воздействием лесных пожаров. Данные обстоятельства актуализируют проведение детальных оценок послепожар-

ных территорий на предмет успешности лесовозобновления, что является важнейшей задачей лесного хозяйства.

Классический способ оценки успешности лесовозобновления – метод натурного наземного обследования (Uutera, Maltamo, 1995; Грязькин, 1997; Фетисова и др., 2013), достаточно трудоемкий и не всегда доступный для исполь-

зования на сильно захламленных и удаленных лесных участках, а также на участках большой площади (Беляева и др., 2012). Альтернативные способы, такие как дешифрирование космических снимков, на сегодняшний день недостаточно разработаны или ограничены небольшим пространственным разрешением и не позволяют в полной мере оценить качество лесовозобновления (Аковецкий, Афанасьев, 2020). Однако отдельные исследования показывают высокую точность (84 %) оценки успешности естественного лесовозобновления на вырубках по многолетним рядам мультиспектральных изображений со спутника Landsat, при использовании вегетационных индексов NDVI и SWVI (Белова, Ершов, 2015).

Применение беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) для учета подроста и анализа лесовозобновления позволяет существенным образом снизить трудозатраты в сравнении с натурным обследованием и получить важную информацию и снимки высокого пространственного разрешения в реальном времени (Никифоров, Мунимаев, 2010; Скуднева, 2014; Денисов и др., 2016; Осипенко и др., 2017; Дайнеко, 2018; Петушкова, Потапова, 2018; Neuville et al., 2021). В то же время оно имеет свои недостатки в сравнении со спутниковыми данными дистанционного зондирования: зависимость от погодных условий (сильный ветер, дождь, низкая температура) и малое покрытие территории съемки в связи с ограниченностью аккумуляторного ресурса (от нескольких минут до 3–4 ч).

Показано (Эпов, Злыгостев, 2012; Горохова и др., 2014; Галецкая и др., 2015; Вогель, Юфев, 2018), что при исследовании лесных территорий наиболее эффективно сочетание комбинированных методов исследований: применение БПЛА с последующей фотограмметрической обработкой данных и натурное обследование местности. При натурных обследованиях, как правило, закладываются круговые площадки площадью 10 м² с детальным описанием растительности, при этом их количество должно обеспечивать требуемую точность учета (Фетисова и др., 2013; Грязькин, 2000). Дальнейшее сопоставление результатов, полученных с учетных площадок, и картографических материалов высокого пространственного разрешения, позволяет достоверно охарактеризовать растительность на исследуемой территории.

Цель настоящей работы – дать сравнительную оценку состояния естественного возобновления леса на гари по скальным выходам в

условиях средней тайги путем сопоставления данных аэрофотосъемки с БПЛА с результатами натурного обследования.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Объект исследования – гарь 15-летней давности, образовавшаяся на месте выгоревших сосняков скальных по северо-западной границе Ботанического сада Петрозаводского государственного университета (Республика Карелия) (рис. 1). Площадь исследуемого участка составляет 30 га.

Кристаллический фундамент территории Ботанического сада (Куликов, Куликова, 2001) представлен разнофациальными вулканогенными образованиями в виде обломочных пород.

Исследуемый участок является примером экзарационной формы ледникового рельефа, образовавшейся в результате эрозии и шлифовки материковым льдом поверхности скальных пород.

Растительность гари представлена пятнами подроста из основных лесообразующих древесных пород, подлеска, травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов, которые чередуются со скальными выходами различной площади.

До пожара на исследуемом участке произрастал сосняк скальный возрастом около 100–120 лет. В напочвенном покрове преобладали лишайники, из подлеска – можжевельник (*Juniperus* L.). Эти показатели взяты из таксационного описания 2000 г.

Последствиями низового пожара стали массовый ветровал и усыхание деревьев, что было связано с полным выгоранием органического вещества на выходах скальных пород. Кроме скальных выходов на участке на момент исследования сохранились остатки сгоревшей древесины.

При выполнении полевых работ использовали комбинированный способ: классический метод оценки успешности естественного лесовозобновления (Грязькин, 1997, 2000; Гаврилова и др., 2020) и анализ материалов аэрофотосъемки с БПЛА (Кабонен, Ольхин, 2019, 2020).

