

И.А. Рыльский¹, Т.С. Нокелайнен², Т.В. Котова³, А.Н. Панин⁴

РАСЧЕТ КАТЕГОРИЙ ПРОХОДИМОСТИ РАСТИТЕЛЬНОСТИ ДЛЯ ТЕХНИКИ ПО ДАННЫМ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

АННОТАЦИЯ

Определение категорий проходимости растительности для техники (в залесенных районах) является очень востребованной и технически непростой задачей. Ее сложность возрастает по мере увеличения площади исследуемого участка, уменьшения сроков работ и их стоимости. На проходимость лесов влияют такие элементарные характеристики как породный состав, диаметр стволов, среднее расстояние между стволами и прочее.

Примером подобных работ является построение карт проходимости растительности для техники по категориям. Данная задача высоко востребована при проведении строительства новых объектов (трубопроводов, автодорог, железных дорог) и освоении новых месторождений в лесной зоне. Одним из наиболее перспективных методов информационного обеспечения для решения этой задачи является воздушное лазерное сканирование и цифровая аэрофотосъемка. Недостатком данного метода (как и всех методов дистанционного зондирования) является практическая невозможность прямого инструментального измерения ряда параметров растительности (несмотря на 25-летний прогресс в развитии метода лидарной съемки), таких как диаметр ствола, или его точное местоположение. Нарращивание плотности сканирования в сочетании с использованием беспилотных летательных аппаратов, выполняющих съемку под большими углами к вертикали, позволяет получить эти характеристики ценой значительного снижения производительности, экспоненциального роста стоимости съемки и обработки данных при незначительной достоверности получаемых характеристик растительности.

В данной работе предлагается альтернативный подход, основанный на выявлении взаимосвязей между характеристиками, которые могут быть непосредственно измерены по данным лазерного сканирования невысокой плотности (высота крон, плотность покрытия, диапазон распределения точек лазерных отражений по высоте относительно земли), и категориями проходимости растительности, измеренными в полевых условиях. Полученные результаты показывают высокую достоверность. Положительной особенностью данного подхода является низкая себестоимость и высокая производительность при определении категорий проходимости местности.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: лазерное сканирование, растительность, дистанционное зондирование, ГИС, аэрофотосъемка

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: rilskiy@mail.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, 119991, Москва, Россия, *e-mail*: nokelta@rambler.ru

³ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119234, Москва, Россия *e-mail*: tatianav.kotova@yandex.ru

⁴ Московский государственный университет, Географический факультет, Ленинские горы, 1, 119234, Москва, Россия *e-mail*: alex_pantin@mail.ru

Ilya A. Rylskiy¹, Tatiana S. Nokelaynen², Tatiana V. Kotova³, Alexandr N. Panin⁴

CALCULATION OF VEGETATION PASSABILITY CATEGORIES FOR VEHICLES BASED ON LASER SCANNING DATA

ABSTRACT

Determining the categories of vegetation passability for vehicles (in forested areas) is a very popular and technically difficult task. Its complexity increases as the area of the territory increases, while duration of works and their cost should decrease. The passability of forests is influenced by elementary characteristics such as the species composition, the diameter of the trunks, the average distance between the trunks, etc.

An example of such work is the construction of vegetation passability maps for vehicles by category. This task is in high demand during the construction of new facilities (pipelines, roads, railways) and the development of new deposits in the forest zone. One of the most promising methods of information support for solving this problem is airborne laser scanning and digital aerial photography. The disadvantage of this method (as well as all methods of remote sensing) is the practical impossibility of direct instrumental measurement of a number of vegetation parameters (despite 25 years of progress in the development of the lidar method), such as the diameter of the trunk, or its exact location. Increasing scan density, combined with the use of UAVs surveying at high angles to the vertical, allows these characteristics to be obtained at the cost of a significant decrease in productivity, an exponential increase in the cost of surveying and data processing, with little confidence in the obtained vegetation characteristics.

This paper proposes an alternative approach based on the identification of relationships between characteristics that can be directly measured from low-density laser scanning data (crown height, coverage density, range of distribution of points of laser reflections in height relative to the ground) and vegetation passability categories measured in the field conditions. The obtained results show high reliability. A positive feature of this approach is the low cost and high productivity in determining the categories of terrain passability.

KEYWORDS: LIDAR, vegetation, remote sensing, GIS, aerial survey

ВВЕДЕНИЕ

Определение категорий проходимости лесной растительности для техники является очень востребованной и технически непростой задачей. Ее сложность возрастает по мере увеличения площади территории, на которой проводятся подобные работы, уменьшения сроков работ и их стоимости. Дерево или куст сами по себе сложны в учете за счет крайней вариабельности всех своих характеристик: видового состава, габаритов кроны и формирующих ее ствола и ветвей, фазы вегетации и прочего. При этом требуемые от исследователей результаты однозначно должны быть конкретными, численными и по возможности точными.

