

УДК 528:004

© Коллектив авторов

*Б.А. Новаковский, Н.С. Ковач, А.Л. Энтин, Л.В. Калиновский*

## ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНОГО ПОКРОВА ПО МАТЕРИАЛАМ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ

Лазерное сканирование считается одним из наиболее перспективных видов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В лазерных сканерах применяется активный метод сканирования. Многократное излучение лазерного импульса, его последующее отражение от объектов земной поверхности и регистрация этих отражений в приемнике позволяет получить набор данных, называемый «облаком точек» [6]. Пример облака точек приведен на рис. 1.

Различают следующие виды лазерного сканирования: наземное, мобильное и воздушное. При наземном лазерном сканировании съемочная система неподвижна. Мобильное лазерное сканирование осуществляется во время движения носителя сканирующей системы (автомобиль, локомотив или другие средства передвижения) по поверхности Земли, сбор данных происходит вдоль траектории движения. Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) производится с летательных аппаратов. Набор получаемых данных

при ведении съемки этим методом может покрывать обширные территории, в том числе недоступные для других видов лазерного сканирования.

Технологические возможности лазерного сканирования позволяют применять его в качестве эффективного средства получения информации в различных сферах деятельности. Например, в проектировании и мониторинге объектов инфраструктуры, при создании топографических карт, в исследованиях различных природных объектов и процессов. Еще одно направление, в котором активно используются возможности воздушного лазерного сканирования, – это лесное хозяйство [1].

В первых исследованиях по применению данных лазерного сканирования в области лесного хозяйства определяли традиционные для таксации леса характеристики: высоты древостоя, площади поперечного сечения деревьев и объема биомассы [5]. В некоторых странах (Финляндия, Швеция)



Рис. 1. Пример окрашенного облака точек ВЛС по цветовым оттенкам пикселей ортофотоплана

развитие лазерного сканирования привело к его внедрению в государственные системы инвентаризации лесов. Кроме того, на основе данных ВЛС были разработаны методы получения сведений о биомассе древостоя, оценки погибшей древесины, описания структуры леса, определения территорий, покрытых лесом, и безлесных участков. Также созданы способы определения индекса листовой поверхности, оценки способности растительности к возгоранию, использования данных лазерных отражений в противопожарных мероприятиях и другие виды применения материалов лазерного сканирования в лесном хозяйстве [4].

Картографирование лесов входит в число направлений лесного хозяйства, применяющих для решения различных задач лазерное сканирование. В основном создание карт происходит на базе тех же характеристик, которые используются при инвентаризации леса и при экологических исследованиях. В качестве примеров можно привести картографирование типов лесной растительности по способности к возгоранию [3] и картографирование индекса листовой поверхности городской древесной растительности [2].

Остановимся подробнее на понятиях «картографирование леса» и «картографирование лесного покрова». Эти понятия в отечественной научной литературе используются как синонимы. В данной работе предпочтение отдано термину «лесной покров». Это связано с тем, что лесной покров представляет собой явление, имеющее (по крайней мере, концептуально) непрерывный характер распространения. В процессе создания карт по материалам лазерного сканирования происходит построение различных поверхностей, которые, по своей сути, так же характеризуют непрерывные явления.

В качестве показателя для картографирования лесного покрова выбрана высота деревьев. Методика создания карты высоты лесного покрова разработана и апробирована на примере участка площадью 40 км<sup>2</sup>, расположенного на территории Национального парка Марка Твена (Mark Twain National Forest). Изучаемая территория представляет собой холмистую, сильнорасчлененную местность, расположенную в северо-восточной части плато Озарк в пределах округа Вашингтон штата Миссури (США). Амплитуда высот составляет 160 метров. Наивысшая отметка – 394 м – находится в юго-западной части участка. Исходные материалы ВЛС получены с интернет-сервиса Геологической службы США [9].

В процессе работы с материалами ВЛС использовано программное обеспечение Bentley MicroStation v8i с подключаемыми модулями для работы с данными лазерного сканирования

программного продукта TerraSolid, а также ГИС-пакеты SAGA и ArcMap.

Методика создания карты высоты лесного покрова заключается в последовательном выполнении нескольких этапов, которые приведены на рис. 2.