При использовании классического метода независимо от густоты подроста, его высоты и состояния во всех случаях закладывались круговые площадки площадью 10 м² (радиус круга 178.5 см). При этом для дальнейшего сопоставления с ортофотопланом местности проводилась предварительная разметка учетных ходов и

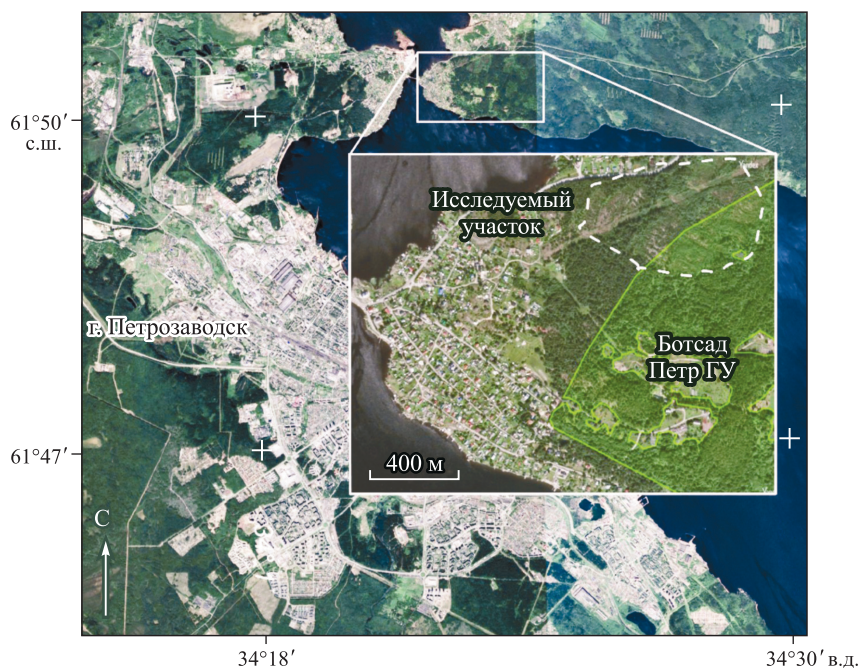


Рис. 1. Местоположение объекта исследования.



Рис. 2. Подрост хвойных и лиственных пород по гари на скальных выходах.

центров учетных площадок. Всего заложено два учетных хода по линиям наиболее длинных диагоналей исследуемого участка, на каждом ходе – по 10 площадок, распределенных по всему ходу на одинаковом расстоянии друг от друга. Для удобства дальнейшего сопоставления с ортофотопланом при проведении работ по учетным ходам проводилась запись трека хода на GPS-приемник Garmin 78.

По жизненному состоянию подрост делили на три категории: жизнеспособный, нежизнеспособный и сухой, а по высоте – на три общепринятые группы: мелкий (до 0.5 м), средний (0.51–1.5 м), крупный (1.51–4 м) (рис. 2).

Для детального исследования текущих приростов и высот сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) отбирались модельные деревья – 10 шт. для каждого возраста (от 1 года до 13 лет)

и разной толщины почвенного горизонта (1, 2 и 6 см).

Отмечено, что растительность, как правило, сосредоточена в микропонижениях, где накапливается влага и появляется органика. По крупным трещинам в скальных выходах в основном произрастают мхи, лишайники и грибы, что связано с особенностями их онтогенеза. Для проведения аэрофотосъемки использовался БПЛА квадрокоптерного типа Phantom 4 pro, обладающий следующими техническими характеристиками: стандартной RGB-камерой (число эффективных пикселей 20 млн; разрешение полученных фотографий 5472×3648 пикселей) и спутниковыми системами позиционирования GPS и ГЛОНАСС (точность позиционирования в вертикальной плоскости ± 0.1 м – система визуального позиционирования, ± 0.5 м – позиционирование по спутникам; в горизонтальной плоскости ± 0.3 м – система визуального позиционирования, ± 1.5 м – позиционирование по спутникам).

Полет БПЛА проходил на высоте 110 м от уровня взлетной площадки (высота над уровнем моря 50 м) по всему исследуемому участку. Исходное разрешение съемки – 2.5–3 см на пиксель в зависимости от локальных высот рельефа. Дрон управлялся пилотом вручную с помощью мобильного приложения DJI GO 4 без использования полетного задания. Основные полетные характеристики: дата полета – 23.06.2021, высота полета – 110 м, угол наклона камеры – 80° , число сделанных снимков – 160 шт.

Полученные данные обрабатывали в программном обеспечении Agisoft Metashape Professional Version 1.5.4, в котором реализована автоматизированная технология создания трехмерных моделей высокого качества на основе цифровых снимков. Алгоритм обработки данных включал реализацию предлагаемого в руководстве пользователя решения: выравнивание снимков, построение плотного облака точек, построение текстурированной модели, карты высот и ортофотоплана. Плотное облако точек дополнительно делилось на два класса: точки земли и низкая растительность, что было связано с дальнейшим измерением высот растений. Высота деревьев на облаках точек измерялась в ручном режиме с помощью инструмента «Линейка».

