

УДК 004.42:528.8

DOI: 10.47148/1609-364X-2020-4-2-11

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

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

Программное обеспечение для геоинформационной обработки данных воздушного лазерного сканирования

Аннотация. В работе рассмотрено программное обеспечение (ПО), позволяющее выполнять обработку данных воздушного лазерного сканирования (ВЛС) для целей геоинформационного картографирования. Перечень программ включает проприетарные MicroStation и модуль TerraScan, GlobalMapper, ArcGIS, ERDAS Imagine, LAStools, а также свободно распространяемые программы с открытым исходным кодом SAGA, WhiteboxTools и PDAL.io. Рассмотрены возможности импорта-экспорта, двумерной и трехмерной визуализации данных, редактирования облаков точек и создания на их основе производных наборов данных. Выполнено тестирование производительности ПО на примере задачи интерполяции высот точек лазерных отражений. В результате были определены преимущества и недостатки рассмотренных программ по отношению к различным решаемым задачам.

Ключевые слова: воздушное лазерное сканирование, программное обеспечение, геоинформационное картографирование, вычислительная эффективность.

B.A. Novakovsky, A.V. Kudryavtsev, A.L. Entin**Software for GIS-processing of airborne lidar data**

Abstract. The paper considers GIS software which may be utilized for airborne lidar data processing. Software list includes proprietary MicroStation with TerraScan plugin, Global Mapper, ArcGIS, ERDAS Imagine, LAStools, as well as free and open source SAGA, WhiteboxTools, and PDAL.io. Possibilities of import-export, 2D and 3D data visualization, point cloud editing and derivation of GIS datasets are examined for each software. Computational efficiency assessment is performed for the procedure of interpolation point elevation data in different software. As a result, the advantages and disadvantages of the considered programs were identified in relation to various tasks.

Key words: airborne laser scanning, software, geoinformation mapping, computational efficiency.

Поступила 28.08.2020

Доработана 05.10.2020

Принята к печати 15.10.2020

Введение

Воздушное лазерное сканирование (ВЛС) – активный метод дистанционного зондирования, суть которого заключается в измерении расстояний и углов до точек пространства с помощью лазерного луча. Оно выполняется как с пилотируемых носителей, так и с беспилотных летательных аппаратов. Результатом лазерной съемки является набор дискретных данных – точек лазерных отражений (ТЛО). Каждая точка соответствует одному измерению, но от одного импульса может быть получено несколько отраженных точек. В совокупности они образуют облако точек с известными пространственными координатами, углами ориентации, интенсивностью отраженного излучения на них и другими дополнительными характеристиками. Полученный

набор данных может существовать в двух основных видах лазерно-локационных данных – дальномерной форме и форме интенсивности. Дальномерная форма есть представление точек в трехмерном пространстве в соответствии с их пространственными координатами. В случае с формой интенсивности каждая точка визуализируется в соответствии с интенсивностью сигнала, зарегистрированного в результате отражения [1].

Особенностью данных воздушного лазерного сканирования является крайне большое количество точек, исчисляемое чаще всего в миллионах, а также их высокая плотность в пересчете на единицу площади съемки. Данные съемок занимают много места на физических носителях и требуют значительной вычислительной мощности устройств при их обработке.

Наиболее востребованные функции при обработке данных

Перечислим основные задачи и наиболее востребованные функции, требующие применения специализированного программного обеспечения и с которыми могут столкнуться пользователи при решении географо-картографических задач: чтение, запись и редактирование файлов, классификация точек (ручная и автоматическая), создание поверхностей на основе набора точек, визуализация данных. Обозначим, что рассматриваются привязанные облака точек, вопросы регистрации точек не затрагиваются. Данный обзор предназначен для специалистов в сфере географии и картографии.

Для чтения и записи файлов важной является возможность поддержки различных форматов хранения данных ВЛС. Чаще всего используется формат ASPRS LAS (American Society for Photogrammetry and Remote Sensing LAS). Основными расширениями файлов в соответствии с таким форматом являются LAS и LAZ [2, 3]. LAZ – формат, получаемый из LAS путем сжатия [3]. Файлы LAZ намного меньше по размеру (обычно на 10–20%, но при некоторых условиях размеры файлов могут отличаться на порядки), однако формат LAZ характеризуется сниженным быстродействием при работе с ним из-за необходимости проводить распаковку данных. Формат LAS поддерживается в большинстве специализированного ПО; поддержка формата LAZ не столь широка, но можно конвертировать его в LAS при помощи бесплатной утилиты LASZip [3]. Второй по очередности работы с данными является возможность редактирования набора точек, например добавление, удаление, выборка, а также удобство инструментов для этого.

Классификация облака точек – это выделение групп точек, соответствующих объектам одной и той же тематики, например земной поверхности, растительности, зданий и т.д. Классификация облака ТЛО, как правило, является необходимой операцией для дальнейшего использования облака в географических исследованиях и картографировании. Наиболее часто выполняется определение точек класса «земля», соответствующих видимой земной поверхности. Для этой операции разработан ряд алгоритмов. Классификация точек, относящихся к элементам ситуационной нагрузки (здания, растительность), выполняется путем определения их положения относительно «земли», а также по геометрическим критериям. Большинство форматов хранения данных поддерживает также и присвоение классов точкам. Например, в соответствии со спецификацией формата ASPRS LAS, номера классов могут иметь значения от 0 до 255. Чаще всего используются коды 0–20, стандартизированные

значения которых зарезервированы за определенными классами. Важна возможность как автоматизированного выделения с настраиваемыми параметрами, так и работы с классами – ручного редактирования полученных результатов.