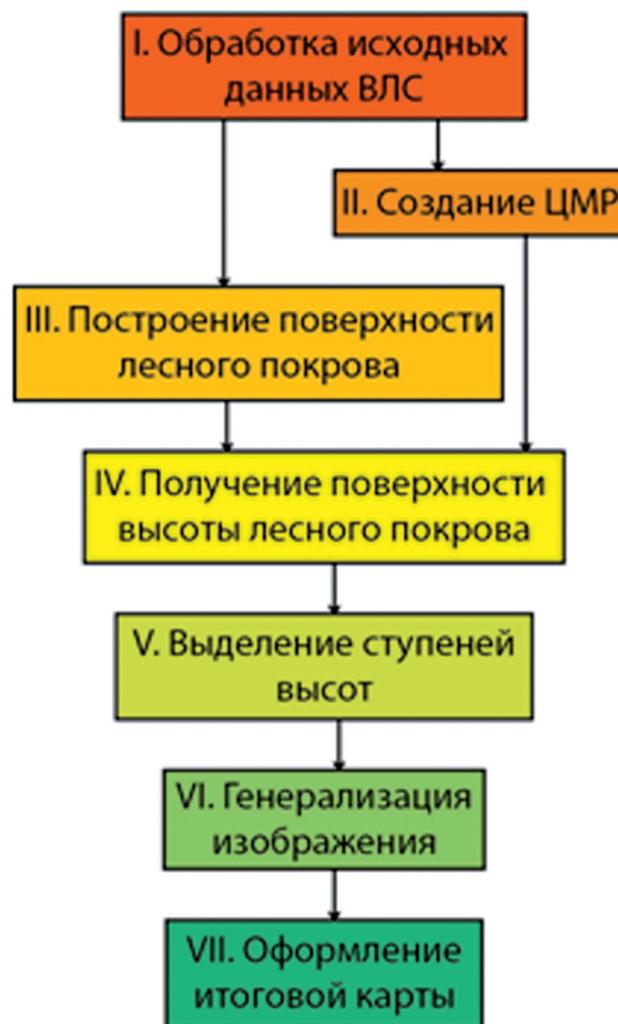


Рис. 2. Методика создания карты высоты лесного покрова

Создание карты высоты лесного покрова начинается с обработки данных ВЛС. Сначала проводится классификация исходного облака точек. В первую очередь, необходимо выделить класс «земли», в который определяются все точки, соответствующие земной поверхности.

Выделение выполнено методом молдинга (molding). Это итерационный метод, суть которого заключается в том, что сначала на основе абсолютного минимума в ячейках регулярной сетки отбираются точки, по которым строится триангуляционная модель. Затем к полученной модели добавляются дополнительные узлы, соответствующие точкам лазерных отражений (ТЛО). После присоединения

этих точек модель перестраивается. Добавление точек ограничено параметрами, которые устанавливает пользователь. Путем поиска оптимального набора параметров можно достичь наилучшего выделения точек земной поверхности. Этот метод реализован в модуле TerraScan программного пакета TerraSolid [8].

После выделения отражений, принадлежащих земной поверхности, необходимо провести проверку выполненной классификации с целью исключения точек, неверно отобранных алгоритмом молдинга. Проверка выполняется путем просмотра модифицируемой модели, построенной по отражениям класса «земли». В случае обнаружения некорректно отображенного участка, точки перемещают из одного класса в другой. При изменении класса точек изображение поверхности перестраивается в интерактивном режиме.

На основе отредактированного класса «земли» построена цифровая модель рельефа (ЦМР) в виде триангуляционной модели (рис. 3).

Следующий этап – построение поверхности лесного покрова. Сначала из обработки исключены точки, расположенные на высоте менее 1 метра от поверхности земли. Эти точки переведены в класс «низкой растительности» (рис. 4).

Затем из класса «высокой растительности» извлечены первичные отклики каждого излученного электромагнитного импульса и переведены в отдельный класс (рис. 5). Извлечение первичных отражений связано с низкой вероятностью того,

что второе и последующие по счету отражения принадлежат поверхности лесного покрова.

Следующим шагом стало построение поверхности лесного покрова по точкам класса «высокая растительность». Однако не все точки данного класса лазерных отражений обязательно будут относиться к вершинам деревьев. Поэтому для поиска оптимального результата опробовано несколько способов построения поверхности, среди которых можно выделить следующие:

1. Поиск и регистрация максимального значения высоты точек лазерных отражений в каждом пикселе раstra определенного пространственного разрешения.
2. Предварительная фильтрация лазерных отражений класса «Высокая растительность». Фильтрация основана на анализе точек, принадлежащих окружности определенного радиуса, в пределах которой остается только точка с наибольшим значением высоты. На основе отфильтрованных точек происходит построение триангуляционной модели, которая представляет поверхность, образованную вершинами деревьев.
3. Применение молдинга, с помощью которого выделяется класс ТЛЮ «земля». Для этого необходимо предварительно подготовить облако точек. Первым шагом проводится их трансформация, которая базируется на инверсии значений высот. Другими словами,