Для анализа количественного и видового распределения деревьев по исследуемой территории выполнено маркирование подроста в ручном режиме на ортофотоплане в программ-

ном обеспечении MapInfo, в котором доступно создание геоинформационных систем с картографическим материалом и базой данных по отдельным объектам. Для маркирования подроста на ортофотоплане задавались окружности радиусом 50 м, центры которых находились в центрах учетных площадок при натурном обследовании. После маркирования отдельных деревьев в базе данных каждому объекту задавались (при возможности) порода дерева и высота. После занесения всех объектов в базу данных был произведен экспорт в таблицу Microsoft Excel, где осуществлялись дальнейший подсчет и распределение деревьев.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате фотограмметрической обработки данных выравнивание снимков было успешным для всех фотографий. Всего скорректировано 219 тыс. связующих точек со средней невязкой 0.5 пикселя (ошибка репроецирования), что позволило создать 66 млн точек плотного облака, трехмерную модель из 3.4 млн полигонов, карту высот с разрешением 9.666×7.581 пикселей и ортофотоплан местности (17.168×13.824 пикселей). Данные характеристики свидетельствуют о высоком качестве обработки.

Для исследуемого участка реконструирован ортофотоплан территории с пространственным разрешением 4.6 см на пиксель, привязанный к географической системе координат WGS-84, однако точность привязки не превышала 1–2 м, так как на борту квадрокоптера установлено стандартное навигационное оборудование (GPS) (рис. 3).

Для решения поставленных задач исследования данной точности было достаточно, в том числе для сопоставления данных с записью трека GPS-приемника при наземном исследовании.

Фрагментарно ортофотоплан имеет пробелы в данных (белые пятна на рис. 3, а), которые вызваны недостаточным перекрытием снимков по границе исследуемой территории. Растительность, произрастающая на месте пробелов данных на ортофотоплане, не обследовалась, так как она не была повреждена пожаром (тип леса – сосняк черничный, возраст – около 110 лет). На карте высот местности (рис. 3, б) хорошо просматривается подрост (отдельные деревья высотой от 1.5 м), при этом лучше всего идентифицируется сосняк, не поврежденный пожаром и имеющий соответствующие максимальные значения высоты над уровнем моря (75 м).

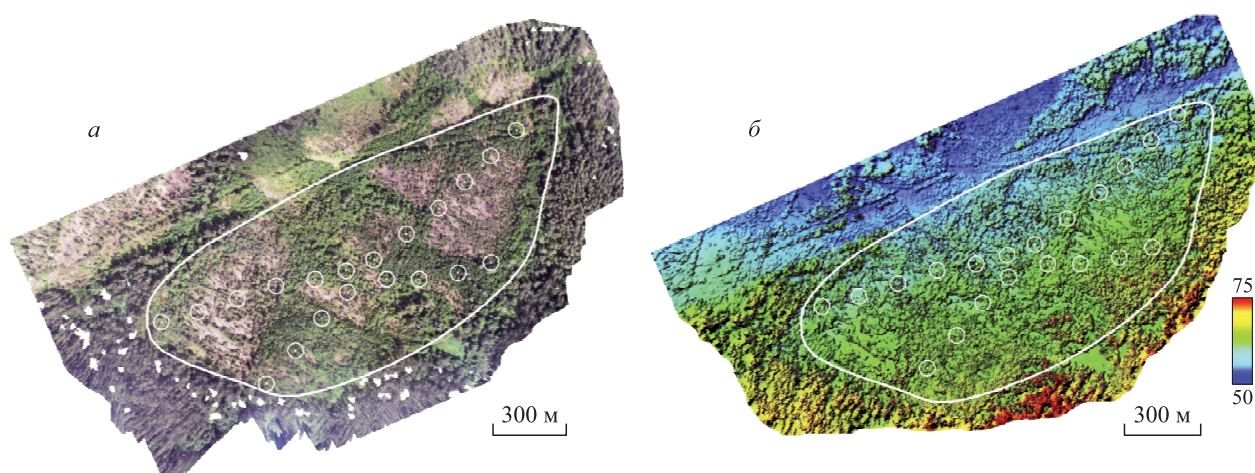


Рис. 3. Результат фотограмметрической обработки данных с БПЛА.

а – ортофотоплан; *б* – карта высот. Контур полигона – границы исследуемого участка, круги – контрольные участки (круговые площадки).

