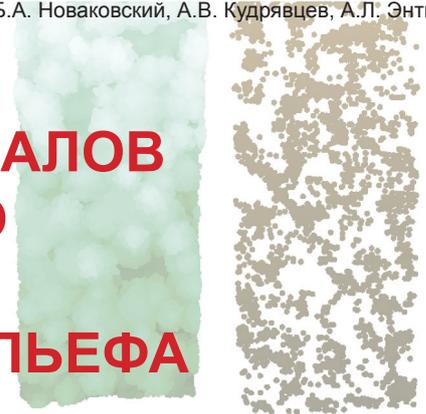


УДК 528.8

© Б.А. Новаковский, А.В. Кудрявцев, А.Л. Энтин

*Б.А. Новаковский, А.В. Кудрявцев, А.Л. Энтин*

# ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МАТЕРИАЛОВ ВОЗДУШНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ ПРИ КАРТОГРАФИРОВАНИИ РЕЛЬЕФА



Моделирование геообъектов и геопроцессов

## Понятие воздушного лазерного сканирования и его принцип

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) – активный метод дистанционного зондирования, основанный на импульсном измерении дальностей и углов до точек местности с помощью лазера. Схема воздушного лазерного сканирования и три функциональные части сканирующей системы представлены на рис. 1. Съемка может выполняться с использованием пилотируемых или беспилотных летательных аппаратов. Результатом лазерной съемки является облако точек, в котором каждая их точек имеет пространственные координаты (X, Y, Z), а также ряд стандартизированных атрибутов (интенсивность, цвет, класс и др.).

Один импульс может отразиться от поверхности Земли и расположенных на ней объектов несколько раз. Это является одним из факторов, обуславливающих возможность вести съемку рельефа на залесенных территориях с небольшим проективным

покрытием (леса бореального пояса). Данное свойство является значительным преимуществом, по сравнению с пассивными методами дистанционного зондирования.

ВЛС применяется для решения широкого круга задач – инженерных, геодезических, архитектурных, геологических, географических. В географических исследованиях лазерное сканирование чаще всего применяется для цифрового моделирования рельефа и местности, для мониторинга береговых зон, лавиноопасных склонов, изучения динамики ледников, а также для картографирования лесного, снежного покрова [2, 4].

## Цифровое моделирование рельефа на основе ВЛС: возможности и трудности

В большинстве случаев в географических исследованиях данные ВЛС в первую очередь необходимы для построения цифровых моделей рельефа (ЦМР) или местности (ЦММ). ВЛС, по сравнению с другими методами дистанционного зондирования, имеет ряд преимуществ для цифрового моделирования рельефа, таких как высокая точность (в плане до 0,2 м и по высоте 0,05 м), детальность (до 20 точек/м<sup>2</sup>), простота обработки и практически полное исключение наземных работ. Воздушное лазерное сканирование используется для картографирования в крупных масштабах (1:10 000 и крупнее) [1, 6].

Цифровое моделирование рельефа на основе облака точек ВЛС состоит из нескольких этапов. На первом этапе необходимо произвести фильтрацию грубых ошибок – шума [2]. Поскольку точки могут относиться к любым объектам местности, далее необходимо произвести их классификацию. Классификация облака точек – это процедура автоматического или ручного выделения группы точек, имеющих схожие свойства и геометрические параметры [7]. В результате классификации каждой точке облака сопоставляется кодированное значение класса. Каждый из классов в соответствии с форматом хранения ASPRS LAS имеет свой код: 0 – точки, которые не классифицировались; 1 – неклассифицированные

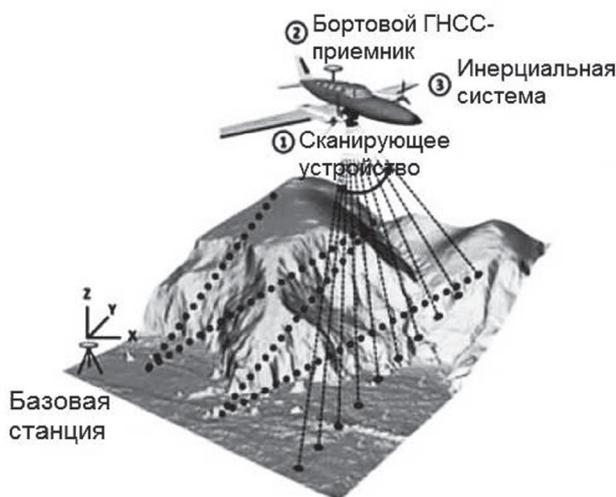


Рис. 1. Сканирование местности бортовым лазерным сканером с целью получения облака точек [7]

Fig. 1. Terrain scanning with airborne laser scanner to obtain a point cloud [7]

точки; 2 – точки «земли»; 3 – низкая растительность и др. Для использования полученных данных с целью моделирования рельефа необходимо из общего облака выделить точки, относящиеся к земной поверхности – истинному рельефу.