Ряд геоинформационно-картографических задач требует создания «непрерывных» поверхностей (цифровых моделей рельефа, цифровых моделей местности) в виде регулярных сеток или нерегулярных триангуляционных сетей (TIN) на базе ТЛО. Для создания регулярно-сеточных представлений используются различные алгоритмы интерполяции, реализация которых должна быть адаптирована под высокую плотность исходных данных. Работа с TIN, как правило, реализуется в виде отдельного модуля.

Наконец, для целей просмотра и ручного редактирования данных необходимы возможности двух- и трехмерной визуализации облаков точек, включая возможности панорамирования, вращения изображения, изменения масштаба и создания произвольных видов (например, профилей вдоль прямых и ломаных линий).

Еще одной полезной функцией является визуализация данных, особенно трехмерная, и ее графические возможности. Это может быть необходимым как на начальном этапе – для просмотра данных, так и впоследствии – для создания красочного презентационного изображения.

Программное обеспечение для работы с ТЛО

В работе рассматривается следующее программное обеспечение: TerraScan, Global Mapper, ArcGIS, ERDAS Imagine, SAGA, Whitebox GAT, а также возможности подключаемых библиотек WhiteboxTools, LAStools и PDAL.io. Анализ производится с позиций доступности программ, существующей функциональности, описанной выше, удобства пользования и производительности.

TerraScan

Это проприетарное ПО, разработка компании TerraSolid, реализованная как подключаемый модуль к системе автоматизированного проектирования MicroStation [4]. MicroStation, в свою очередь, является системой автоматизированного проектирования, предназначенной преимущественно для решения инженерных и архитектурных задач [5]. Комбинация MicroStation и TerraScan, вместе с рядом дополнительных модулей, в настоящее время является основным ПО для работы с данными лазерного сканирования.

TerraScan работает с собственным форматом хранения ТЛО, но также поддерживает для чтения форматы LAS, LAZ и некоторые другие. Основное

рабочее окно проекта показывает загруженное облако точек в трехмерном представлении. Поддерживаются возможности масштабирования и панорамирования, выбор поднабора облака точек, визуализация поднаборов (профилей). Точки могут быть визуализированы с использованием разных цветовых шкал на основе различных свойств: высоты, классификации, интенсивности и др. Программа позволяет выполнять классификацию облака точек с использованием различных алгоритмов на основе их геометрической и атрибутивной информации, причем параметры выделения можно как изменять и подбирать самостоятельно – для более качественной классификации, так и воспользоваться стандартными – для выделения классов основных объектов (из «стандартных» классов присутствует земная поверхность, здания и растительность).

Подключаемые модули TerraSolid позволяют работать не только непосредственно с облаками точек (TerraScan, TerraMatch), но и с материалами аэрофотосъемки (TerraPhoto), наземных геодезических измерений (TerraSurvey). Модуль TerraModeler позволяет создавать и визуализировать цифровые модели рельефа (ЦМР) на основе ТЛЮ в регулярно-сеточном представлении и в виде TIN, причем именно TIN является базовой формой представления. Перечисленные широкие возможности модулей TerraSolid и их тесная интеграция обеспечивают, во-первых, удобство их совместного использования, а во-вторых – полный «охват» всех технологических

операций, осуществляемых в процессе работы с данными лазерного сканирования.

Global Mapper

Global Mapper представляет собой геоинформационное ПО общего назначения, широко известное благодаря поддержке чтения и записи пространственных данных из множества различных форматов [6]. В частности, Global Mapper способен осуществлять импорт и экспорт различных форматов облаков точек, включая LAS и LAZ. При загрузке точек возможен их выбор, отбор по классам, по порядку отражения сигнала (первые, вторые, третьи, последние), а также по количеству.

Загруженные данные отображаются в основном рабочем окне в плановом (2D) виде. Облако точек можно визуализировать с использованием различных атрибутов. Просмотр в режиме 3D возможен при помощи соответствующего инструмента в отдельном окне. Также доступен инструмент построения профилей (рис. 1).

В Global Mapper реализованы инструменты редактирования точек. Можно выбрать точки при помощи инструмента выделения и произвести с выборкой следующие действия: вырезать, скопировать и вставить в новый слой, присвоить код класса, посчитать статистику по всему облаку точек и по выбранной области. Также доступны автоматическая классификация точек земной поверхности, интерполяция высот двумя методами – триангуляцией и биннингом.