При анализе ортофотоплана было подсчитано, что обнажения скальных выходов имеются практически на всей исследуемой территории и занимают площадь 60 %. На представленных материалах хорошо видно, что часть растительности размещена по выходам скальных пород, ориентированных с юго-востока на северо-запад, что, вероятно, связано с морфологией коренных пород и крупными трещинами, которые сформированы за счет тектонической деятельности. Применение БПЛА позволило выявить характер размещения подроста, но с определением его численности и породного состава есть трудности. Мелкий подрост любых древесных пород (до 0.5 м) «не читается», так как крона у него слабо развита и представлена 1–3 боковыми побегами.

При количественном анализе распределения породного состава растительности по территории при векторном маркировании деревьев на ортофотоплане установлено, что легче всего распознаются деревья сосны обыкновенной из-за светло-сизого оттенка кроны и березы повис-

лой (*Betula pendula* Roth) ввиду ярко-зеленого контраста в сравнении с другими древесными породами. В результате подсчета древесных пород определено их количественное распределение – в соотношении 64 % сосна обыкновенная и 23 % береза повислая. Распознать до вида другие лесообразующие породы, как и состав молодняков в целом, на ортофотоплане не удалось, однако при подсчете их количество составляло 13 % от общего числа деревьев.

Натурные обследования показали, что через 15 лет после пожара сформировался жизнеспособный молодняк смешанного состава с преобладанием сосны обыкновенной (71 % от общего количества древесных пород) (табл. 1).

Кроме сосны на этой гари в формировании молодняков участвуют береза повислая (22 %), осина и ольха серая (по 3.5 %). Данные показатели согласуются с анализом ортофотоплана местности (погрешность составила менее 10 %).

При натурном обследовании подлеска выяснилось, что он представлен небольшим количеством кустарников: несколько видов ивы

Таблица 1. Распределение подроста по породам, группам высот и жизненному состоянию при натурном обследовании территории, экз./га

Порода	Крупный			Средний			Мелкий		
	Ж	НЖ	С	Ж	НЖ	С	Ж	НЖ	С
Сосна обыкновенная	2100	100	–	200	200	–	–	100	100
Береза повислая	600	100	200	700	–	300	800	–	–
Осина (<i>Populus tremula</i> L.)	100	100	200	700	500	700	4600	500	–
Ольха серая (<i>Alnus incana</i> (L.) Moench)	100	–	–	300	–	–	100	–	–
И т о г о...	2900	300	400	1900	700	1000	5500	600	100

Примечание. Подрост: Ж – жизнеспособный, НЖ – нежизнеспособный, С – сухой.

Таблица 2. Видовой состав и численность подлеска, экз./га

Вид	Численность, экз./га	Средняя высота, м
Жимолость обыкновенная	170	0.53 ± 0.08
Ивы	1090	0.56 ± 0.03
Можжевельник обыкновенный	880	0.44 ± 0.06
Рябина обыкновенная	2200	0.78 ± 0.09
Шиповник собачий	160	0.37 ± 0.05
Итого...	4500	–

(*Salix* sp.), жимолость настоящая (*Lonicera xylosteum* L.), можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.) и шиповник собачий (*Rosa canina* L.) (табл. 2).

Общая численность подлесочных пород не превышает 4500 экз./га. Преобладает рябина обыкновенная. Идентификация подлеска и мелкого подроста на ортофотоплане не представлялась возможной из-за их небольших размеров.

Исследование живого напочвенного покрова не было целью исследования, так как ожидаемо он не будет идентифицироваться на ортофотоплане, данные приведены для описания почвенного плодородия и степени увлажнения.

Живой напочвенный покров на гари характеризуется неравномерным распределением, он встречается преимущественно пятнами по вы-

положенным участкам и микропонижениям, чередуясь со скальными выходами.

Обследование напочвенного покрова показало, что он представлен 16 видами, включая несколько видов мхов и лишайников (табл. 3).

По проективному покрытию доминирует политрихум можжевельниковый (*Polytrichum juniperinum* Hedw.) – 51 %, на долю лишайников приходится около 11 %, остальные виды покрывают 1–5 % площади опытного участка.

Встречаемость (В) определяли, как количество обследованной площади, на которой встречался тот или иной вид. У луговика извилистого (*Avenella flexuosa* (L.) Drejer) она составляет 100 %, а у политрихума можжевельникового и лишайников – по 90 %, у вереска (*Calluna* Salisb.) – 60 %, а у вейника (*Calamagrostis* Adans.) – 40 %.

Для анализа структуры молодняков по высоте построены трехмерные облака точек растительного полога и земной поверхности со скальными выходами. Пример созданной полигональной трехмерной модели исследуемого участка представлен по ссылке (Лесовосстановление..., 2022).

