

ГЕОГРАФИЯ

УДК 528.718:528.8:902.03

Сравнение методов фотограмметрии и лазерного сканирования для создания трехмерных моделей объектов и территорий археологических ГИС (на примере археологического раскопа Увекского городища)

В. А. Данилов, А. В. Федоров, Л. С. Безвершенко

Данилов Владимир Анатольевич, кандидат географических наук, доцент кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, kohavi@yandex.ru

Федоров Алексей Васильевич, старший преподаватель кафедры геоморфологии и геоэкологии, заведующий учебной лабораторией геоинформатики и тематического картографирования, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, alexeivf@gmail.com

Безвершенко Любовь Сергеевна, ассистент кафедры геоморфологии и геоэкологии, Саратовский национальный исследовательский государственный университет имени Н. Г. Чернышевского, bezvershenko000@gmail.com

В настоящее время методы фотограмметрии и лазерного сканирования доступны для широкого круга пользователей и стали применяться для решения разнообразных прикладных задач. Одним из самых популярных и основных направлений применения данных технологий является создание 3D-моделей объектов и территорий. Авторы статьи по результатам исследования территории Увекского городища провели построение 3D-моделей археологического раскопа 2017 г. методом фотограмметрии и лазерного сканирования для создания археологических ГИС. Сравнили по различным критериям созданные модели и оценили перспективы использования данных методов в археологии.

Ключевые слова: фотограмметрия, лазерное сканирование, трехмерное моделирование, 3D-модель, Увекское городище, археологический раскоп.

The Comparison of the Methods of Photogrammetry and Laser Scanning for the Establishment of Three-Dimensional Models of Objects and Territories of Archeological GIS (on the Example of the Archeological Excavation of Uvek Hillfort)

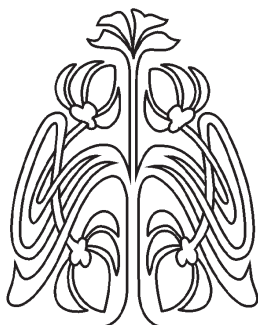
V. A. Danilov, A. V. Fedorov, L. S. Bezvershenko

Vladimir A. Danilov, <https://orcid.org/0000-0002-6971-9860>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, kohavi@yandex.ru

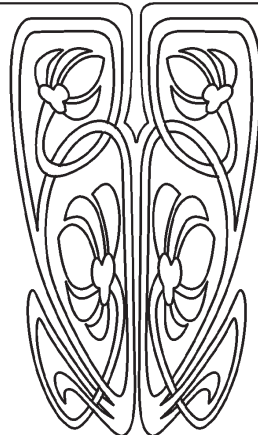
Alexey V. Fedorov, <https://orcid.org/0000-0002-8999-6398>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, alexeivf@gmail.com

Lybov S. Bezvershenko, <https://orcid.org/0000-0002-3048-5286>, Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia, bezvershenko000@gmail.com

Currently, methods of photogrammetry and laser scanning are available for a wide range of users and have been used to solve various application tasks. One of the most popular and main areas of application of these technologies is creating 3D models of objects and territories. The authors of the article, based on the results of a study of the territory of the Uvek hillfort, carried out the



НАУЧНЫЙ
ОТДЕЛ





construction of 3D models of archaeological excavation site of 2017 using photogrammetry and laser scanning to create archaeological GIS. The authors compared created models by different criteria and evaluated the prospects of usage of these methods in archeology.

Keywords: photogrammetry, laser scanning, three-dimensional modeling, 3D-models, Uvek hillfort, archaeological excavation.

DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-2-72-78>

Введение

В мировой практике археологических исследований фотограмметрические технологии применяются в том или ином виде с момента изобретения фотографии в 1839 г. [1].

Отличительной особенностью современного периода развития археологии является применение в процессе полевых и камеральных исследований фотограмметрических, геодезических, лазерных, геоинформационных, дистанционных и прочих новейших технологий для эффективного и качественного проведения исследований, конечным результатом которых является, помимо составления устаревающих топографических карт и планов раскопов, создание компьютерных трехмерных геоизображений – эффективного инструмента исследования и представления информации.