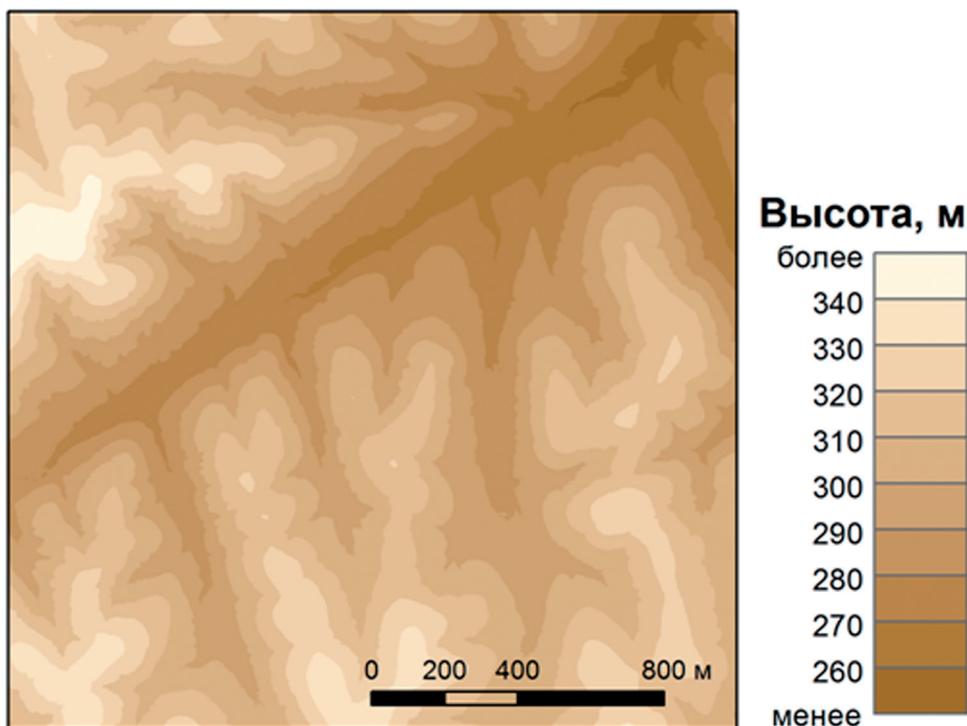


Рис. 3. Фрагмент ЦМР, построенной на основе триангуляции по точкам класс «земли» (высота над уровнем моря)

происходит зеркальное отражение точек лазерного сканирования относительно нулевой поверхности. На следующем шаге, по аналогии с выделением класса «земли», происходит классификация «перевернутых» вершин деревьев методом молдинга (рис. 6). Однако в данном случае необходимо задать иные параметры проведения алгоритма, так как поверхность, образованная вершинами крон деревьев, имеет более резкие перепады высот