Это противоречие ранее не решалось никак, кроме субъективной оценки характеристик растительности, которая целиком зависела от целей исследования (строительство кораблей, лесотаксация, экологические задачи и прочее). С развитием средств дистанционного зондирования появились возможности для выполнения расчетов и снижению

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia, e-mail: rilskiy@mail.ru

² Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia, e-mail: nokelta@rambler.ru

³ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia, e-mail: tatianav.kotova@yandex.ru

⁴ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, World Data Center for Geography, Moscow, 119991, Russia, e-mail: alex_panin@mail.ru

уровня субъективизма. Использование аэрофотосъемки, а позднее – многозональной и/или сверхдетальной космической съемки позволило улучшить качество и пространственную дискретность определения таких характеристик, как породный состав, сомкнутость крон и ряда других [Дворяшин и др., 2011]. Однако определение высоты древостоя оставалось затруднительным даже при использовании стереоданных – при высокой сомкнутости крон низ деревьев просто не виден.

Появление активных методов – радиолокации и, позднее, лазерного сканирования – позволило решить вышеупомянутую задачу за счет возможности проникновения части излучения сквозь кроны [Данилин, Фаворская, 2011]. Однако значительное количество параметров отдельного дерева все равно оставались скрытыми [Korpela, 2008]. В их числе – диаметр ствола, габариты крон (при их взаимопроникновении в непропореженных лесах) и ряд других [Gorgens et al, 2017].

В последние годы большое развитие получили методы лазерного сканирования (рис. 1) и аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов. Особенностями именно этих съемочных систем является низкая высота полета (100–200 м), малые скорости (30–90 км/ч), высокое разрешение аэрофотоснимков и высокая плотность получаемых облаков точек лазерных отражений. В период с 2012 по 2022 гг. скорость лазерных сканеров для БПЛА возросла с 24 000 точек в секунду до 1 800 000 в секунду – в 75 раз. Подобные темпы, а также рост прочих тактико-технических характеристик лазерных сканеров (таких как дальность, толщина луча, точность определения дистанции) дали надежду на возможность прямого измерения стволов и параметров каждой из крон [Каплунов, 2001]. Именно по этому направлению в настоящее время ведется абсолютное большинство исследований [Holmgren, 2004]. Однако данный подход при промышленно значимых объемах освоения территорий представляется полностью тупиковым.

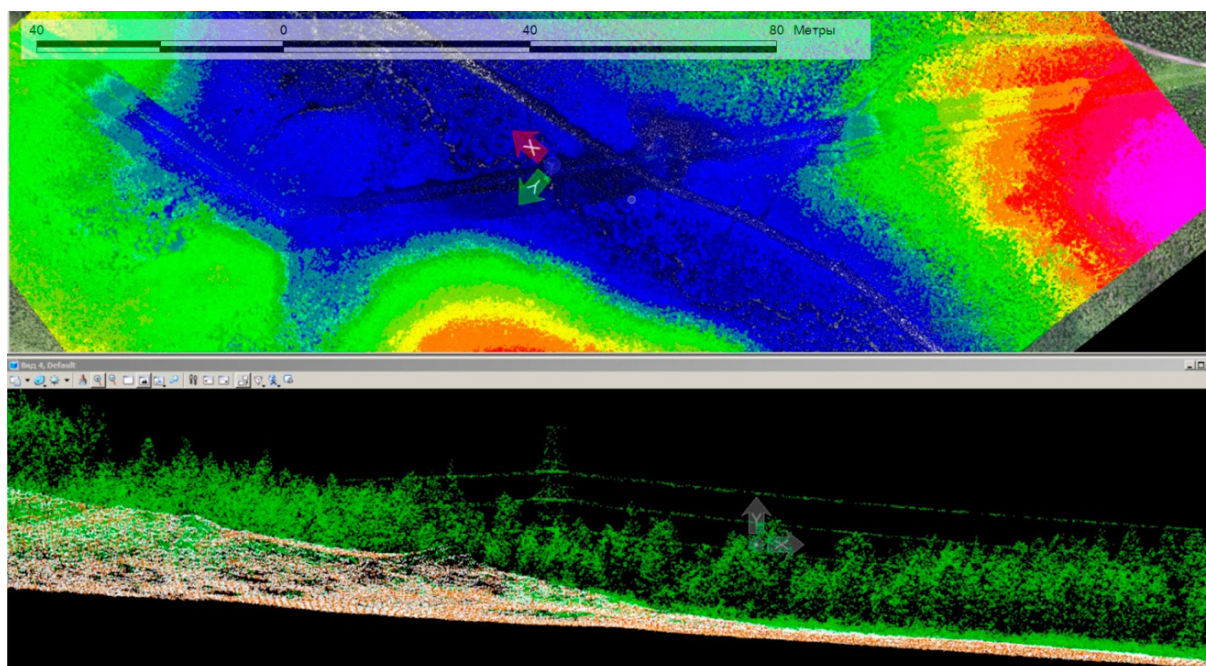


Рис. 1. Пример детальности облака точек лазерного сканирования при съемке с плотностью 4 точки на 1 м² (вид в плане и в профиль)
 Fig. 1. An example of the level of detail of a laser scanning point cloud during a survey with a density of 4 points per 1 m² (view in plan and in profile)

Лес – это большой по площади и неоднородный объект. При практическом ведении съемок необходимо выполнять работы в объемах десятков тысяч – миллионов гектар за сезон. Но подобные объемы немыслимы при использовании БПЛА даже с высокими скоростями сканирования. Так, практическим пределом съемок за один сезон для одного

комплекта БПЛА является 200–250 км² территории – имеются в виду не просто съемки, а именно плотное сканирование с малых высот, позволяющее детально отснять крону. Кроме того, даже в этом случае определение параметров ствола (толщина и высота) является неточным (ошибка диаметра может быть до 4–5 см, что делает оценку объемов деловой древесины бессмысленным). В густых и/или тонкоствольных массивах результаты могут быть и вовсе непригодны. Подобный подход пригоден разве что для отдельных парков, городских посадок или уникальных лесных массивов.