При сравнении высоты растений на фотограмметрических облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить только высоту растений для крупной общепринятой категории (> 1.5 м) и только для основных лесообразующих пород. При этом высоты, измеренные по данным с БПЛА, хорошо согласо-

Таблица 3. Видовой состав живого напочвенного покрова, сформировавшегося на гари, его встречаемость (В) и проективное покрытие (ПП), %

Вид	В	ПП
Брусника обыкновенная (<i>Vaccinium vitis-idaea</i> L.)	20	2.0
Вереск обыкновенный (<i>Calluna vulgaris</i> (L.) Hull)	60	3.5
Вейник тростниковидный (<i>Calamagrostis arundinacea</i> (L.) Roth)	40	2.5
Золотарник обыкновенный (<i>Solidago virgaurea</i> L.)	30	1.5
Иван-чай узколистый (<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.)	30	1.5
Клевер луговой (<i>Trifolium pratense</i> L.)	10	0.5
Кошачья лапка двудомная (<i>Antennaria dioica</i> (L.) Gaertn.)	10	0.5
Луговик извилистый (<i>Deschampsia flexuosa</i> (L.) Drejer)	100	5.0
Луговик дернистый (<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P. Beauv.)	10	0.5
Ожика волосистая (<i>Lusula pilosa</i> (L.) Willd.)	20	1.0
Политрихум можжевельниковый (<i>Polytrichum juniperinum</i> Hedw.)	90	51.0
Черника обыкновенная (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.)	20	1.0
Ястребиночка обыкновенная (<i>Pilosella officinarum</i> F. W. Schultz & Sch. Bip.)	10	1.0
Гилокомиум блестящий (<i>Hylocomium splendens</i> (Hedw.) Bruch et al.)	10	0.2
Дикран многоножковый (<i>Dicranum polysetum</i> Sw.)	10	0.2
Плевроциум Шребера (<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.)	10	0.2
Кладония оленья (<i>Cladonia rangiferina</i> (L.) Weber ex F. H. Wigg.)	60	6
Кладония лесная (<i>Cladonia arbuscula</i> (Wallr.) Flot.)	30	5

Таблица 4. Высота деревьев сосны обыкновенной, измеренная с использованием данных с БПЛА и наземным методом, м

Параметр	По данным с БПЛА	Наземные измерения
Высота:		
максимальная	6	5.8
минимальная	1.7	1.5
средняя	3.7	4
Стандартное отклонение	1.2	1

вывались с высотами, измеренными наземным методом (табл. 4).

Зависимость между высотами отдельных деревьев, полученных разными методами, весьма значительна ($R^2 = 0.95$), а значимых различий между высотами, полученными разными методами, не обнаружено.

Максимальная высота деревьев сосны обыкновенной на исследуемом участке не превышала 6 м, а средние значения варьировались от 3.5 до 4.5 м, что свидетельствует об успешности лесовозобновления на гари на скальных выходах, однако данный показатель на 20 % меньше высоты растений лесовозобновления на вырубках в Карелии (Смирнов и др., 2020).

Различия подроста по возрасту менее выражены. Основная часть подроста имеет возраст 12–13 лет. Это свидетельствует о том, что основное количество подроста появилось на гари после обильного урожая семян (через 2–3 года после пожара). Распределение подроста по высотам также практически не связано с возрастом. Исследование текущих приростов и высот 12-летних деревьев сосны обыкновенной пока-

зало, что в большей степени высота растений зависит от мощности горизонта A_0 (подстилки) (рис. 4).

При этом средняя мощность подстилки менялась от 1 до 6 см. Она состояла из опада хвои, мхов и кустарничков. Постепенно наблюдался переход в рыхлую массу грубого гумуса. Начало процесса образования гумусово-аккумулятивного горизонта наблюдалось при толщине подстилки не менее 4–5 см.

Из данных рис. 4 следует, что исследуемые деревья сосны обыкновенной имеют разные показатели высоты при одинаковом возрасте. Максимальные значения высот для всех возрастов имеют деревья, произрастающие в местах с толщиной подстилки 6 см. Уменьшение толщины подстилки до 1 см приводит к значительному снижению (в 3 раза) и высоты деревьев.

Данные результаты позволили построить ряд полиномиальных уравнений второй степени для растений одного возраста, а существенность различий статистически доказать по критерию t_{St} . Показатель t_{St} для средней высоты подростка сосны при толщине подстилки 1 и 6 см оказался равен $4.2 > 4$. Это означает, что различия достоверны в 100 % случаях. Критерий t_{St} при сравнении средних высот при толщине подстилки 2 и 6 см равен $2.6 > 2.58$, т. е. в 99 % случаях различия достоверны. Таким образом, установлено, что высота деревьев сосны обыкновенной после пожара при лесовосстановлении на скальных выходах зависит от мощности горизонта A_0 (запаса органического вещества).