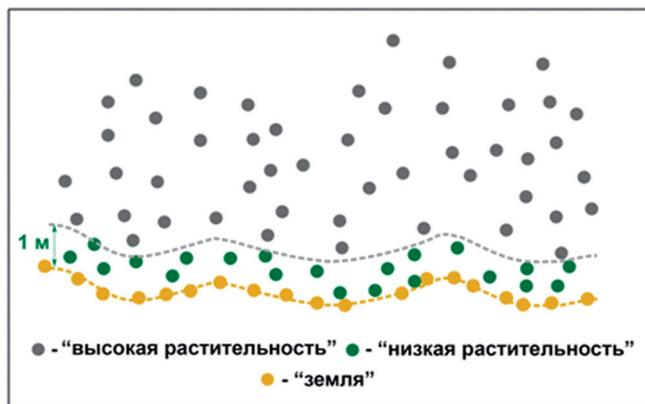


Рис. 4. Выделение в отдельный класс точек, высота которых меньше 1 м над землей

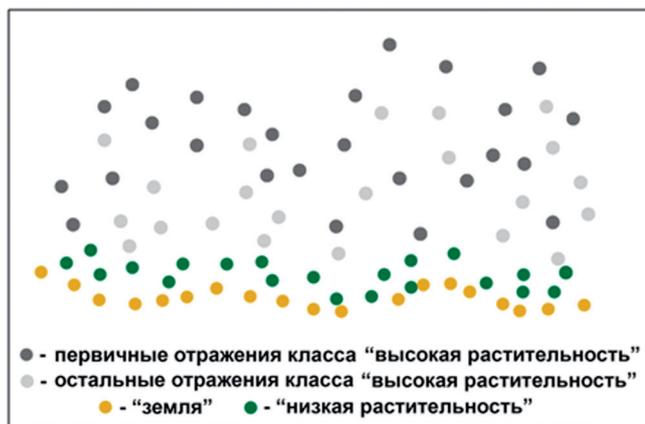


Рис. 5. Извлечение первичных отражений

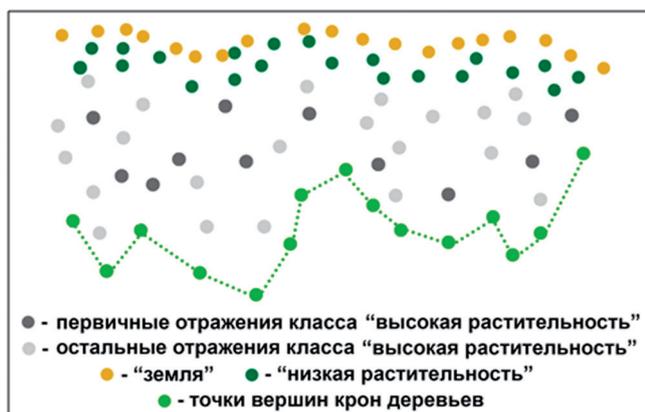


Рис. 6. Применение молдинга к перевернутому облаку точек

на малых расстояниях. После выделения класса вершин деревьев следует провести обратную трансформацию облака точек, чтобы вернуть значения высот в исходное положение. По лазерным отражениям, отнесенным к созданному на предыдущем шаге классу, происходит построение триангуляционной модели, которая представляет собой искомую поверхность.

В данной работе для создания поверхности лесного покрова (рис. 7) выбран третий способ, основанный на трансформации облака точек и применении молдинга.

Далее необходимо извлечь высоту лесного покрова посредством вычитания ЦМР из поверхности лесного покрова [7]. Результат, получаемый при простом вычитании поверхностей, не подходит для целей картографирования без последующей обработки (рис. 8). Поэтому для улучшения визуальных характеристик данная поверхность подвергается процедуре сглаживания с помощью скользящего окна.

Для изображения высот лесного покрова на составляемой карте применяется способ количественного фона. Этот способ требует классификации непрерывного множества высот и выделения ступеней. Выделение ступеней проводится на основе анализа гистограммы распределения значений полученного на предыдущем шаге изображения и пространственного размещения высот деревьев (рис. 9). Количество ступеней и их значения зависят как от типа распределения, так и от амплитуды значений высот. В данном случае определено пять ступеней для отображения высоты лесного покрова количественным фоном: менее 9 м, 9-13 м, 13-17 м, 17-21 м, 21 м и более.

По итогам выделения ступеней высоты лесного покрова проведена переклассификация значений раstra в соответствии с выделенными границами ступеней. Данная операция выполнена для закрепления пространственного положения полигонов, которым характерна определенная высотная ступень (рис. 10).

На следующем этапе, в соответствии с общепринятыми требованиями к составлению карт, проведена генерализация контуров. Для составления карты высоты лесного покрова достаточно применить такие приемы генерализации, как обобщение очертаний, объединение контуров и ценз отбора.

При обобщении очертаний и объединении контуров на практике применяются различные подходы. Один из способов, позволяющих в автоматизированном режиме генерализовать растровое изображение – применение «фильтра большинства» (Majority filter).

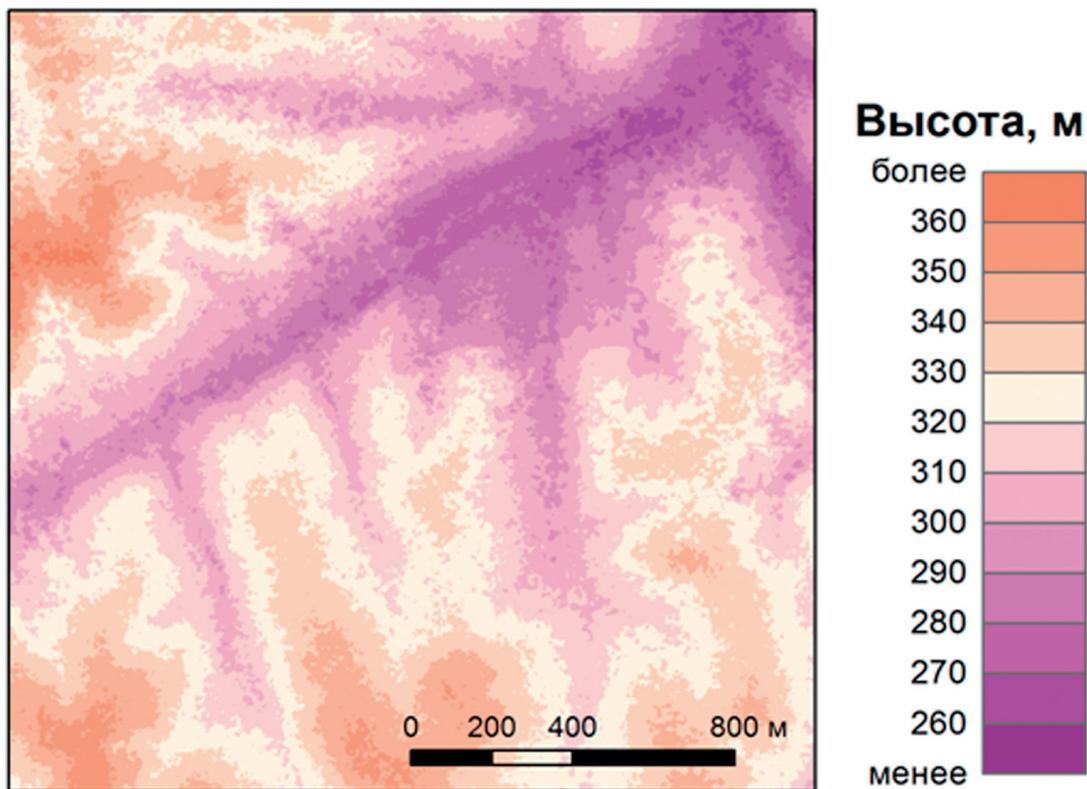


Рис. 7. Фрагмент поверхности лесного покрова (высота над уровнем моря)