Применение даже наиболее высокопроизводительных и дорогих аэросъемочных систем с использованием пилотируемых носителей и давно не позволяет выполнить съемку стволов и разделить кроны, не говоря уже об определении иных характеристик.

Тем не менее, представляется возможным решение отдельных задач без применения БПЛА и высокоплотного сканирования. Основой для подобного подхода может быть определение связи между статистическими характеристиками облаков точек и искомыми параметрами леса.

В качестве целевой задачи исследования была выбрана разработка автоматизированной методики определения проходимости для техники лесов (по категориям проходимости) на базе данных лазерного сканирования и цифровой аэрофотосъемки, выполняемых с плотностью 1–3 точки на 1 м² с пилотируемых летательных аппаратов.

Наиболее крупным потребителем данной информации являются компании, ведущие трехмерную сейсморазведку новых месторождений. Сейсморазведка – раздел разведочной геофизики, основанный на регистрации искусственно возбуждаемых упругих волн и извлечении из них полезной геолого-геофизической информации. Метод существует с начала 1920-х годов. При помощи сейсморазведки изучается глубинное строение Земли, выделяются месторождения полезных ископаемых (в основном нефти и газа), решаются задачи гидрогеологии и инженерной геологии, проводится сейсмическое микрорайонирование. Сейсморазведка отличается высокой разрешающей способностью, технологичностью и большим объемом получаемой информации.

Решение данной задачи обосновано производственными потребностями, возникающими при освоении новых территорий, которое на 2021 год составляло до нескольких десятков тысяч квадратных километров в год.

Проходимость лесов – важный параметр, оказывающий значительное влияние на себестоимость работ, например, при выполнении трехмерной сейсморазведки. Он также важен и в других случаях – при трассировании новых линейных коммуникаций, освоении месторождений, строительстве крупных промышленных предприятий. Целевыми задачами при этом обычно являются минимизация объемов рубок леса и снижение логистических затрат.

При выполнении сейсморазведки используются три категории проходимости лесов для колесного и гусеничного транспорта :

1 категория: залесенные болота, кустарник средней густоты, редкий молодой лес, молодой лес средней густоты, (диаметр ствола от 8 до 16 см, расстояние между деревьями более 10 м);

2 категория: густой молодой лес, густой кустарник, лес средней густоты (диаметр ствола от 8 до 16 см, расстояние между деревьями от 4 до 10 м);

3 категория: густой лес с подлеском и валежником, сплошные заросли стланика и тальника, таежный лес с подлеском или буреломом или особенно густой лес (диаметр ствола свыше 16 см, расстояние между деревьями менее 4 м).

Тем не менее, можно выделить ряд общих признаков, характерных для каждой из категорий. Первая категория – это низкоплотная растительность малой высоты либо средней высоты. Вторая категория – более высокорослая, более плотная растительность. Третья категория – очень плотная и/или высокая растительность в несколько ярусов.

В качестве тестовой территории для разработки методики была выбрана территория в пределах лицензионного участка планируемого к разработке месторождения, расположенная в Ханты-Мансийском округе в районе города Нижневартовск. На тер-

ритории планировалось выполнение полного комплекса сейсмопрофилирования с соответствующей прокладкой нескольких тысяч погонных километров сейсмопрофилей, что обусловило высокую востребованность в результатах использования методики.



Рис. 2. Фрагмент ортофотоплана рассматриваемой территории. Представлены все категории проходимости. Масштаб 1:10 000
Fig. 2. A fragment of the orthophoto map of the area under consideration. All categories of cross-country ability are represented. Scale 1:10 000

Площадь территории исследования (вся площадь лицензионного участка) составила 236 км². Район работ расположен в таежной ландшафтной зоне и обладает лесистостью на уровне 70–75 %. Остальная часть территории занята болотными растительными сообществами и водными объектами.