По средней густоте подлесочные породы распределены в следующем порядке (по степени убывания): рябина, ива, жимолость, можжевель-

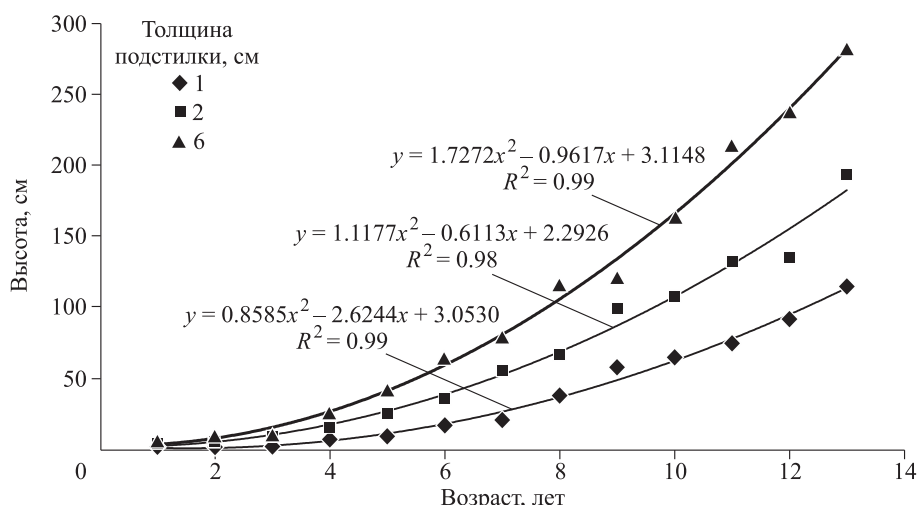


Рис. 4. Зависимость высоты сосны обыкновенной от возраста при разной мощности подстилки.

ник, шиповник. Максимальная высота жимолости достигает 0.8 м, ивы – 0.6 м, можжевельника – 0.6 м, рябины – 1.4 м, шиповника – 0.5 м.

Определить высоту подроста для мелкой и средней групп (от 0.5 до 1.5 м) не представлялось возможным в связи со сложностью их идентификации и разделения трехмерных облаков точек, относящихся к разным классам (земная поверхность и растительность). Для решения этой проблемы, вероятно, необходимо использовать мультиспектральную съемку с ближним инфракрасным (NIR) и/или дальним инфракрасным (RedEdge) каналами спектра (Dandois, Ellis, 2010).

Анализ материалов, полученных с помощью БПЛА, позволил с высокой точностью определить долю скальных обнажений и некоторые характеристики участков с восстанавливающейся растительностью. Видовой состав травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов не идентифицируется.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных исследований установлено, что самовозобновление древесных пород на гари даже в условиях бедных почв на скальных выходах идет вполне успешно. Натурные обследования показали, что после пожара сформировался жизнеспособный молодняк смешанного состава с преобладанием сосны обыкновенной (71 % от общего количества древесных пород). Начало процесса почвообразования наблюдалось только в микропонижениях, от толщины подстилки существенно зависела высота растений. Кроме сосны обыкновенной на этой гари в формировании молодняков участвуют береза повислая (22 %), осина и ольха серая (по 3.5 %). Подлесочные породы представлены рябиной, ивой, можжевельником, шиповником и жимолостью. Их небольшая высота связана с бедностью условий произрастания.

В результате фотограмметрической обработки данных, полученных с помощью БПЛА, был реконструирован ортофотоплан территории гари с пространственным разрешением 4.6 см на пиксель, что позволило произвести векторное маркирование деревьев, в результате которого было определено количественное распределение древесных пород в соотношении 64 % сосна обыкновенная и 23 % береза повислая. Данные показатели согласуются с натурным обследованием местности (погрешность составила менее 10 %). Подлесочные породы и мелкий подрост

лесообразующих пород на ортофотоплане идентифицировать не удалось.