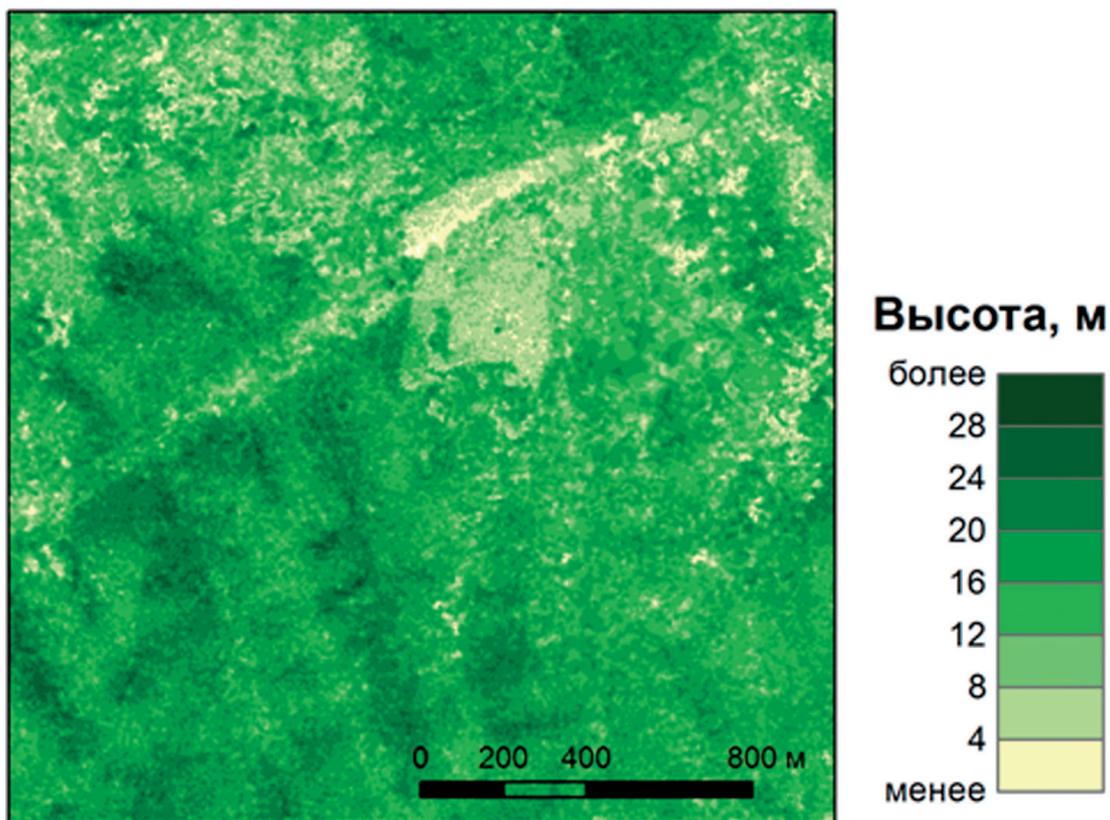


Рис. 8. Фрагмент изображения по итогам вычитания ЦМР из поверхности лесного покрова