Трехмерные геоизображения (3D-модель) – это графические модели, дающие зрительный эффект объемности, перспективы, глубины пространства [2, с. 76]. В современной археологии ныне используются современное геодезическое оборудование, в том числе приборы наземного лазерного сканирования, фотограмметрические программные комплексы, ГИС-технологии. Это значительно упростило и ускорило процесс фиксации информации, обеспечило мониторинг археологических объектов дистанционными методами, повысило достоверность и качество получаемых материалов для выполнения комплексных специализированных исследований, реставрационной деятельности [3, с. 102].

На сегодняшний день еще не сформировались требования к методике виртуальной исторической реконструкции, но наиболее распространенными методами по созданию 3D-моделей являются технологии лазерного сканирования и фотограмметрии [4].

Построение 3D-моделей фотограмметрическим методом основано на определении размеров объектов по стереопарам. Внедрение компьютеров с большим объемом памяти и высокой скоростью счета, а также цифровых методов записи изображений, улучшение технических характеристик съемочной аппаратуры привело к созданию и широкому распространению цифровой фотограмметрии. Технический прогресс программных комплексов по фотограмметрической обработке исключил необходимость глубокого знания фотограмметрии и умения работать с подобными сис-

темами, сделал их доступными широкому кругу пользователей.

Метод наземного лазерного сканирования описывает цифровую трехмерную модель объекта, представляя ее набором точек с пространственными координатами. Полученный набор точек именуется «облако точек» и впоследствии может быть представлен в виде трехмерной модели объекта. Существенным недостатком данного метода является значительная стоимость оборудования, однако он оптимален при решении прикладных задач, где требуется высокая точность измерений.

В данной статье по различным критериям оцениваются технологии фотограмметрии и лазерного сканирования для получения трехмерной модели объекта, проводится их сравнительная оценка и определяются перспективы внедрения в отечественной практике археологических исследований.

Объектом исследования является археологический раскоп на территории Увекского городища 2017 г. *К методам исследования*, применяемым в ходе работы, относятся: фотограмметрия, наземное лазерное сканирование, геоинформационное моделирование, сравнительный и картографический анализ.

В качестве *исходных материалов* были использованы данные фотосъемки, наземного лазерного сканирования и полевой информации археологического раскопа на территории Увекского городища.

Исследуемая территория. Увекское городище располагается на южной окраине г. Саратова и является объектом культурного наследия регионального значения [5]. В XIII–XIV вв. на месте этого памятника находился золотоордынский город Увек. Его площадь составляла более 205 га, что позволяет оценить численность населения города в 9–10 тыс. человек [6, с. 3]. Основными видами деятельности, получившими распространение, были: ремесленное дело, рыболовство, а также торговля. Город занимал центральной положение на волжском пути – важнейшей артерии джучидского государства – и являлся связующим звеном между городами Волжской Булгарии и Нижнего Поволжья, что в значительной мере способствовало его расцвету [6, с. 4]. На сегодняшний день остатки средневекового города, разрушенного после военного похода Тимура 1395 г., застроены жилыми и промышленными объектами поселка Увек. Однако в 2015 г. была построена цифровая модель палеорельефа XIII в., которая стала основой для создания пространственно-временной модели золотоордынского города Увек. На ней продемонстрировано направление движения крупных оползневых масс, которые могли оказывать влияние на размещение городской застройки [7, с. 2].

Методика хода работ. Традиционно методами фиксации ведения археологических работ считаются: описательная форма (дневниковая),



графическая форма, фотографическая форма, комплексная форма [3, с. 5]. Применение методов фотограмметрии и наземного лазерного сканирования дает возможность создавать высокоточные виртуальные модели археологических раскопов и отдельных объектов для дальнейшего их изучения другими специалистами, проводить на их основе реконструкцию объектов, а также использовать в научной работе, учебной и просветительской деятельности публикации и презентации через веб-ресурсы [8].