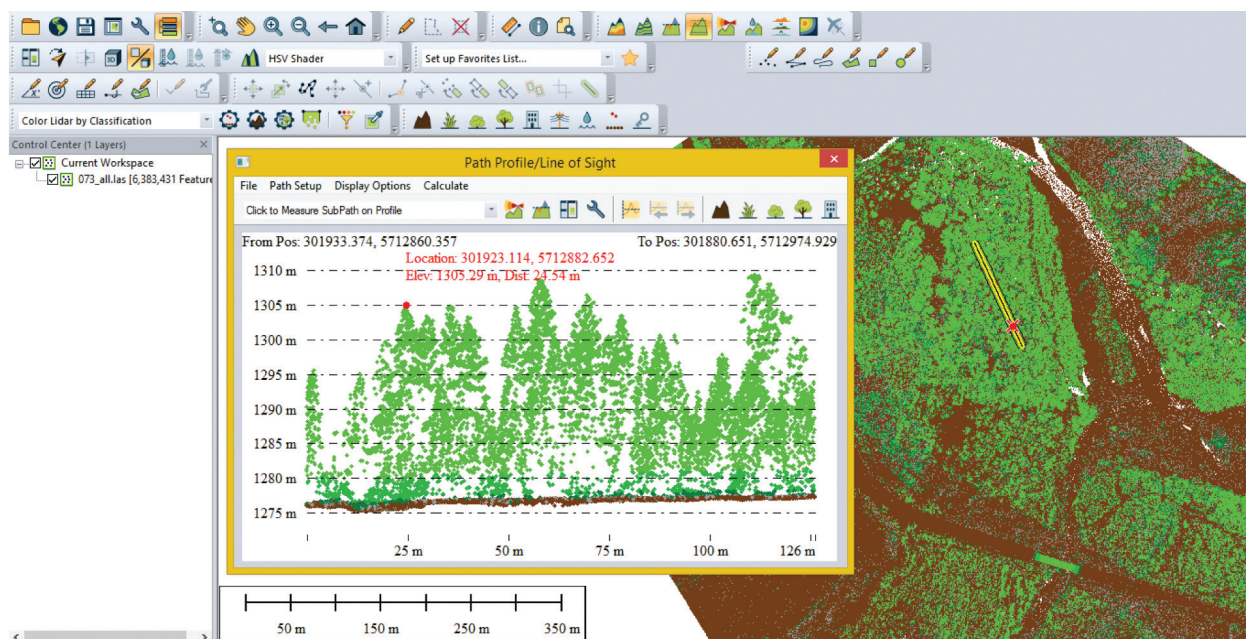


Рис. 1. Окно программы Global Mapper v18.0 с демонстрацией инструмента профилирования

Fig. 1. Global Mapper v18.0 software window with the profiling tool demonstration

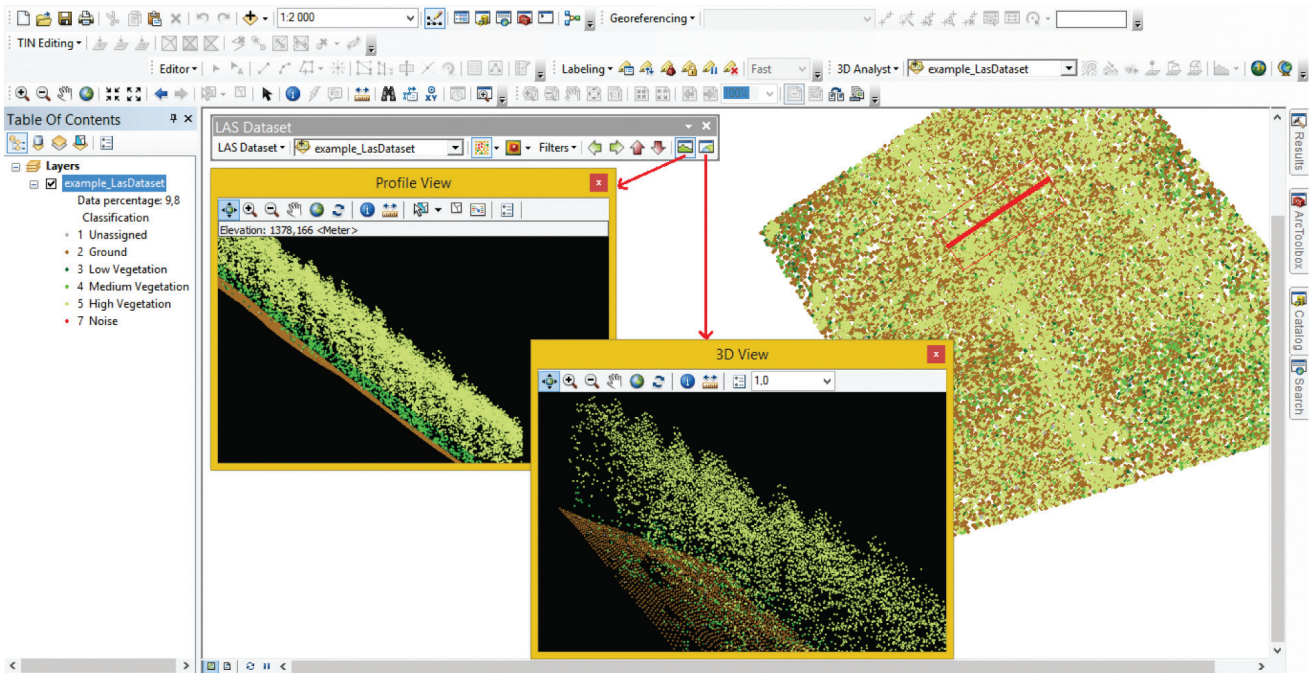


Рис. 2. Окно программы ArcGIS ArcMap 10.5 с демонстрацией двухмерного и трехмерного профилирования

Fig. 2. ArcGIS ArcMap 10.5 window showing 2D and 3D profiling

ArcGIS

Это семейство профессионального геоинформационного ПО, включающее настольные и сетевые продукты [7]. Работа с ТЛО в ArcGIS выполняется с использованием модуля LAS Dataset. Этот модуль позволяет загружать облака точек в формате LAS, демонстрировать их в двумерном и трехмерном представлении, строить профили вдоль линий (рис. 2), визуализировать точки с использованием различных атрибутов. Инструменты LAS Dataset позволяют выбирать подмножество точек, аналогично работе с другими векторными пространственными данными. Из специальных возможностей следует отметить функции выделения точек класса земной поверхности (в модуле 3D Analyst) и быстрого построения TIN на основе точек, отображающихся в рабочем окне (с учетом фильтра), и визуализацию ее различными способами изображения.

Поскольку ArcGIS может интерпретировать ТЛО как точечные векторные объекты, для них доступны все методы интерполяции и построения растров, реализованные в ArcGIS: метод обратно-взвешенных расстояний (ОВР), метод естественной окрестности (Natural Neighbor), сплайн-интерполяция и др. Однако, поскольку эти инструменты не адаптированы для работы с большими объемами исходных данных, пользователь может столкнуться с проблемой производительности.