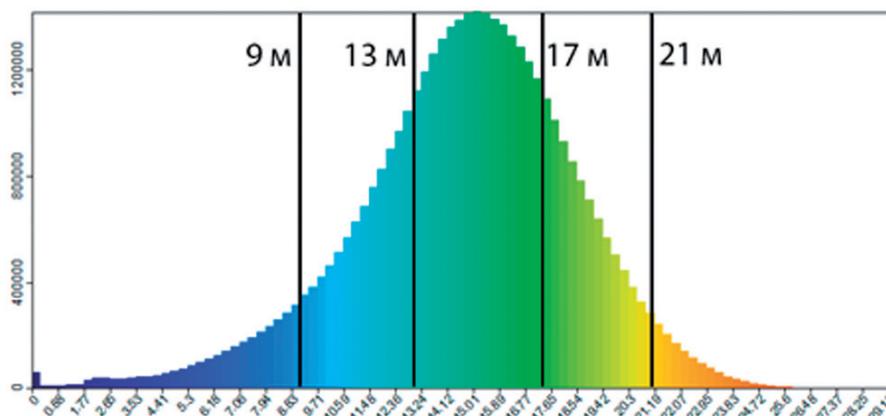


Рис. 9. Гистограмма распределения значений высот лесного покрова

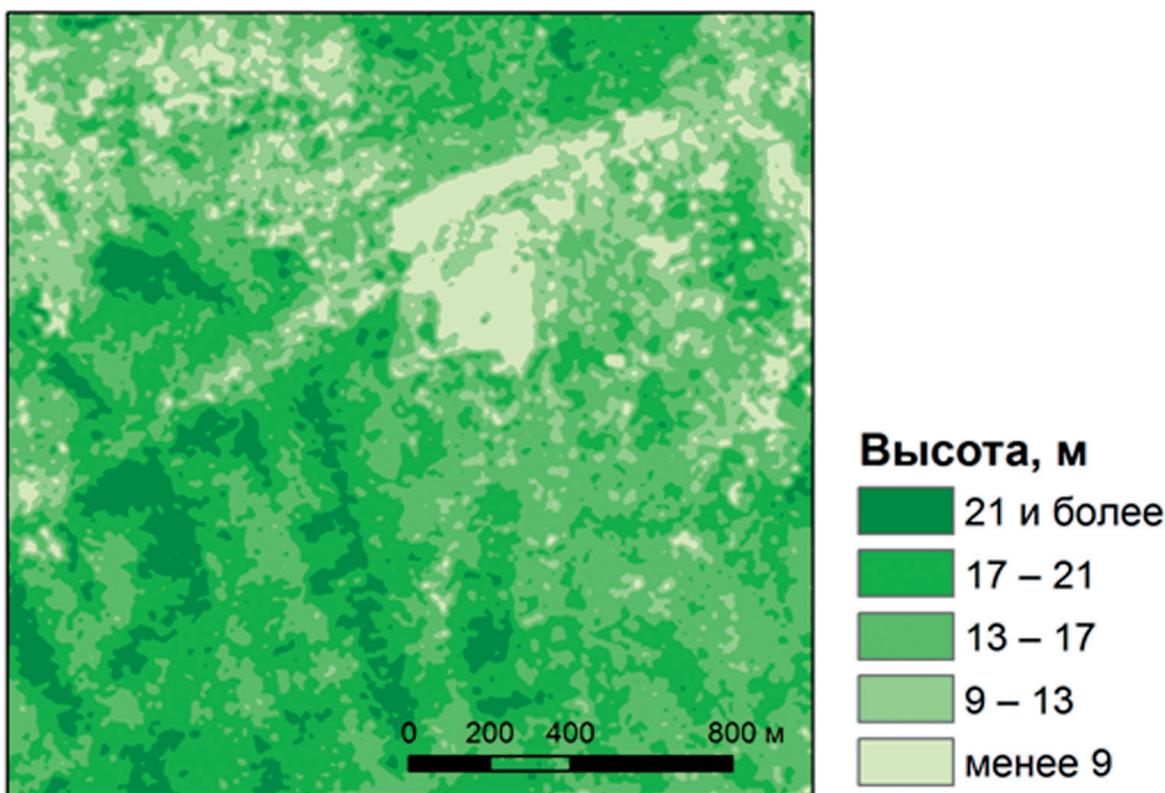


Рис. 10. Фрагмент изображения по итогам выделения ступеней высот

Данный метод заменяет значения ячеек раstra на максимальное из множества соседних ячеек [7].

Применение ценза отбора в современных геоинформационных системах осуществляется на основе атрибутивного запроса. Данную операцию можно применять к векторным файлам, в таблице атрибутов которых имеется поле со значением площади объекта. В связи с этим, растровое изображение, подвергнутое обработке на предыдущих этапах, необходимо векторизовать. В данном случае по итогам применения атрибутивного запроса выделены и затем удалены все полигоны, площадь которых меньше 4000 м<sup>2</sup>. Такой выбор значения

ценза обусловлен тем, что на тематических картах минимальный размер контуров может достигать 8-12 мм<sup>2</sup>. Для создаваемой карты высоты лесного покрова, масштаб которой равен 1:20 000, данной площади будет соответствовать полигон размерами порядка 65 × 65 м.

По причине того, что на предыдущем шаге некоторые полигоны были удалены, на новом растровом изображении возникли пробелы – участки, на которых отсутствует какое-либо значение показателя. После устранения пробелов необходимо оценить, насколько полученное изображение соответствует предъявляемым требованиям для создания

карты высоты лесного покрова. В данном случае по итогам заполнения возникших разрывов качество генерализации оказалась неудовлетворительным (рис. 11). Поэтому была проведена еще одна итерация всех этапов генерализации переклассифицированного раstra.