При сравнении высоты растений на фотограмметрических облаках точек с натурными измерениями достоверно удалось определить только высоту растений для общепринятой категории крупный (> 1.5 м). При этом высоты, измеренные по данным с БПЛА, хорошо согласовывались с высотами, измеренными наземным методом. Максимальная высота деревьев сосны обыкновенной на исследуемом участке не превышала 6 м, а средние значения варьировались от 3.5 до 4.5 м.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-316-90044 и Фонда венчурных инвестиций Республики Карелия в рамках программы поддержки прикладных научных исследований и разработок студентов и аспирантов ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет» (Договор № 4-Г21 от 27.12.2021).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аковецкий В. Г., Афанасьев А. В. Методы и технологии интерпретации аэрокосмических мониторинговых наблюдений лесной растительности // Лесн. вестн. 2020. Т. 24. № 2. С. 29–36.
- Белова Е. И., Еришов Д. В. Опыт оценки естественного лесовосстановления на сплошных вырубках по временным рядам Landsat // Лесоведение. 2015. № 5. С. 339–345.
- Беляева Н. В., Грязькин А. В., Калинин П. М. Точность учетных работ при оценке естественного лесовосстановления // Вестн. Саратов. гос. агр. ун-та им. Н. И. Вавилова. 2012. № 8. С. 7–12.
- Вогель Д. К., Юфеев В. Г. Оценка лесных насаждений Волго-Ахтубинской поймы на основе фотограмметрической обработки данных цифровой аэросъемки // Изв. Нижневолжск. агр. ун-тского комплекса. 2018. № 3 (51). С. 203–209.
- Гаврилова О. И., Колганов Е. С., Пак К. А. Оценка успешности самовозобновления сосны на гари // Лесотех. журн. 2020. Т. 10. № 4 (40). С. 142–149.
- Галецкая Г. А., Вьюнов М. В., Железова С. В., Завалишин С. И. Возможности обработки и анализа данных сверхлёгкого БПЛА SenseFly eBee в лесном хозяйстве // Интерэкспо Гео-Сибирь. 2015. № 4. С. 11–18.
- Горохова И. Н., Борисочкина Т. И., Шишконокова Е. А. Использование снимков с беспилотного летательного аппарата для оценки экологического состояния почвенно-растительного покрова урбанизированной экосистемы // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. 2014. № 74. С. 77–89.
- Грязькин А. В. Патент 2084129 РФ. МКИ С 6 А 01 G 23/00. Способ учета подроста // Бюл. Роспатента. 1997. № 20. 3 с.
- Грязькин А. В. Влияние факторов внешней среды на структуру и состояние подроста // Изв. СПб. лесотех. акад. 2000. Вып. 8 (166). С. 19–25.

- Дайнеко Д. В. Применение беспилотных летательных систем в лесной отрасли // Применение беспилотных летательных аппаратов в географических исследованиях: Материалы Всерос. науч.-практ. конф. (Иркутск, 22–23 мая 2018 г.). Иркутск: Изд-во Ин-та геогр. им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2018. С. 59–62.
- Денисов С. А., Домрачев А. А., Елсуков А. С. Опыт применения квадрокоптера для мониторинга возобновления леса // Вестн. ПГТУ. Сер. Лес. Экология. Природопользование. 2016. № 4 (32). С. 34–46.
- Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Дешифрирование форм и морфологических особенностей древесных растений на снимках, полученных с помощью беспилотных летательных аппаратов // Экосистемы. 2019. Вып. 20 (50). С. 197–202.
- Кабонен А. В., Ольхин Ю. В. Цифровое моделирование природно-ландшафтных комплексов по данным, полученным с помощью беспилотных летательных аппаратов // Лесохоз. информ. 2020. № 3. С. 101–110.
- Куликов В. С., Куликова В. В. Докембрийская геология территории ботанического сада // Hortus Bot. 2001. Т. 1. С. 19–24.
- Лесовосстановление гари на скалах. 3D Model. Scetchfab, 2022. <https://skfb.ly/oqFWB>
- Никифоров А. А., Мунимаев В. А. Анализ зарубежных беспилотных летательных аппаратов, применяемых в лесном секторе // Тр. лесоинж. ф-та Петрозавод. гос. ун-та. 2010. № 8. С. 97–99.
- Осипенко А. Е., Коукал Я., Панин И. А., Иванчина Л. А., Залесов С. В. Опыт применения квадрокоптера для создания трехмерной модели лесных насаждений // Леса России и хозяйство в них. 2017. № 4 (63). С. 16–22.
- Петушкова В. Б., Потапова С. О. Мониторинг и охрана лесов с применением беспилотных летательных аппаратов // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. 2018. Т. 1. № 9. С. 717–722.
- Распоряжение Правительства Российской Федерации от 11.02.2021 № 312-р «Об утверждении Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года». М.: Правительство РФ, 2021.
- Скуднева О. В. Беспилотные летательные аппараты в системе лесного хозяйства России // ИВУЗ. Лесн. журн. 2014. № 6 (342). С. 150–154.
- Смирнов А. А., Богачев П. В., Смирнов А. П. Естественное возобновление на вырубках Карелии в связи с плодородием и увлажнением лесной почвы // Изв. СПб. лесотех. ун-та. 2020. Вып. 232. С. 20–32.
- Фетисова А. А., Грязькин А. В., Ковалев Н. В., Гуталь М. Оценка естественного возобновления хвойных пород на сплошных вырубках в условиях Рощинского лесничества // ИВУЗ. Лесн. журн. 2013. № 6 (336). С. 9–18.
- Эзов М. И., Злыгостев И. Н. Применение беспилотных летательных аппаратов в аэрогеофизической разведке // Интерэкспо Гео-Сибирь. VIII Междунар. науч. конф. «Дистанционные методы зондирования Земли и фотограмметрия, мониторинг окружающей среды, геоэкология». Сб. мат-лов. В 2 т. 2012. Т. 2. № 3. С. 22–27.
- Dandois J. P., Ellis E. C. Remote sensing of vegetation structure using computer vision // Rem. Sens. 2010. V. 2. Iss. 4. P. 1157–1176.
- Neuvillie R., Bates J. S., Jonard F. Estimating forest structure from UAV-mounted LiDAR point cloud using machine learning // Rem. Sens. 2021. V. 13. Iss. 3. Article N. 352. 18 p.
- Uutera J., Maltamo M. Impact of regeneration method on stand structure prior to first thinning: Comparative study in North Karelia, Finland vs. Republic of Karelia, Russian Federation // Silva Fenn. 1995. V. 29. N. 4. P. 267–285.