ERDAS Imagine

ERDAS Imagine является проприетарным программным обеспечением, специализирующимся на обработке изображений, получаемых с космических аппаратов [8]. Однако в нем имеется ряд модулей для работы с другими данными дистанционного зондирования, и в частности с данными ВЛС (только формата LAS). ERDAS предоставляет инструментарий визуализации и профилирования наборов данных (2D- и 3D-просмотр, простое и трехмерное профилирование). Реализованы следующие функции работы с ТЛО: добавление, удаление по выбранной области, классификация облака точек, извлечение различных классов, фильтрация точек, трансформация и перепроецирование, статистика выбранным точкам.

SAGA

System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) – это открытое программное обеспечение, предназначенное в первую очередь для работы с регулярно-сеточными (растровыми) наборами пространственных данных [9]. SAGA поддерживает импорт ТЛО в формате LAS, при этом облако точек конвертируется в собственный формат. Предельное число точек загружаемого облака зависит от конфигурации компьютера пользователя, при небольшом объеме оперативной памяти попытка загрузить большое облако может привести к аварийному завершению работы программы.

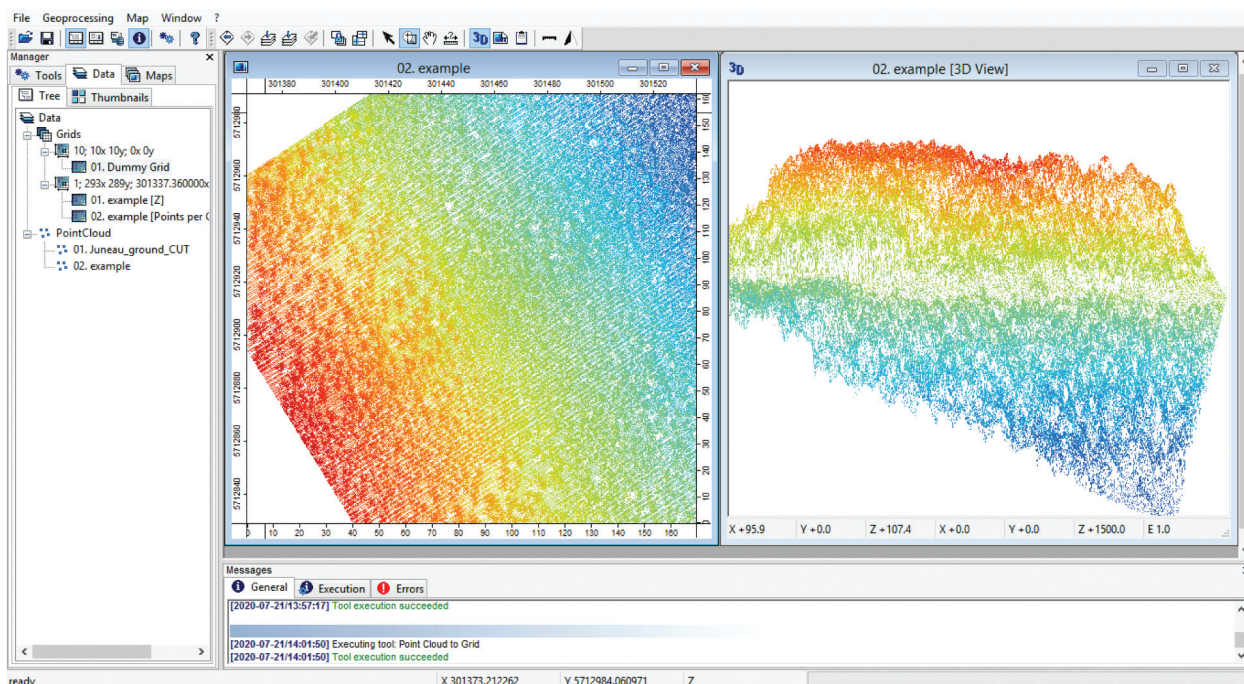


Рис. 3. Окно ПО SAGA с двумерным (слева) и трехмерным (справа) представлением облака точек

Fig. 3. SAGA software window with two-dimensional (left) and three-dimensional (right) representation of the point cloud

Возможности визуализации облака точек в SAGA ограничены, базовым является двумерное представление (рис. 3). Для 3D-визуализации имеется отдельный модуль (Point Cloud Viewer), который, однако, помечен как не рекомендуемый к использованию. Просмотр подбора точек и инструменты построения профилей в SAGA отсутствуют.

Инструменты SAGA позволяют выполнять следующие аналитические операции с облаками точек: кластерный анализ, удаление точек из облака по атрибутам, добавление и расчет новых атрибутов, обрезка и объединение облаков, переклассификация и извлечение точек в соответствии с их классами, трансформация облака, конвертация облака точек в share-файл и обратный процесс, создание регулярной сетки и сетки плотности точек. Кроме того, для облаков точек доступны все инструменты интерполяции и построения регулярно-сеточных моделей (группа Gridding).

Whitebox GAT и WhiteboxTools

Whitebox Geospatial Analysis Tools является открытой кроссплатформенной геоинформационной системой. Исходный код программы написан на языке Java и распространяется свободно [10]. В настоящее время разработка этой программы прекращена, хотя старые выпуски по-прежнему можно найти в открытом репозитории.

Все наработки Whitebox GAT интегрированы в проект WhiteboxTools [11], представляющий собой

библиотеку инструментов, запускаемых в режиме командной строки, через интерфейсы на языках Python, R и Nim, а также в виде подключаемых модулей к ArcGIS и QGIS. Полноценный графический интерфейс отсутствует, имеется только визуальная форма для запуска отдельных инструментов и ввода параметров. В WhiteboxTools реализовано большое количество специальных инструментов для обработки данных ВЛС, включая модули для классификации точек, принадлежащих поверхности, зданиям и сооружениям, а также для интерполяции высот различными алгоритмами.