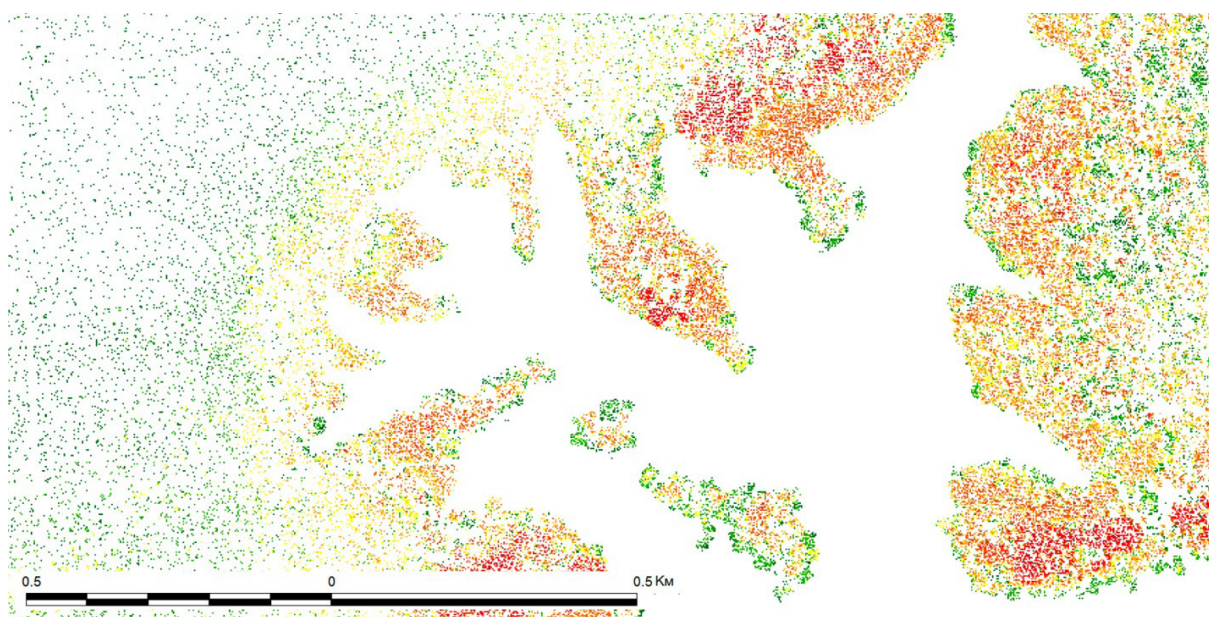
МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На территории была выполнена аэрофотосъемка (рис. 2) и воздушное лазерное сканирование. Для работ использовались среднеформатный цифровой фотоаппарат DIGIcam с матрицей в 60 мегапикселей и трехмерный лазерный сканер RIEGL LMS Q560. Работа велась на скорости сканирования в 120 000 измерений в секунду с высоты в 800 м, что позволило обеспечить выполнение полетов на скорости 160 км/ч и получить аэрофотоснимки с детальностью лучше 10 см (RGB) и облака лазерных точек с плотностями от 2,6 до 4,9 точек на 1 м². Продольное и поперечное перекрытие аэрофотоснимков составило 60 % и 30 %, соответственно [Руководство..., 1986]. Среднее расстояние между точками лазерного сканирования при этом составило около 60 см. Геопривязка облака точек производилась с использованием бортовой инерциальной навигационной системы и высокоточного L1-L2 ГНСС-приемника (GPS-ГЛОНАСС). В ходе первичной обработки данных были выведены (в системе координат WGS84, проекция UTM зона 43, эллипсоидальная система высот) облака точек лазерного сканирования и построены цветные ортофотомозаики с исправлением искажений за рельеф и наклоны камеры. Общая итоговая точность полученных материалов (по данным наземного контроля на 24 контрольных маркерах) составила 0,6 м в плане и 0,18 м по высоте, что отвечает требованиям по точности, предъявляемым к данным масштаба 1:2 000 с сечением рельефа 1 м согласно требований СНиП 11-02-96 «Инженерные изыскания в строительстве».

Критически важным для разрабатываемой методики является обеспечение постоянной и в целом неизменной (не более +/-10 %) плотности сканирования [Варыгин и др., 2013]. Именно поэтому для данной методики был выбран указанный выше лазер-

ный сканер – он обладает параллельной разверткой строк сканирования и углом охвата в 60 градусов, что исключает значительные скачки в плотности. Напротив, системы с качающимся зеркалом вроде Leica или Ortech (а также сканеры с круговой разверткой) не слишком пригодны для данной методики ввиду значительной разницы в плотностях сканирования и неоднородности расстояний между точками вдоль и поперек оси сканирования [Chen, 2007].

Получаемые данные лазерного сканирования представляют собой плотные облака точек лазерных отражений, локализованные в 3D. Процесс обработки включает этапы классификации точек на классы «земля», «растительность», «прочие точки». После этого, на втором этапе, производится конвертация каждого из классов точек в растровые модели данных с шагом, примерно равным расстоянию между точками. На третьем этапе средствами картографической алгебры может быть осуществлено вычитание поверхности рельефа из поверхности верхней границы растительности, что дает возможность вычислить относительные высоты растительности над рельефом, то есть получить собственно высоту растительного покрова [Lohr, 1997].



*Рис. 3. Цифровая модель растительного покрова в относительных высотах.
Масштаб 1:10 000*

*Fig. 3. Digital vegetation model (relative height from ground).
Scale 1:10000*

Этот вид пространственных данных мы будем называть ЦМРП (цифровая модель растительного покрова). Следует также отметить, что ЦМРП (рис. 3) не содержит подразделения на отдельные кроны или деревья – это общая поверхность проективного покрытия, со всеми свойственными лесу особенностями (различные высоты – верхушки, боковые части кроны) и пропусками (прогалы в лесу и между отдельными деревьями).