Однако в области существуют факторы, оказывающие негативное влияние на цифровое моделирование рельефа по материалам лазерной съемки. Одним из них является такая особенность природных территорий, как лесная растительность. Она осложняет использование полученных данных и сталкивает нас с рядом проблем и методических вопросов, связанных с изменением детальности данных для лесопокрытых территорий. Далее будет подробно рассмотрен вопрос, который заключается в исследовании степени снижения детальности данных воздушного лазерного сканирования под лесным покровом на примере конкретной территории.

### Материалы и методы

Для иллюстрации была выбрана территория с горным рельефом. Она расположена на североамериканском побережье Тихого океана у подножия Береговых гор, в штате Аляска, США (рис. 2). Территория была выбрана с учетом условия присутствия значительных перепадов высот, наличия залесенных и безлесных участков местности. Для понимания методики и дальнейших результатов необходимо более подробно коснуться физико-географических особенностей исследуемой территории. Для удобства далее территория будет обозначаться в тексте как «Джуно» (по соседству с одноименным городом).

Рельеф сформирован ледниковыми, флювиальными и склоновыми процессами, присутствуют значительные по размерам эрозионные формы рельефа. Абсолютная высота водораздельных участков составляет более 1000 метров, крутизна склонов

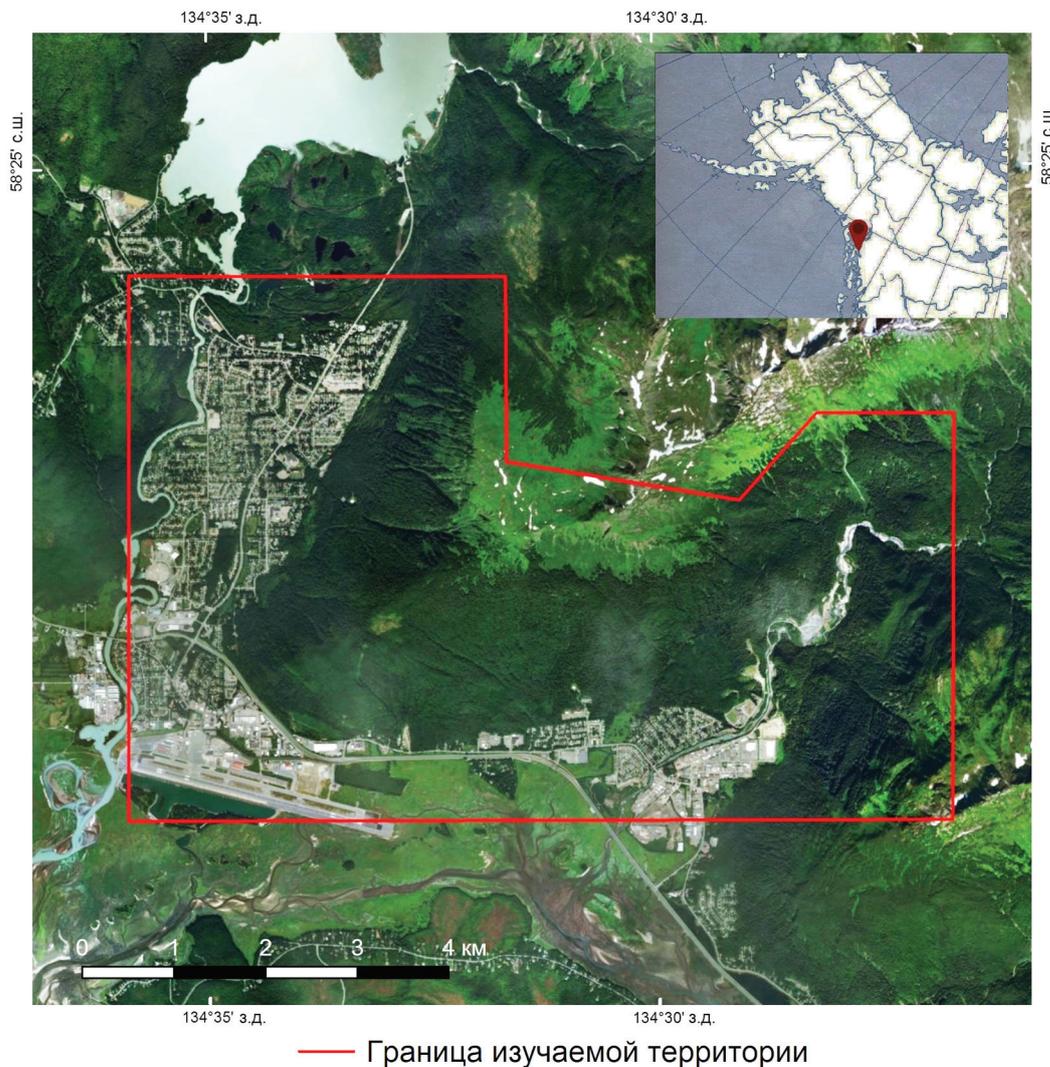


Рис. 2. Исследуемая территория «Джуно» на космическом снимке (площадь 47,2 км<sup>2</sup>)