LAStools

Это профессиональный автономный набор инструментов командной строки, предназначенных для обработки данных ВЛС [12]. Он включает в себя инструменты для классификации, разбиения, преобразования, фильтрации, построения поверхностей, триангуляции, обрезки данных лазерного сканирования. Программы LAStools предназначены для запуска с использованием командной строки, у них отсутствует графический интерфейс. Исключением является программа lasview – модуль просмотра облаков точек с минимальным функционалом (рис. 4). Также возможен запуск утилит LAStools как подключаемых модулей в ArcGIS, QGIS и ERDAS Imagine.

Каждая программа специализируется на определенной операции. Например, lasground предназначена для классификации точек, соответствующих

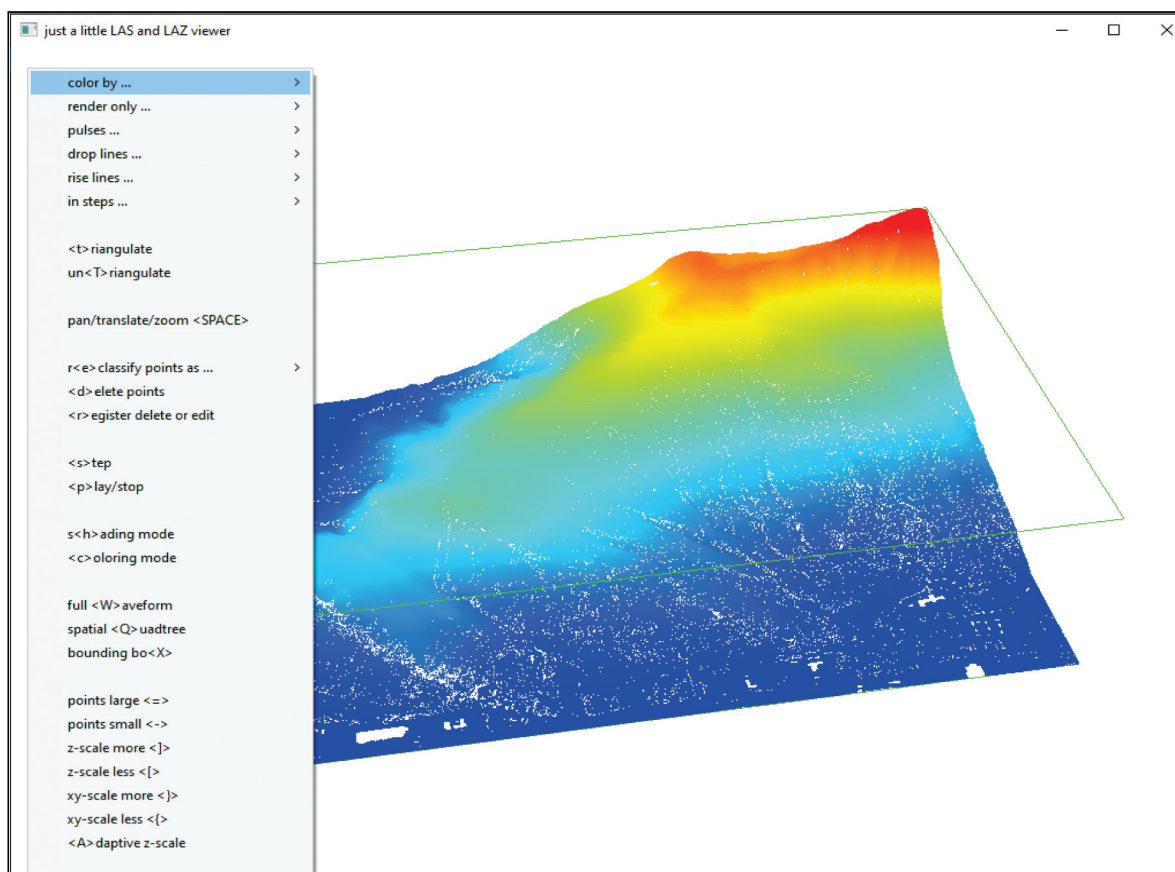


Рис. 4. Окно инструмента lasview

Fig. 4. The lasview tool window

земной поверхности, las2las осуществляет модификацию облака точек (поворот, перенос, отражение, фильтрацию по условию), las2dem создает регулярно-сеточную ЦМР. Функционал некоторых программ может дублироваться: например, преобразование LAS в LAZ можно выполнить как с помощью специальной утилиты laszip, так и через las2las.

Несмотря на то что LAStools является проприетарным ПО, некоторые инструменты можно использовать без ограничений. Но большинство инструментов при запуске без лицензии предоставляют ограниченный функционал (например, включается ограничение на максимальное число используемых точек) или вносят какие-либо искусственные ухудшения в результат операции.

Библиотека PDAL

Point Data Abstraction Library – библиотека C и C++ для манипулирования данными облаков точек [13]. Исходя из этого, она не ограничивается только данными лазерного сканирования, хотя акцент многих инструментов сделан именно на этом. Является аналогичной библиотеке GDAL, обрабатывающей растровые и векторные данные. Помимо написания кодов на языке программирования, предоставляет

также возможность работы через командную строку, что делает ее очень схожей с LAStools.

Краткая сводка по возможностям и ограничениям рассмотренного программного обеспечения приведена в табл. 1.

Анализ производительности ПО

Даже имея схожие возможности, программное обеспечение может значительно различаться с точки зрения вычислительной и пространственной эффективности. Использование разных языков программирования, различия в деталях реализации приводят к тому, что выполнение одной и той же задачи по одному и тому же алгоритму, но в разном программном обеспечении, осуществляется за различное время. Продемонстрируем это на примере задачи создания цифровой модели рельефа (ЦМР) в регулярно-сеточной форме путем интерполяции высот точек лазерных отражений. Для этого используем следующее программное обеспечение и инструменты:

1. LAStools, программа las2dem64, выполняющая построение нерегулярной сети треугольников (TIN), линейную интерполяцию и дискретизацию результата на регулярную сетку.