Основная часть необходимых процедур в данной последовательности действий выполнялась с использованием программного обеспечения Aerooffice и Grafnav (расчет траектории), Riprocess (калибровка и вывод точек), TerraSolid (классификация и экспорт цифровых моделей, создаваемых из классов точек, а также создание ортофотопланов), ArcView (работа с поверхностями). Все использованные в работе поверхности были построены в виде GRID-моделей с шагом 1 м.

После получения ЦМРП становится возможным приступить к рассмотрению статистических характеристик растительности в пределах некоторых окрестностей от каждой рассматриваемой точки. Для этого был использован метод скользящего окна круглой формы с радиусом, равным среднему диаметру кроны. Средний диаметр кроны на

данной территории был определен методом осреднения ручных измерений диаметров крон, определение проводилось с использованием ортофотопланов (см. выше). Использование меньших радиусов не дало корректных результатов, использование большего радиуса дает в целом такой же результат при геометрическом росте затрат машинного времени, что нецелесообразно.

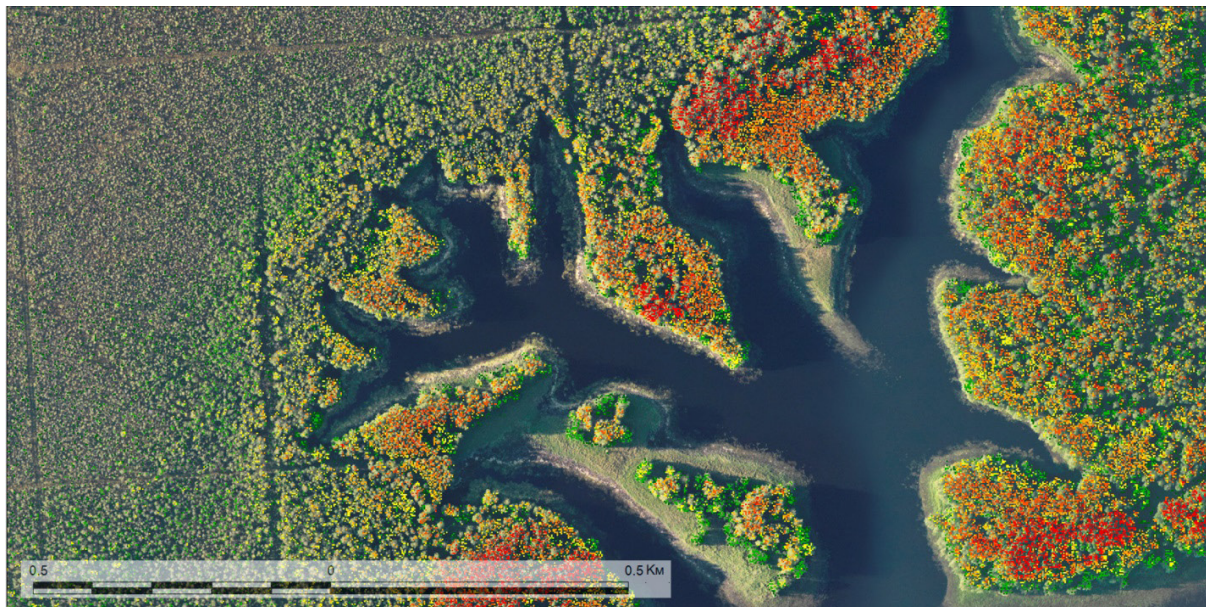


Рис. 4. Два набора данных, необходимых для ручной проверки корректности классификации (ортофотоплан и ЦМРП). Масштаб 1:10 000

Fig. 4. Two datasets needed for manual control (orthophoto and digital vegetation model). Scale 1:10000

Для каждой дельта окрестности (скользящего окна) значения высот ячеек ЦМРП могут быть рассмотрены как набор топологически независимых значений. Для данного набора доступно вычисление ряда статистических характеристик. К таковым, помимо прочих, относятся величины стандартного отклонения (Standard Deviation), диапазон значений (Range), среднее (Average), а также минимальные, максимальные значения, сумма и ряд иных. Конечно использование метода скользящего окна предполагает большой объем вычислений и не может быть реализовано вручную. Для реализации данного подхода нами был использован ГИС-пакет ArcView с последующим написанием дополнительного программного комплекса с использованием встроенного языка программирования с ГИС-функциями (Avenue).

Логично предположить, что значение Standard Deviation (стандартное отклонение) относительных высот ячеек ЦМРП выше у растительности с третьей категорией проходимости, нежели чем у растительности с первой категорией. То же можно сказать и о параметре Range (возрастает с ростом высоты леса), а также о параметре Average (возрастает с ростом густоты леса). Таким образом, можно предположить возможность выведения некоей функциональной зависимости вида (1):

$$F_i = \text{StdDev}^m * \text{Range}^n * \text{Average}^k \quad (1)$$

где F – некая условная балльная оценка, а m , n и k – гипотетические степенные коэффициенты, зависящие от особенности растительности на данной территории. Изначально было выдвинуто предположение, что при наличии большого количества точек, где известны значения фактических категорий проходимости растительности, а также значения StdDev, Range и Average, возможно вычислить или подобрать такие m , n , k , при которых будет возможна однозначная классификация набора F_i на три класса, соответствующих категориям проходимости.