Fig. 2. Satellite image of «Juneau» case study area (47,2 km<sup>2</sup>)

изменяется в пределах от 10 до 60°. Территория расположена в зоне тайги с преобладанием еловых лесов, тип высотной поясности – лесо-тундровый приокеанический, граница леса – на высоте 600-700 метров, выше которого расположены каменные россыпи и горные тундры.

Данные взяты с общедоступного ресурса DGGs Elevation Portal [8]. Лазерное сканирование выполнялось в 2012 году. Основная методика работы производится после получения и подготовки исходных данных, а именно классифицированных облаков точек. Обработка и визуализация данных были произведены с использованием следующего ПО: ArcGIS ArcMap 10.5, SAGA GIS, Global Mapper 18 и WhiteboxGIS. Методика включает в себя следующие этапы:

1. *Вычисление плотности* полного облака точек лазерного сканирования и отдельно точек земной поверхности путем создания схем плотности. Предварительно определяется размер ячейки, при котором будет оцениваться плотность, поскольку для оценки и визуализации плотности было выбрано растровое представление. На основании анализа зависимости средней плотности от размера ячейки растра плотности с использованием инструмента Hex-binning в ПО WhiteboxGIS был выбран итоговый размер ячейки для создания растров плотности. С учетом визуального восприятия полученных изображений он составил 25 метров. Схемы плотности составлены в ПО SAGA GIS.
2. *Проведение границ* в соответствии с характером местности по космическому снимку. Чтобы дополнительно изучить распределение плотности, территория была разделена на участки. Границы были выделены по космическому снимку. Основным принцип заключался в отделении местностей с различным характером покрытия (Land cover) – лесопокрываемых, безлесных и переходных между ними, водных, а также антропогенных. Для каждого участка в ПО ArcGIS была посчитана зональная статистика по показателю плотности точек.
3. *Подсчет статистики* (средней плотности точек) в пределах выделенных зон.
4. *Расчет целевого размера ячейки ЦМР* для каждой зоны. К этому подводит этап оценки детальности данных, он необходим для принятия решения о разрешении ЦМР. Задача выбора пространственного разрешения ЦМР сводилась к выбору размера ячейки целевого растра, который был вычислен для участков каждой территории по формуле:

$$S = \sqrt{\frac{A}{n}},$$

где  $S$  – размер ячейки,  $A$  – площадь территории,  $n$  – количество исходных точек в ее пределах [7].

5. *Построение TIN* и регулярно-сетчатой ЦМР с определенными на предыдущем этапе размерами ячеек, их сравнение.
6. *Анализ детальности ЦМР* и установление соответствия с отображенными формами рельефа.

### Результаты и обсуждения

Анализируя полученные схемы плотности (рис. 3, 4), можно сказать, что плотность точек лазерного сканирования крайне неравномерна в исходном наборе.

Значения плотности точек воздушного лазерного сканирования в полном облаке точек варьируют в достаточно большом диапазоне (от 0,5 до 36 точек на квадратный метр). На рис. 3 видно, что по всей территории присутствуют полосы с четкими границами, опознаваемыми по резкому увеличению плотности точек относительно фоновой в 1,5-2 раза. Это области перекрытия полос сканирования. Также видно, что наибольшая плотность наблюдается у лесопокрываемой территории, причем она отличается и в ее пределах. Пятну наибольшей плотности на местности соответствует наиболее возвышенный залесенный участок. Участкам с наименьшей плотностью на местности соответствуют безлесные территории. Переходные же зоны имеют очень пеструю плотность, средние значения которой лежат в пределах средних значений соседних участков.

Значения плотности точек земной поверхности имеют меньшие абсолютные значения (от 0,3 до 8 точек на квадратный метр), чем плотность всего облака точек. К тому же, распределение плотности точек земной поверхности (рис. 4) не зависит напрямую от распределения плотности полного облака точек – влияют и другие факторы. Наибольшие контрасты плотности проявляются между участками, что подтверждает зависимость от характера местности – под лесной растительностью плотность меньше в 5 раз. Внутри участков различия не столь значительные. Также можно заметить, что эффект от перекрытия полос сканирования проявляется только на открытых участках.