Геоинформационные системы
Таблица 1
Сравнение возможностей и ограничений программного обеспечения для геоинформационной обработки данных ВЛС

Table 1. Comparison of the capabilities and limitations of software for airborne laser scanning data GIS-processing

ПО	Поддерживаемые форматы	Редактирование данных	Классификация облака точек	Интерполяция	Визуализация	Лицензия
MicroStation и модули TerraSolid	Множество, в том числе собственный формат, LAS и LAZ	Многофункциональные возможности редактирования	Автоматическая классификация с различными настраиваемыми параметрами, ручное редактирование	Построение ЦМР и ЦММ в отдельном модуле TerraModeler	3D-визуализация в основном рабочем окне, построение 2D- и 3D-профилей	Проприетарное
Global Mapper	Чтение и запись LAS и LAZ	Добавление, удаление точек, перемещение в новые наборы данных	Автоматическая классификация точек рельефа, не рельефа и шума, ручное редактирование	Создание поверхности с использованием ограниченных методов интерполяции	В рабочем окне – 2D-вид, в отдельном окне – 3D-просмотр, построение 2D-профилей	Проприетарное
ArcGIS	LAS, только чтение	Основной единицей является набор данных, а не отдельная точка, удаление или добавление наборов точек	Автоматическая классификация точек рельефа, по высоте над землей и зданий, ручное редактирование	Быстрое построение TIN-поверхности, хранящейся только в документе карты, создание растровых поверхностей и TIN с использованием инструментов	В рабочем окне – 2D-вид, в отдельном окне – 3D-визуализация, построение 2D- и 3D-профилей	Проприетарное
SAGA	Собственный формат и LAS; чтение и запись	Широкие возможности редактирования наборов (облаков) точек	Только редактирование существующих классов	Создание поверхностей многими алгоритмами интерполяции	Окна для отдельных наборов 2D-данных, в отдельном окне 3D-просмотр, построения профилей нет	Свободное (GPL)
Whitebox GAT	LAS	Конвертация LAS-файлов в другие форматы	Нет	Инструменты интерполяции не принимают на вход файлы формата LAS	2D-вид в рабочем окне	Свободное (MIT)
Whitebox Tools	LAS	Добавление, удаление, обрезка	Автоматическое выделение точек рельефа, ручное присвоение классов группам точек	Ограниченное число алгоритмов интерполяции	Нет	Свободное (MIT)
LAStools	LAS, LAZ. Имеются утилиты для конвертации других форматов	Отбор, обрезка, проектирование, трансформация, конвертация форматов и др.	Автоматическое выделение точек рельефа и отличенных от рельефа	Создание поверхностей без выбора алгоритма интерполяции и TIN	3D-просмотр в окне инструмента	Проприетарное; ограниченный функционал в бесплатной версии
Библиотека PDAL.io	Множество форматов	Широкие возможности редактирования	Автоматическое выделение различных классов	Создание поверхностей с различными параметрами	Нет	Свободное (BSD)

2. WhiteboxTools, инструмент Lidar TIN Gridding (работает по принципу, аналогичному п. 1).
3. WhiteboxTools, инструмент Lidar IDW Interpolation, интерполирует высоты по методу обратных взвешенных расстояний (ОВР, англ. Inverse Distance Weighting, IDW).
4. SAGA, инструмент Inverse Distance Weighted (аналогично п. 3).
5. SAGA, инструмент Natural Neighbour, выполняет интерполяцию методом естественной окрестности.

Заметим, что в SAGA также реализован инструмент интерполяции с использованием TIN (модуль Triangulation), однако он не позволяет эффективно работать с плотными облаками точек лазерных отражений. Время, затраченное на интерполяцию с использованием этого модуля, на несколько порядков больше времени работы модулей, перечисленных в списке. По этой причине модуль Triangulation не был включен в тестирование.

Интерполяция с использованием построения TIN не имеет настраиваемых параметров. Для метода обратных взвешенных расстояний задано использование всех точек в радиусе 10 м от центра интерполированной ячейки. Для интерполяции по методу естественной окрестности в SAGA используется сибсоновская интерполяция, предлагаемая инструментом по умолчанию.

Исходным материалом послужило облако точек лазерных отражений, полученное с открытого портала Геологической службы США на территорию Аляски. Плотность облака составляет приблизительно 0,3 точки/м², что соответствует, согласно [14], целевому разрешению регулярной сетки, равному 2 м. Для тестирования из облака было извлечено несколько поднаборов, содержащих, соответственно, 1, 5, 10, 50 и 100 млн точек.

Для тестирования использовано пять различных конфигураций компьютеров:

- Конфигурация 1: моноблок с процессором Intel Celeron N3050 (2 ядра, базовая тактовая частота 1,6 ГГц) и 4 ГБ оперативной памяти;
- Конфигурация 2: ноутбук с процессором Intel Core i7-8550 (4 ядра, тактовая частота 1,8 ГГц) и 8 ГБ оперативной памяти;
- Конфигурация 3: ноутбук с процессором AMD A6-9210 (2 ядра, тактовая частота 2,4 ГГц) и 12 ГБ оперативной памяти;
- Конфигурация 4: ноутбук с процессором Intel Core i5-3210M (2 ядра, тактовая частота 2,5 ГГц) и 16 ГБ оперативной памяти;
- Конфигурация 5: рабочая станция с процессором Intel Xeon E5-2620 v2 (6 ядер, 2,1 ГГц) и 64 ГБ оперативной памяти.

Для тестирования каждый модуль с каждым набором данных запускался на каждой конфигурации не менее трех раз с последующим осреднением результатов. Измерялось общее время выполнения программы (включая время, затраченное на чтение исходных данных и запись выходных данных). Результаты тестирования представлены на рис. 5.