Заключительным этапом стало оформление итоговой карты с помощью ПО ArcMap. Составленная по материалам ВЛС карта (рис. 12) характеризует высоту лесного покрова. Основное содержание карты оформлено количественным фоном в зеленых оттенках. Такой выбор цветового оформления обусловлен тем, что леса наиболее часто ассоциируются с зеленым цветом. Каждой высотной ступени характерен свой оттенок: территориям с более высокими деревьями соответствует более темный оттенок зеленого цвета, а территориям с более низкими значениями высоты лесного покрова – светлый оттенок.

Помимо высоты лесного покрова на карте приведена картографическая основа. В ее состав вошли лесные дороги, выполненные в виде черных пунктирных линий, а также объекты гидрографии, представленные в виде линейных объектов синего цвета. Кроме того, на карте отображен рельеф: горизонтали проведены через 20 м, утолщенной горизонтали соответствует значение абсолютной высоты, равной 300 м над уровнем моря. Также на карте проставлены отметки абсолютных высот.

По данной карте можно сделать вывод, что наибольшая высота деревьев на исследуемой территории приурочена к склонам северной и восточной экспозиции. Кроме того, увеличение высоты деревьев наблюдается по мере приближения к днищам долин и балок. Такое распределение может быть связано продолжительностью солнечного освещения, с локальными характеристиками увлажнения грунта, а также с преобладающим направлением переноса воздушных масс.

Составленная карта позволяет наглядно отображать высоты древостоя и выявлять закономерности пространственного распределения высоты лесного покрова.

Данная работа может послужить базой для дальнейших исследований по картографированию лесного покрова. В частности, существует возможность анализа карты высоты лесного покрова совместно с породным составом древостоя, произрастающего на изучаемых участках. В современном лесном хозяйстве по материалам ВЛС активно изучаются возможности определения структуры лесного покрова. Кроме того, проводятся исследования по широкому диапазону других направлений, что также подразумевает большие возможности для картографирования.

Исследования выполнены в рамках государственной темы «Методы и технологии картографии,

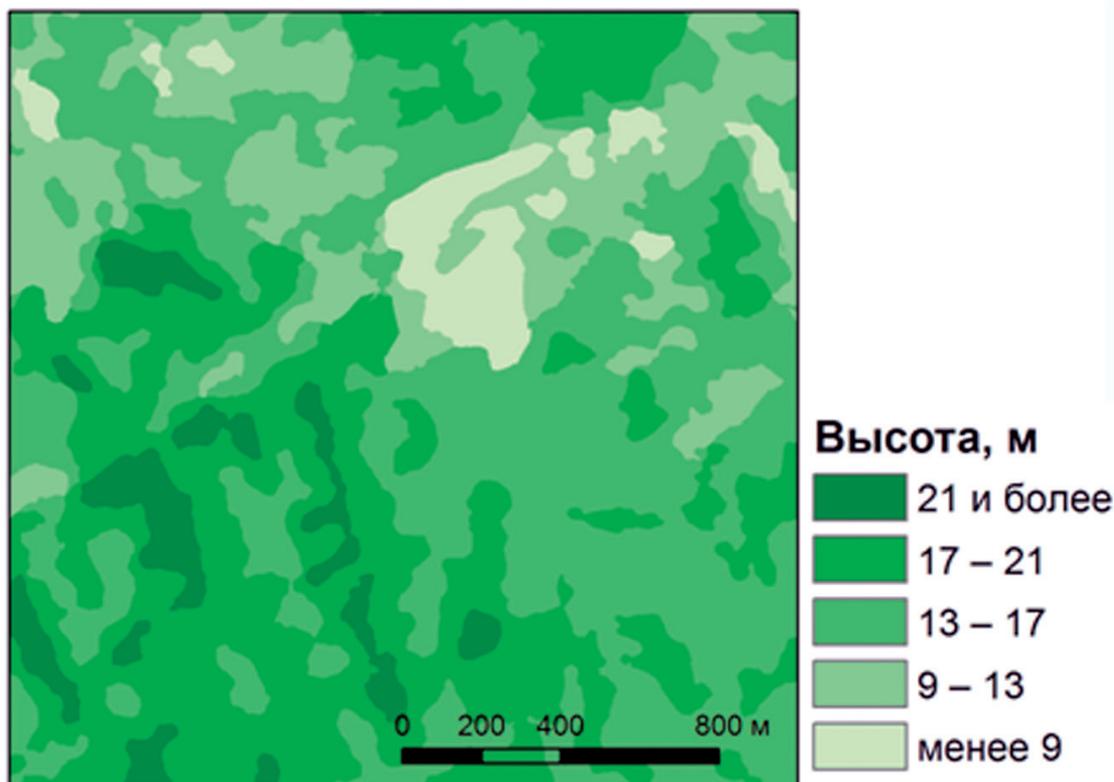


Рис. 11. Фрагмент изображения по итогам генерализации (после первой итерации)

геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях изменений природной среды и общества». Номер ЦИТИС: АААА-А16-116032810094-9.