Считая, что плотность точек является критерием детальности данных воздушного лазерного сканирования, можно сделать вывод, что она зависит от факторов, которые можно разделить на две группы: технологические особенности съемки и географические особенности территории. В первой группе

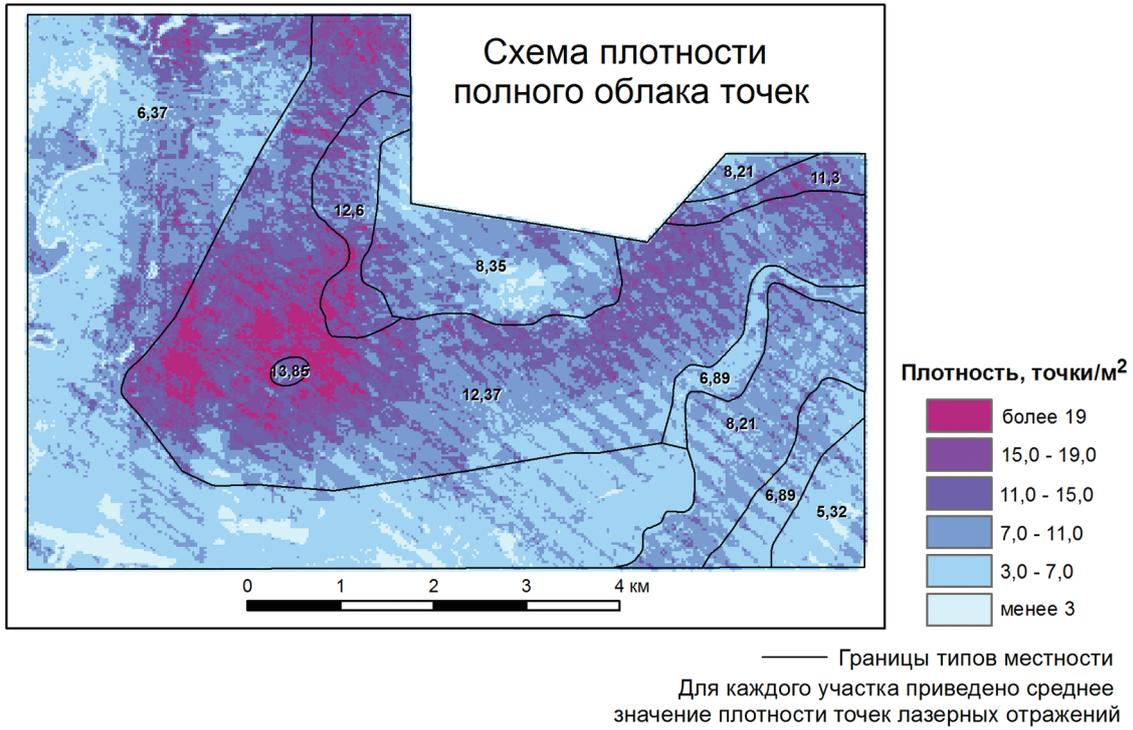


Рис. 3. Распределение плотности в полном облаке точек

Fig. 3. Full point cloud density distribution

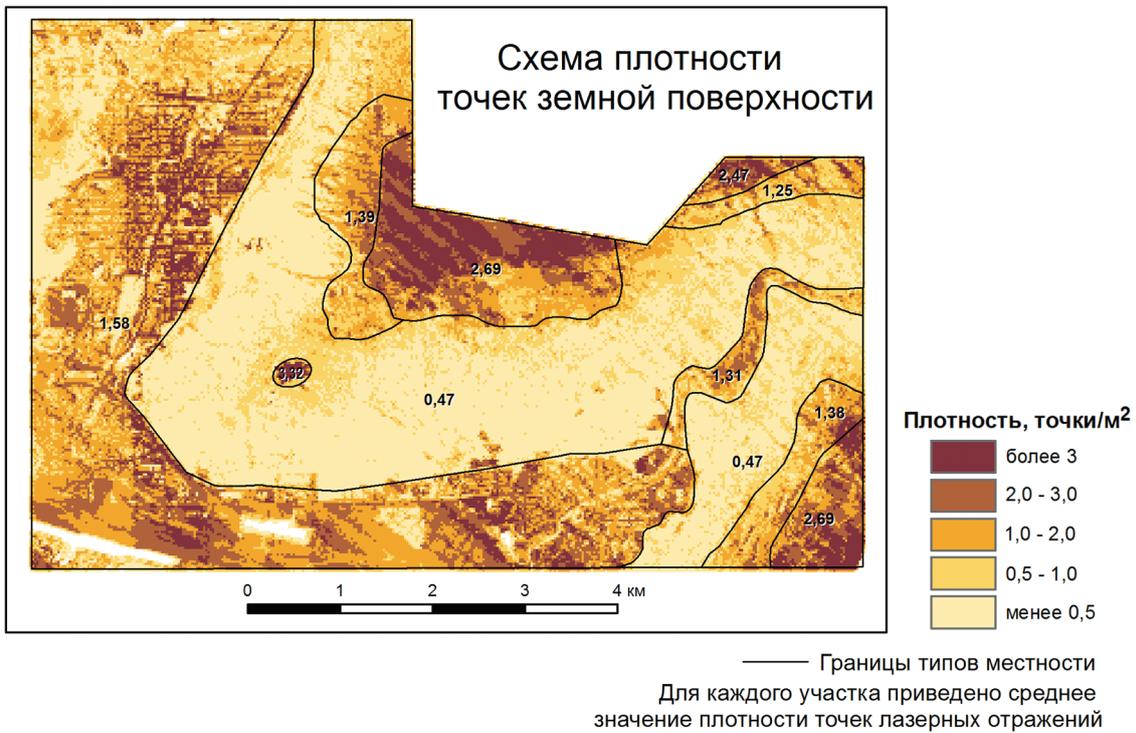


Рис. 4. Распределение плотности точек земной поверхности

Fig. 4. Bare earth point cloud density distribution

основными являются ширина полосы сканирования, относительная высота залета и ориентация поверхности к по отношению к съемочному устройству.

Рассмотрим более подробно географические факторы, к которым следует отнести характер местности, – поверхность, на которую падает лазерный луч. Если это поверхность сложной формы, как, например, кроны деревьев или здания, то количество возвращенных импульсов возрастает ввиду многократных переотражений. В связи с этим больше и плотность лесопокрытых территорий в полном облаке точек. Открытая земная поверхность – рассеиватель, поэтому значительно меньшее количество отраженных импульсов от такого рода поверхности регистрируется датчиком. Поэтому плотность открытых незалесенных территорий в полном облаке точек гораздо меньше, чем лесопокрытых. Видно, что при наличии лесной растительности количество и плотность точек выше между кронами деревьев, следовательно, чем более плотный и сомкнутый лес, тем менее детальные данные о рельефе можно получить. Хорошо иллюстрирует данное утверждение рис. 5, на котором можно проследить точное соответствие в положении крон деревьев и снижении количества

точек отражений под ними. Это объясняет большие контрасты распределения плотности точек «земли».