Рис. 5 демонстрирует, что для небольшого числа точек (до 10 млн в проведенном эксперименте) наиболее эффективным методом интерполяции является триангуляция. С увеличением числа точек в облаке различия несколько сглаживаются. На относительно более производительных процессорах (конфигурации 2 и 5) довольно высокую эффективность показывает также интерполяция по методу ОВР в реализации WhiteboxTools. Реализации алгоритмов интерполяции ОВР и естественной окрестности в SAGA отличаются сравнительно низкой вычислительной эффективностью практически на всех наборах данных. Однако можно заметить, что SAGA отличается и низкими требованиями к аппаратуре: в тестах с облаком на 100 млн точек WhiteboxTools может выполнить интерполяцию только на компьютерах с размером оперативной памяти больше 4 ГБ, а LAStools – больше 8 ГБ.

Заключение

Набор рассмотренного программного обеспечения является основным и наиболее часто используемым на практике. Обобщение возможностей ПО дано в табл. 1. Нужно сказать, что для решения не производственных, а научных географических и картографических задач очень сложно останавливаться на использовании только одного. Ведь в проведении подобных исследований часто возникают длинные цепочки преобразования данных, начиная от первичной обработки материалов съемки до создания цифровых моделей рельефа или трехмерных моделей. Поэтому гораздо эффективнее использовать разные программы или библиотеки в зависимости от конкретных задач: редактирование облака точек, визуализация, классификация или создание поверхностей. Ведь в то время как для многих ГИС построение ЦМР по точкам лазерных отражений является весьма длительным процессом, библиотеки справляются с этой задачей гораздо быстрее и эффективнее, что было доказано опытным путем. Но при этом ГИС имеют гораздо больше возможностей визуализации и составления картографических материалов. Не менее важны в этом вопросе открытость программ и личные предпочтения пользователя. Поэтому, подводя итог, при выборе ПО для обработки материалов воздушного лазерного сканирования стоит делать приоритетными качество и скорость обработки.

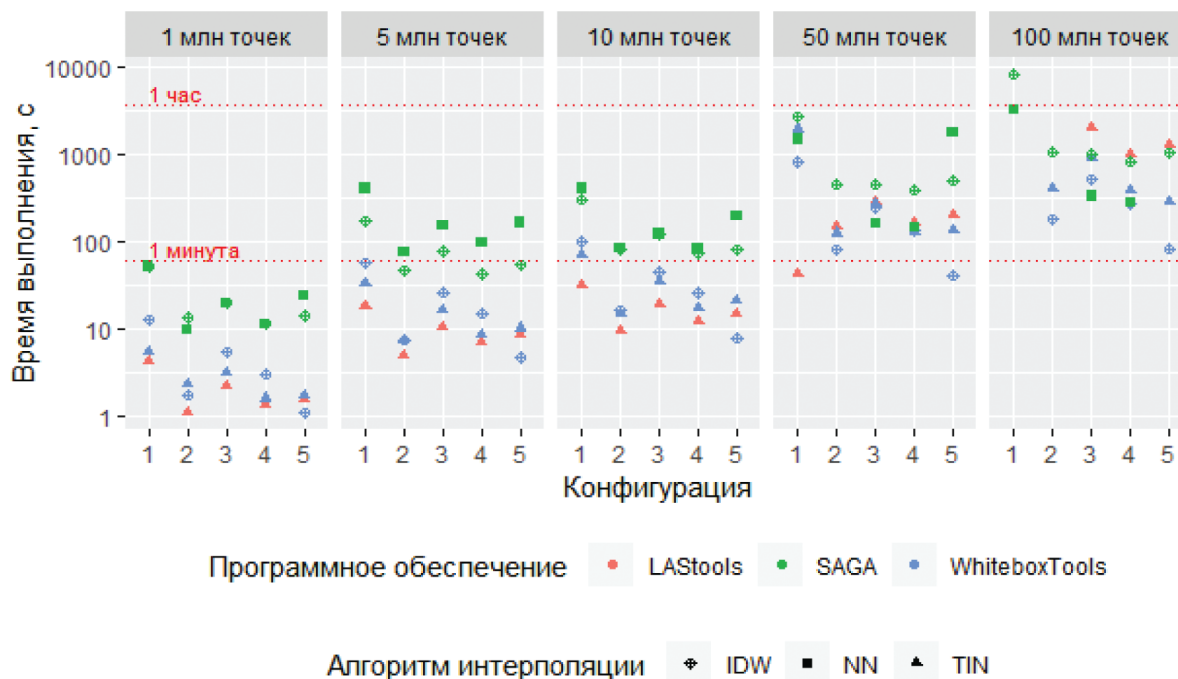


Рис. 5. Время выполнения интерполяции высот точек лазерных отражений с использованием различных программных модулей. Алгоритмы интерполяции: IDW – метод обратных взвешенных расстояний, NN – метод естественной окрестности, TIN – триангуляция с линейной интерполяцией

Fig. 5. Computation time for height interpolation from lidar points in different software modules. Interpolation algorithms: IDW – inverse distance weighting, NN – natural neighbour, TIN – triangulation with linear interpolation