Для этого были использованы материалы наземных измерений параметров растительности, предоставленные компанией ООО «ТСГК» («Тюменская сервисная геофизическая компания»), ведущей работы на данной территории, в количестве 358 точек. Из этого массива 300 точек были использованы для вычисления потенциальной функциональной зависимости, а оставшиеся 58 использовались как проверочные эталоны.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проделанной работы были вычислены следующие значения: $m=1.172$, $n=0.982$, $k=1.280$. При этом получаемые на 300 эталонных точках величины F_i находятся в пределах диапазона 0–3178. В полученном одномерном массиве наблюдается четкая дифференциация – для категории 1 характерны наименьшие значения F_i , для категории 3 – наибольшие. Используя имеющиеся эталоны, были выделены границы значений трех классов. В дальнейшем, на оставшихся 58 эталонах была проведена проверка, которая выявила совпадение рассчитанной категории проходимости леса с эталонной в 54 случаях из 58 (совпадение в 91,4 % случаев).

Полученный результат также прошел выборочную проверку с использованием экспертной оценки конкретных участков леса. Применялось ручное профилирование по облакам точек и анализ ортофотопланов с целью оценки правильности полевых оценок категории проходимости леса (рис. 4). Выборочная ручная проверка подтвердила правильность полученных результатов и корректность эталонов.

В ходе дальнейшей автоматизированной обработки ЦМРП был произведен сплошной расчет категорий проходимости лесов на всей территории лицензионной площади с использованием специально разработанного для этого приложения в среде ArcView. Результат подобных расчетов (рис. 5) представляет собой регулярную матрицу значений величин NoData, 1, 2 и 3, где NoData соответствует отсутствию леса, а прочие значения соответствуют категории. Результат представленный в графической форме, может быть наложен на данные других ГИС-слоев [Капралов и др., 2004]: собственно ЦМРП в относительных высотах, ортофотоплан, ЦМР, сетку профилей и любые другие сведения.

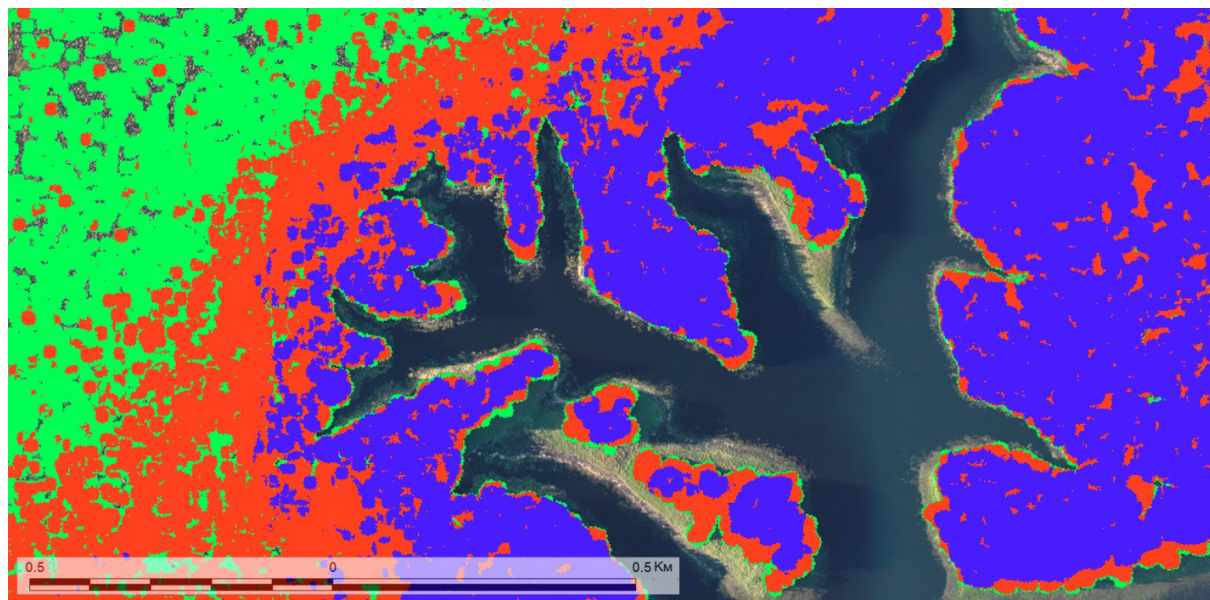


Рис. 5. Результат автоматического определения категорий проходимости местности (зеленый – категория 1, красный – категория 2, синий – категория 3). Масштаб 1:10 000

Fig. 5. The result of automatic determination of terrain categories (green – category 1, red – category 2, blue – category 3). Scale 1:10000

С целью проверки полученных результатов, сотрудниками компании ТСГК в течение зимнего сезона был проведен полный комплексный сбор данных о проходимости местности по полному набору будущих сейсмопрофилей. Общая длина профилей, использованных для контроля, превысила 2 450 погонных километров. Количество точек, на которых производилось полевое измерение категорий проходимости лесов, превысило 26 000 штук (в расчет брались точки, где лес присутствовал).