Рассчитанный целевой размер ячейки выходной модели визуализирован в виде схемы, представленной на рис. 6. Его величина зависит от детальности исходных данных: чем выше плотность, тем меньше размер ячейки. Получается, что на открытые территории возможно построение более детальных ЦМР с меньшим размером ячейки, а на лесопокрытые – менее детальных. Получено 4 значения размера ячейки, соответствующих минимальному, максимальному, простому и взвешенному среднему по площади участков (табл. 1).

Для построения ЦМР и дальнейшего анализа было выбрано только два размера ячейки ЦМР, один из которых минимальный для территории (0,6 м). Стоит сказать, что при попытке создания ЦМР с размерами ячейки больше обозначенного максимального, происходит техническая генерализация, и небольшие формы рельефа просто исчезают с модели. Для иллюстрации этого утверждения взят второй размер ячейки, заведомо больший максимального и отличающийся в 10 раз от основного (6 м). Итак, ЦМР были построены в ПО SAGA GIS с использованием Natural Neighbor (естественный сосед) в качестве алгоритма интерполяции. Визуализация и сравнение были проведены в ПО ArcGIS путем построения по каждой из них изогипс, которые практически не отличаются, и, начиная с масштаба 1:5000 и мельче, их можно назвать совпадающими.

Анализ созданных моделей заключался в опознавании форм рельефа, отображенных на них, а также нахождении минимального размера этих форм. На территории «Джуно» к формам рельефа с самыми малыми размерами были выявлены только эрозионные формы рельефа, а также аккумулятивные, связанные с ними. Они представлены промоинами, оврагами и конусами выноса. Наименьшая ширина эрозионных форм, выделяемых на ЦМР, составляет 10-15 метров, глубина – 2-3 м (рис. 7, верх). Что касается минимального размера конусов выноса, то он составляет порядка 30-40 м шириной и высотой до 3 метров относительно поверхности, на которую они выходят (рис. 7, низ).