**Ключевые слова:** воздушное лазерное сканирование, облако точек, лесной покров, высота деревьев, ЦМР, ЦММ, поверхность высот древостоя, геоинформационное картографирование.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие. – Красноярск : Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.
2. Alonzo M., Bookhagen B., McFadden J.P., Sun A., Roberts D.A. Mapping urban forest leaf area index with airborne lidar using penetration metrics and allometry // Remote Sensing of Environment. – 2015. – № 162. – P. 141-153.
3. Gajardo J., García M., Riaño D. Applications of Airborne Laser Scanning in Forest Fuel Assessment and Fire Prevention // Forestry Applications of Airborne Laser

- Scanning: Concepts and Case Studies. – 2014. – Ch. 22. – P. 439-463.
4. Maltamo M., Næsset E., Vauhkonen J. Forestry Applications of Airborne Laser Scanning : Concepts and Case Studies. – Springer, 2014. – 464 p.
5. Næsset E. Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data // ISPRS J. Photogramm. & Remote Sens. – 1997. – № 52. – P. 49-56.
6. Wehr A., Lohr U. Airborne laser scanning – an introduction and overview // ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing. – 1999. – № 54. – P. 68-82.
7. SAGA GIS Help. – URL: <https://sourceforge.net/projects/saga-gis/> (дата обращения: 16.02.2016).
8. TerraScan User's Guide [Electronic resource]. – URL: <http://www.terrasolid.com/download/tscan.pdf> (дата обращения: 21.01.2016).
9. USGS : Earth Explorer [Electronic resource]. – URL: <http://earthexplorer.usgs.gov/> (дата обращения: 03.02.2016).

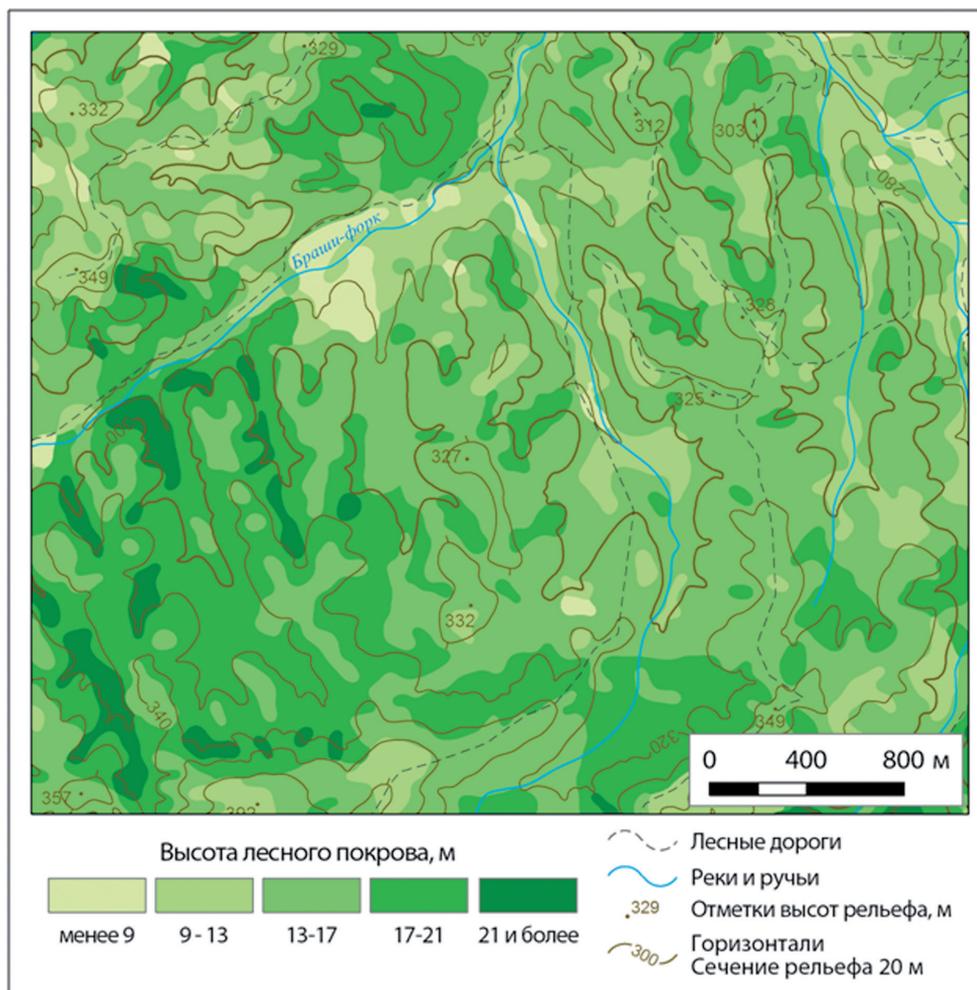


Рис. 12. Фрагмент карты высоты лесного покрова на участок территории Национального парка Марка Твена, штат Миссури, США