По результатам комплексной полевой проверки были составлены геоинформационные слои: проверочный (по данным полевых работ) векторный слой (линейный), где каждому участку профиля была указана проходимость растительности по категориям, а также покрытие территории в виде грида с категориями проходимости (расчетными). Результат наложения приведен на рис. 6.

Сравнение взаимного наложения (визуально) говорит об очень хорошей сходимости результатов (рис. 6). Статистическое сравнение результатов показывает сходимость на уровне 92,4 %. Также следует отметить, что основная масса отмеченных расхождений (около 2/3 от оставшихся 7,6 % несошедшихся результатов) приходится на краевые участки, где растительность одной категории начинает переходить в растительность другой категории. Принимая во внимание значительную долю субъективизма при проведении полевых работ, можно утверждать, что отмеченные отличия носят спорадический, а не системный характер.

Учитывая общий характер целей проведения оценки проходимости леса, можно утверждать, что полученный уровень сходимости в 92,4 % является очень хорошим. Результаты подобных расчетов, выполняемых за считанные часы в камеральных условиях – в противоположность многодневным полевым работам нескольких бригад – являются в высшей степени востребованными и экономически эффективными. Себестоимость получения подобных материалов на основании ГИС-расчетов крайне низка, а эффект – велик.

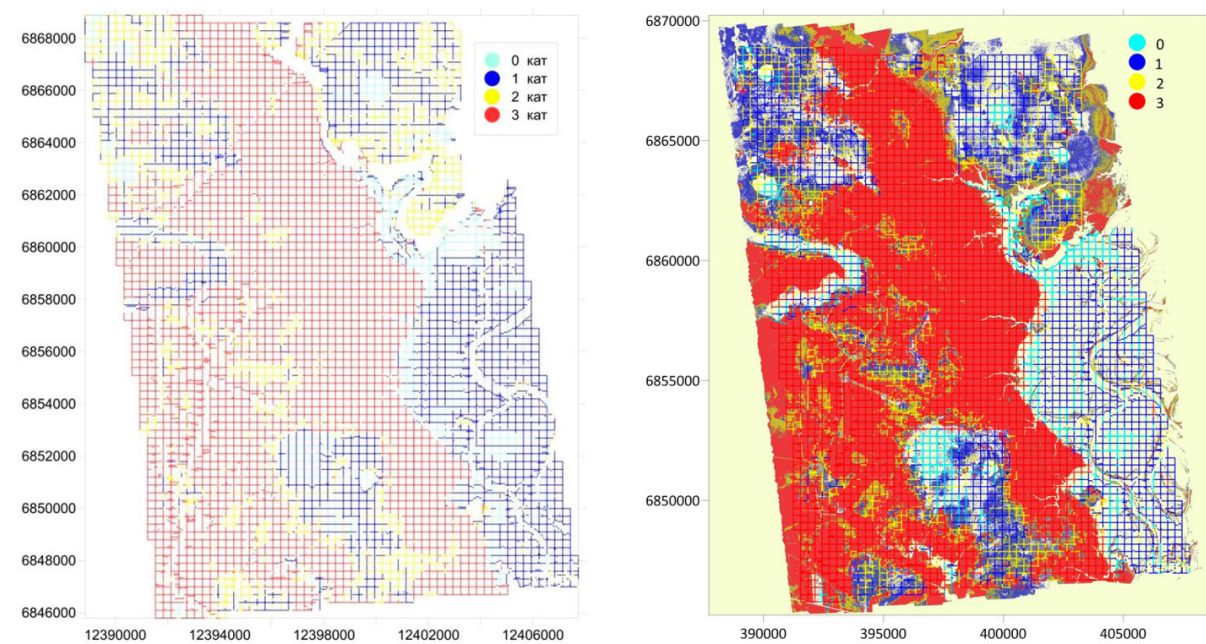


Рис. 6. Результаты массовой проверки качества определения категорий проходимости в пределах всей территории исследования (слева – эталонные значения, измеренные в поле, справа – наложение эталонных значений на результаты автоматизированного определения категорий). Масштаб 1:200 000

Fig. 6. The results of the mass check of the quality of determining the categories of passability on all territory of research (on the left – the reference values measured in the field, on the right – the superposition of the reference values on the results of the automated determination of categories). Scale 1:200 000

К недостаткам методики можно отнести необходимость проверки в ручном режиме при работе на схожих типах ландшафтов в количестве 20–30 точек (при необходимости – внести изменения в границы классов при разделении возможного диапазона значений F_i), а также необходимость проведения аналогичных по масштабу расчетов при смене типа ландшафта (в смешанных или лиственных лесах различных типов границы классов будут иными). К сильным сторонам методики можно отнести возможность работы по стандартным (а не сверхплотным) данным съемок методом лазерного сканирования, выполняемых при работе под масштаб 1:2 000.