### Заключение

Основная задача исследования состояла в том, чтобы выяснить, насколько сильно снижается детальность данных воздушного лазерного сканирования под лесопокрытыми территориями. На примере территории «Джуно», где преобладает горная тайга, было подтверждено, что точность и детальность данных ВЛС как исходных данных для цифрового моделирования рельефа зависит не только

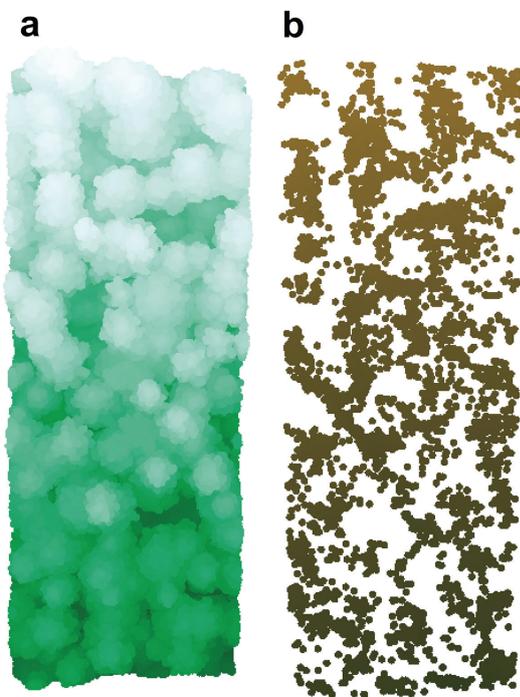


Рис. 5. Фрагменты полного облака точек (а) и точек земной поверхности (б) залесенного склона

Fig. 5. Fragments of full point cloud (a) and bare earth point cloud (b) of a forested slope