ЛИТЕРАТУРА

1. Медведев Е.М., Данилин И.М., Мельников С.Р. Лазерная локация земли и леса : учебное пособие. – Москва ; Красноярск : Геолидар ; Геоскосмос, 2007. – 230 с.
2. LAS Specification v.1.42 – R15 [Electronic resource] // American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), 2019. – URL: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf (date of access: 04.02.2020).
3. Isenburg M. LASzip: lossless compression of LiDAR data // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 2013. – V. 79, Issue 2. – P. 209-217.
4. TerraScan – Software for LiDAR Data Processing and 3D Vector Data Creation Products - TerraScan [Electronic resource] // Terrasolid : Products – TerraScan. – URL: <http://www.terrasolid.com/products/terrascanpage.php> (date of access: 16.06.2020).
5. MicroStation – ПО САПР для разработки в 3D архитектурных и инженерных проектов [Электронный ресурс] // Bentley Systems : MicroStation. – URL: <https://www.bentley.com/ru/products/brands/microstation> (дата обращения: 05.07.2020).
6. Global Mapper – All-in-One GIS Software [Electronic resource] // Blue Marble Geographics : web site. – URL: <https://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php> (date of access: 07.06.2020).
7. About ArcGIS : The mapping and analytics platform [Electronic resource] // Esri : web site. – URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/about-arcgis/overview> (date of access: 20.07.2020).
8. ERDAS IMAGINE [Electronic resource] // Hexagon Geospatial. – URL: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine> (date of access: 12.07.2020).
9. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 / O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock et al. // Geoscientific Model Development. – 2015. – V. 8, Issue 7. – P. 1991-2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
10. Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis // Computers & Geosciences. – 2016. – V. 95. – P. 75-84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.
11. Lindsay J.B. WhiteboxTools [Electronic resource]. – URL: <https://jblindsay.github.io/ghrg/WhiteboxTools/index.html> (date of access: 15.02.2020).
12. LASStools [Electronic resource] // rapidlasso GmbH. – URL: <https://rapidlasso.com/lastools/> (date of access: 20.07.2020).
13. PDAL – Point Data Abstraction Library [Electronic resource], 2018. – URL: <https://pdal.io/index.html> (date of access: 15.02.2020).
14. Liu X. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues // Progress in Physical Geography. – 2008. – V. 32, Issue 1. – P. 31-49.

REFERENCES

1. Medvedev E.M., Danilin I.M., Melnikov S.R. Laser location of land and forest: a training manual. Moscow ; Krasnoyarsk : Geolidar ; Geokosmos, 2007. 230 p.
2. LAS Specification v.1.42 – R15 [Electronic resource] // American Society for Photogrammetry & Remote Sensing (ASPRS), 2019. URL: http://www.asprs.org/wp-content/uploads/2019/07/LAS_1_4_r15.pdf (date of access: 04.02.2020).
3. Isenburg M. LASzip: lossless compression of LiDAR data // Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. 2013. V. 79, Issue 2. P. 209-217.
4. TerraScan – Software for LiDAR Data Processing and 3D Vector Data Creation Products - TerraScan [Electronic resource] // Terrasolid : Products – TerraScan. URL: <http://www.terrasolid.com/products/terrascanpage.php> (date of access: 16.06.2020).
5. MicroStation : CAD Software for development of 3D architecture and engineering projects [Electronic resource] // Bentley Systems : MicroStation. URL: <https://www.bentley.com/ru/products/brands/microstation> (date of access: 05.07.2020).
6. Global Mapper – All-in-One GIS Software [Electronic resource] // Blue Marble Geographics : web site. URL: <https://www.bluemarblegeo.com/products/global-mapper.php> (date of access: 07.06.2020).
7. About ArcGIS : The mapping and analytics platform [Electronic resource] // Esri : web site. – URL: <https://www.esri.com/ru-ru/arcgis/about-arcgis/overview> (date of access: 20.07.2020).
8. ERDAS IMAGINE [Electronic resource] // Hexagon Geospatial. URL: <https://www.hexagongeospatial.com/products/power-portfolio/erdas-imagine> (date of access: 12.07.2020).
9. System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4 / O. Conrad, B. Bechtel, M. Bock et al. // Geoscientific Model Development. 2015. V. 8, Issue 7. P. 1991-2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
10. Lindsay J.B. Whitebox GAT: A case study in geomorphometric analysis // Computers & Geosciences. 2016. V. 95. P. 75-84. DOI: 10.1016/j.cageo.2016.07.003.
11. Lindsay J.B. WhiteboxTools [Electronic resource]. URL: <https://jblindsay.github.io/ghrg/WhiteboxTools/index.html> (date of access: 15.02.2020).
12. LAStools [Electronic resource] // rapidlasso GmbH. URL: <https://rapidlasso.com/lastools/> (date of access: 20.07.2020).
13. PDAL – Point Data Abstraction Library [Electronic resource], 2018. URL: <https://pdal.io/index.html> (date of access: 15.02.2020).
14. Liu X. Airborne LiDAR for DEM generation: Some critical issues // Progress in Physical Geography. 2008. V. 32, Issue 1. P. 31-49.

Информация об авторах

Новаковский Богуслав Августович, доктор географических наук, профессор Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова). Российская Федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет. E-mail: dcaph@mail.ru.

Кудрявцев Александр Владимирович, магистрант Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова). Российская Федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет. E-mail: all.sasa24@ya.ru.

Энтин Андрей Львович, кандидат географических наук, инженер Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова» (МГУ имени М.В. Ломоносова). Российская Федерация, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, МГУ имени М.В. Ломоносова, Географический факультет. E-mail: arentin@geogr.msu.ru.

Information about authors

Novakovsky Boguslav Avgustovich, professor, D.Sc. in Cartography, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (Lomonosov MSU). Russian Federation, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, MSU, Faculty of Geography. E-mail: dcaph@mail.ru.

Kudryavtsev Alexander Vladimirovich, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (Lomonosov MSU). Russian Federation, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, MSU, Faculty of Geography. E-mail: all.sasa24@ya.ru.

Entin Andrey Lvovich, PhD in Cartography, Federal State Budget Educational Institution of Higher Education M.V. Lomonosov Moscow State University (Lomonosov MSU). Russian Federation, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, MSU, Faculty of Geography. E-mail: arentin@geogr.msu.ru.