ВЫВОДЫ

В результате исследования для регионов центральной части Ханты-Мансийского округа разработана методика автоматизированного дешифрирования и расчетов проходимости для техники лесной растительности по категориям на базе использования данных лазерного сканирования. Разработанная методика позволяет использовать для подобных расчетов обычные данные лазерного сканирования, выполняемого для нужд сейсморазведочных работ и/или информационного обеспечения проектов разработки месторождений под масштаб 1:2 000. Необходимая плотность лазерного сканирования в этом случае – 2–4 точки на 1 м², при этом эффективным является использование пилотируемых носителей аппаратуры лазерного сканирования, что позволяет оптимизировать затраты и скорость реализации проектов.

Результаты дешифрирования материалов лазерного сканирования и определения категорий проходимости обладают очень высоким уровнем достоверности (до 92,4 %), что было практически проверено на территории общей площадью свыше 30 000 га.

Экономическая эффективность данной методики проявляется в следующем:

- значительное ускорение ведения работ;
- снижение затрат на горюче-смазочные вещества и ресурс техники;
- возможность оптимизации сетки профилей для минимизации объема рубок;
- возможность использования полученных результатов при разработке проекта проведения сейсмопрофилирования без полевого выезда на местность.

Совокупная экономия от вышеописанных эффектов в масштабе жизненного цикла проекта превышает в несколько раз себестоимость проведения воздушного лазерного сканирования (в 2,2–3,4 раза) в зависимости от особенностей и размеров территории).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Варьгин К.А., Данилин И.М., Рыльский И.А. Инвентаризация и мониторинг лесов на основе лазерной локации, цифровой аэро- и космической фотосъемки и спутникового геопозиционирования. Материалы 3-й Международной практической конференции по лесоустройству, 2013. С. 56–59.
2. Данилин И.М., Фаворская М.Н. Моделирование структуры лесного покрова и рельефа местности по данным лазерной локации. Лесная таксация и лесоустройство, 2011. № 1–2. С. 40–47.
3. Дворяшин М.В., Скудин В.М., Корец М.А. Аэрокосмические методы мониторинга лесных территорий. Опыт применения в Восточной Сибири. Красноярск: Литера-Принт, 2011. 152 с.
4. Каплунов В.Я. Сопряженность распределений деревьев по поперечнику крон и диаметру стволов. Лесоведение, 2001. № 3. С. 63–69.
5. Капралов Е.Г., Кошкарев А.В., Тикунов В.С. Основы геоинформатики. Учебное пособие для студентов вузов в 2-х книгах. М.: Академия, 2004. 480 с.
6. Руководство по аэрофотосъемочным работам. Министерство гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 1986. 176 с.
7. Chen Q. Airborne lidar data processing and information extraction. Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, 2007. No. 73 (2). P. 109–112.

8. *Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A Method for Optimizing Height Threshold When Computing Airborne Laser Scanning Metrics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2017. V. 83. No. 5. P. 343–350. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.
9. *Holmgren J., Persson A.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 2004. V. 90. No. 4. P. 415–423. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00140-8.
10. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2008. V. 112. No. 10. P. 3891–3897. DOI: 10.1016/J.RSE.2008.06.007.
11. *Lohr U.* Digital Elevation Models by Laser Scanning: Principle and Applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.

REFERENCES

1. *Chen Q.* Airborne lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2007. No. 73 (2). P. 109–112.
 2. *Danilin I.M., Favorskaya M.N.* Using LIDAR for modelling forest structure and DEM. *Lesnaya taksacia I lesoustroystvo*, 2011. No. 1–2. P. 40–47 (in Russian).
 3. *Dvoriashin M.V., Skudin V.M., Korez M.A.* Aerospace methods for monitoring forested areas. Krasnoyarsk: Litera-Print, 2011. 152 p. (in Russian).
 4. *Gorgens E., Valbuena R., Rodriguez L.* A Method for Optimizing Height Threshold When Computing Airborne Laser Scanning Metrics. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 2017. V. 83. No. 5. P. 343–350. DOI: 10.14358/PERS.83.5.343.
 5. Guidance for aerial photography for cartographic purposes. Military topographic administration of High Command. Moscow, 1986. 176 p. (in Russian)
 6. *Holmgren J., Persson A.* Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, 2004. V. 90. No. 4. P. 415–423. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00140-8.
 7. *Kaplunov V.Y.* Contingency of tree distribution by log and canopy diameters. *Russian Journal of Forest Science*, 2001, No. 3. P. 63–69. (in Russian)
 8. *Kapralov E.G., Koshkarev A.V., Tikunov V.S.* Fundamentals of geoinformatics. Textbook for university students in 2 books. Moscow: Akademia, 2004. 480 p. (in Russian).
 9. *Korpela I.* Mapping of understory lichens with airborne discrete-return LiDAR data. *Remote Sensing of Environment*, 2008. V. 112. No. 10. P. 3891–3897. DOI: 10.1016/J.RSE.2008.06.007.
 10. *Lohr U.* Digital Elevation Models by Laser Scanning: Principle and Applications. Third International Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition, 1997. P. 174–180.
 11. *Varygin K.A., Danilin I.M., Rylskiy I.A.* Forest inventory and monitoring using LIDAR, aerospace imagery and global navigation systems. Proceedings of the 3rd International Practical Conference on Forest Management, 2013. Novosibirsk. P. 56–59. (in Russian).
-