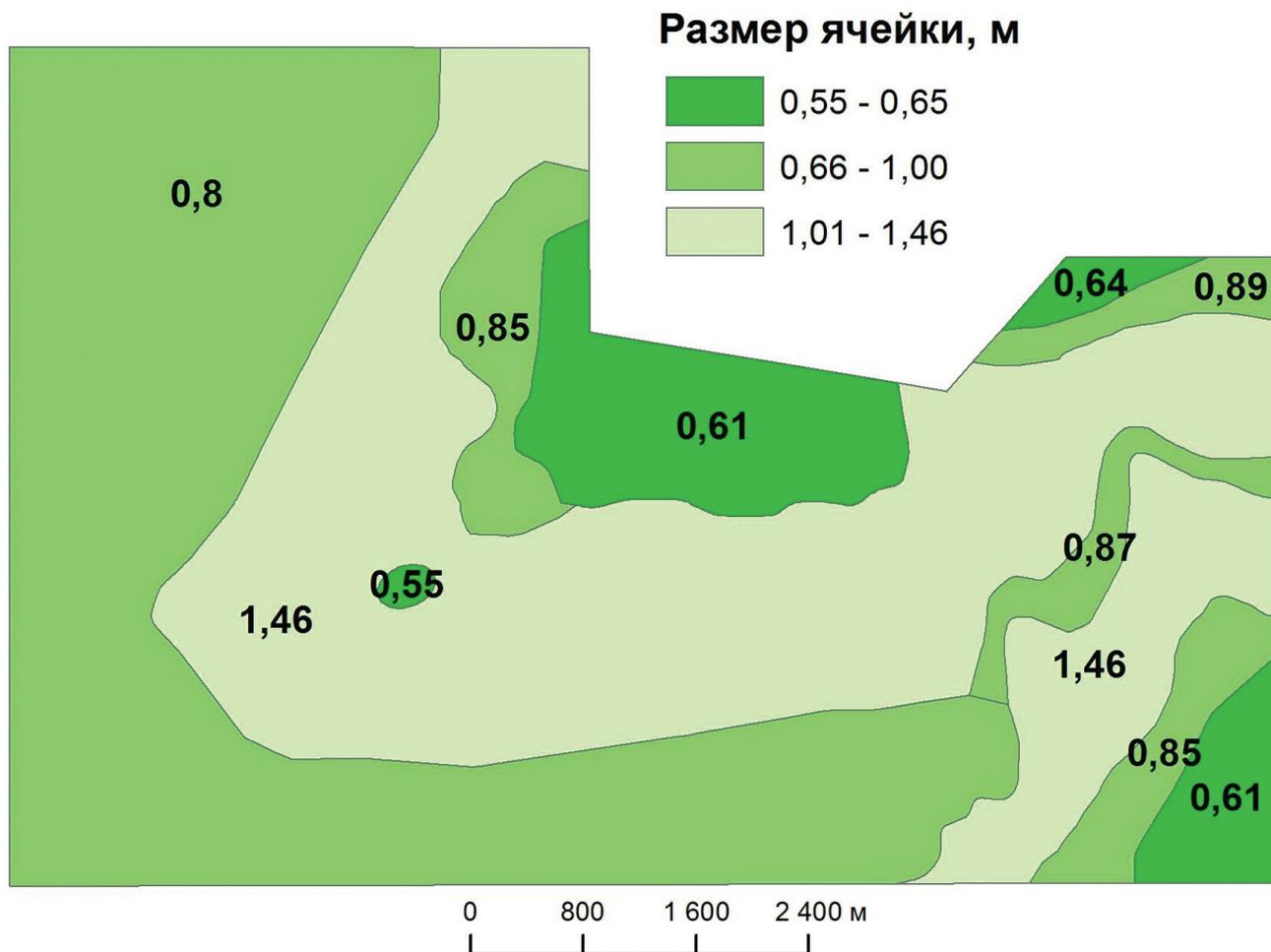


Рис. 6. Размер ячейки ЦМР, рассчитанный по участкам в соответствии с плотностью исходных данных

Fig. 6. DEM cell size calculated by sections according to the density of the data source

Таблица 1

Статистика величины размера ячейки по территории

Cell size statistics by territory

Показатель	Значение
Минимальное	0,6 м
Максимальное	1,5 м
Простое среднее	0,9 м
Взвешенное среднее	1,0 м