ASSESSMENT OF NATURAL FOREST REGENERATION AFTER FIRE USING DATA OBTAINED WITH UNMANNED AERIAL VEHICLE

A. V. Kabonen¹, O. I. Gavrilova¹, A. V. Gryazkin², K. A. Pak³

¹ *Petrozavodsk State University*

Prospekt Lenina, 33, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185086 Russian Federation

² *S. M. Kirov Saint Petersburg State University of Forest Engineering*

Institutskiy pereulok, 5, St. Petersburg, 194021 Russian Federation

³ *Karelesproekt, Branch of the Federal State Budgetary Institution «Roslesinforg»*

Dzerzhinsky str., 9, Petrozavodsk, Republic of Karelia, 185035 Russian Federation

E-mail: alexkabonen@mail.ru, ogavril@mail.ru, lesovod@bk.ru, pak.ka@roslesinforg.ru

Analysis of the success of reforestation after a fire is the most important task of forestry. For these purposes, in the summer of 2021, aerial photography was carried out from a Phantom 4 pro UAV (Unmanned Aerial Vehicle) of a 15-year-old burnt-out (2006) along the north-western border of the Botanical Garden of Petrozavodsk State University (Republic of Karelia). In addition to this, a full-scale survey was carried out at the registration sites. Before the forest fire, rocky Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees grew. The work was carried out in order to assess the state of natural renewal after a fire along rocky outcrops by combining the processing of aerial photography data with field surveys. As a result of photogrammetric processing, an orthophotomap with a spatial resolution of 4.6 cm/pix, a height map and three-dimensional point clouds were reconstructed. To analyze the quantitative distribution of the territory according to the species composition, the trees were pinned on the orthophotomap according to the registration areas of field surveys, as a result of which the quantitative distribution of tree species was determined in the ratio of 64 % Scots pine and 23 % of drooping birch (*Betula pendula* Roth) (other species were not identified). Field surveys showed that after the fire, a viable young stand of mixed composition with a predominance of Scots pine (71% of the total number of tree species) was formed. In addition to Scots pine, drooping birch (22 %), aspen (*Populus tremula* L.) and gray alder (*Alnus incana* (L.) Moench) (3.5 % each) participate in the formation of young stands on this burned-out area. These indicators are consistent with the analysis of the orthomosaic of the area (the error is less than 10 %). When comparing the height of plants on three-dimensional clouds of points with field measurements, it was possible to reliably determine only the height of plants for a large generally accepted category (> 1.5 m). The maximum height of Scots pine trees in the study area is 6 m, and the average values varied from 3.5 to 4.5 m, which indicates the success of reforestation after burning on rocky outcrops.

Keywords: *reforestation, rocky pine forest, burned-out forest, undergrowth, aerial photography, inventory.*

How to cite: *Kabonen A. V., Gavrilova O. I., Gryazkin A. V., Pak K. A. Assessment of natural forest regeneration after fire using data obtained with UAV // Sibirskij Lesnoj Zhurnal (Sib. J. For. Sci.). 2022. N. 2. P. 11–20 (in Russian with English abstract).*