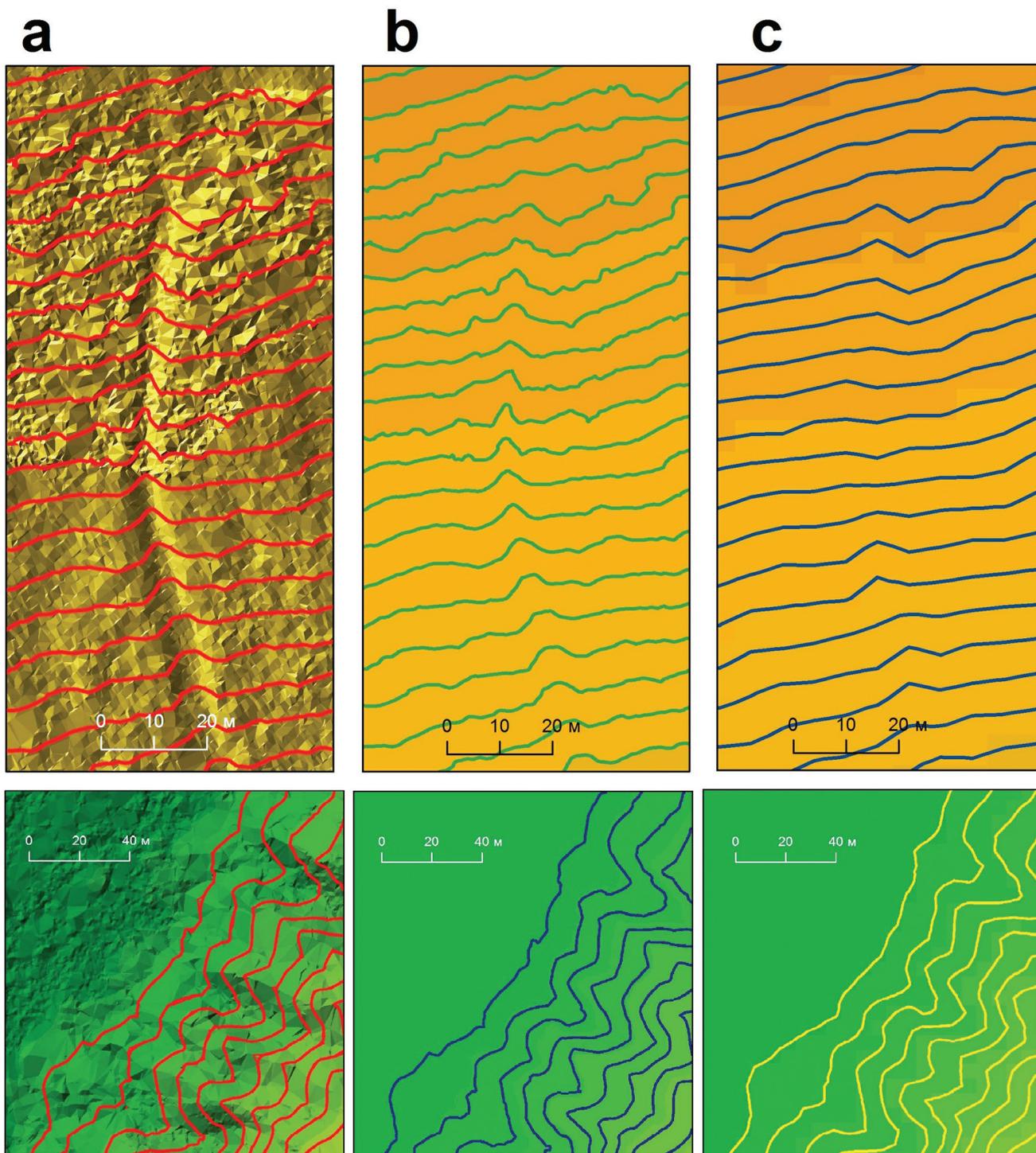


Рис. 7. Вершина эрозионной промоины (сверху) и конусы выноса оврагов (снизу):  
а – на TIN-модели; б, с – на регулярно-сеточных моделях с разрешением 0,6 и 6 м соответственно.  
Все горизонталы проведены через 5 м по моделям, на фоне которых они показаны

*Fig. 7. Erosion ravine head (above) and the ravine removal cones (below):  
a – on the TIN; b, c – on the gridded DEMs with 0.6 and 6 m resolution, respectively. Contour interval is 5 m,  
all contours are generated from DEMs which they are overlaid on*

от конфигурации съемки, но и от географических факторов. Лесная растительность – специфический фактор, влияющий на детальность точек земной поверхности как исходных данных для цифрового моделирования рельефа. Установлено, что на соседних территориях, отличающихся наличием и отсутствием леса, детальность данных о рельефе может отличаться в 4-5 раз. В ходе анализа цифровых моделей рельефа были выявлены наименьшие формы рельефа – эрозионные промоины и их конусы выноса, размер которых может составлять менее 10 метров. Показано, что данные воздушного лазерного сканирования способны отображать микроформы рельефа.

**Ключевые слова:** воздушное лазерное сканирование, детальность данных, цифровая модель рельефа, картографирование рельефа.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса: учебное пособие. – М.: Геолитар, Геоскосмос; Красноярск: Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2007. – 230 с.
2. Новаковский Б.А., Ковач Н.С., Энтин А.Л. Геоинформационные технологии использования воздушного лазерного сканирования для решения географических и картографических задач // Геодезия и картография. – 2014. – № 7. – С. 44-48.
3. Рычагов Г.И. Общая геоморфология. – М.: Изд-во Московского университета, 2006. – 416 с.
4. Рылский И.А., Калинин И.В. Сравнение пригодности данных воздушного лазерного сканирования и аэрофотосъемки с БПЛА для обеспечения проектных работ // ИнтерКарто. ИнтерГИС: мат-лы междунар. конф. – 2017. – № 23 (3). – С. 31-46.
5. Höfle B., Rutzinger M. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective // Zeitschrift für Geomorphologie. – 2011. – V. 55, Supp. Issue 2. – P. 1-29.
6. Hu Y. Automated Extraction of Digital Terrain Models, Roads and Buildings Using Airborne Lidar Data: UCGE Reports. – Canada: Alberta: Calgary: Department of Geomatics Engineering, 2003. – 222 p.
7. Liu X. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues // Progress in Physical Geography. – 2008. – V. 32, Issue 1. – P. 31-49.
8. DGGS Elevation Portal [Electronic resource]. – URL: <https://elevation.alaska.gov/> (date of access: 15.02.2020).

#### REFERENCES

1. Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R. Laser location of land and forest: A training manual. Moscow: Geolitar, Geocosmos, 2007. 230 p.
2. Novakovsky B.A., Kovach N.S., Entin A.L. Geoinformation technologies to use air laser scanning to solve geographic and cartographic tasks // Geodesy and Cartography. 2014. No. 7. P. 44-48.
3. Rychagov G.I. General geomorphology. Moscow: Moscow University Press, 2006. 416 p.
4. Rilskiy I.A., Kalinkin I.V. Feasibility comparison of airborne laser scanning data and 3d-point clouds formed from unmanned aerial vehicle (uav)-based imagery used for 3d projecting InterCarto. InterGIS: Proceedings of the International conference. 2017. V. 23 (3). P. 31-46.
5. Höfle B., Rutzinger M. Topographic airborne LiDAR in geomorphology: A technological perspective // Zeitschrift Geomorphologie. 2011. V. 55, Supp. Issue 2. P. 1-29.
6. Hu Y. Automated Extraction of Digital Terrain Models, Roads and Buildings Using Airborne Lidar Data: UCGE Reports. Canada: Alberta: Calgary: Department of Geomatics Engineering. 2003. 222 p.
7. Liu X. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues // Progress in Physical Geography. 2008. V. 32, Issue 1. P. 31-49.
8. DGGS Elevation Portal [Electronic resource]. URL: <https://elevation.alaska.gov/> (date of access: 15.02.2020).