Полевая фиксация археологического раскопа Увекского городища проводилась специалистами разного профиля: археологами Саратовского областного музея краеведения и сотрудниками географического факультета Саратовского государственного университета имени Н. Г. Чернышевского. Площадь раскопа составила 121 кв. м, максимальная глубина – 2,4 м.

Отдельные трехмерные модели раскопа создавались независимо по данным фотограмметрии и наземного лазерного сканирования. Каждый из методов содержал три этапа: один этап полевой съемки и два этапа камеральной обработки результатов. Полевой этап включал в себя сбор данных, т. е. фотографирование и осуществление наземной лазерной съемки. Камеральный этап обеспечивал обработку полевых данных, их редактирование, привязку, интерпретацию и визуальное представление, после чего проводилось сравнение полученных трехмерных моделей.

В ходе сбора данных для реализации фотограмметрического метода была проведена фотосъемка археологического раскопа с помощью неметрической бытовой цифровой фотокамеры. В результате было получено 66 фотографий по всему периметру раскопа, на основе которых уже в три этапа выполнялась камеральная обработка материалов:

Первый этап включал подгрузку полученных снимков в программу VisualSFM (подробное ее руководство и описание алгоритмов построения можно найти на сайте www.ccwu.me/vsfm) [9, 10]. Алгоритм программы в автоматическом режиме на основе серии снимков объединил их в единую «визуальную» стереомодель, на основе которой было создано «облако точек», где каждой точке был присвоен уникальный номер, а также координаты в пространстве (x , y , z) и код (рис. 1). Полученное «облако точек» экспортировалось в файлообменный формат трехмерных данных – PLY – для дальнейшей его обработки.

На втором этапе на основе импортированных точек из формата PLY проводилось построение трехмерной модели с помощью программы CloudCompare [11]. В программе, помимо построения модели, была проведена очистка «облака точек» от ошибочных объектов, которые не должны учитываться при построении. На их основе строится модель в виде плоскостей, в виде триангуляционной сети, которая трансформируется в трех-

мерную форму объекта. В итоге была получена визуальная 3D-модель археологического раскопа (рис. 2). Как видно из рис. 2, модель передает все визуальные характеристики археологического раскопа. На ней нет ни пробелов, ни других явных ошибок реконструкции.

Для целей визуализации и демонстрации 3D-модели раскопа широкому кругу пользователей на третьем этапе полученная визуальная модель экспортировалась в графический редактор Blender. Здесь с установленным плагином blend4web модель редактировалась и сохранялась в формате html. Для дальнейшего анализа и сравнения моделей использовалась программа AutoCAD [12, с. 32].

При съемке археологического раскопа методом наземного лазерного сканирования применялся сканер Leica ScanStation P20. Для обеспечения съемки всего раскопа предварительно требовалось составить схему мест и высот установки прибора, а также разместить контрольные марки. В процессе выполнения съемки выделялись следующие этапы.

Первый этап. Непосредственно наземное лазерное сканирование территории раскопа с 5 точек – станций с разрешением 3 мм на 10 м и качеством съемки 3. Координатная привязка между станциями осуществлялась методом «по известной задней точке» с контролем точности по оптической марке. Суммарная погрешность привязки по плановым и высотным координатам между станциями составила не более 1 мм, а всего хода – 5 мм.

Второй этап. Проект с результатами сканирования был экспортирован на персональный компьютер, после чего был осуществлен его импорт в программный комплекс Cyclone. При данной процедуре последовательно осуществлялось автоматическое удаление ошибочных измерений и перекрывающихся точек, потом проводилось разреживание и уравнивание измерений с различных станций в единую условную координатную систему. Итогом выполнения операций стало получение «облака точек».

Третий этап. В программном комплексе Cyclone полученное «облако точек» было очищено вручную от посторонних измерений, закрывающих поверхность раскопа, и была осуществлена подготовка для его импорта в программный комплекс AutoCAD Civil 3d.

Для оценки результатов проведенных работ модели, представленные «облаками точек», получены методами фотограмметрии и лазерного сканирования. По разным критериям применялись сравнительный метод и количественный метод, заключающийся в определении различий метрических характеристик, проведенных с помощью программного комплекса AutoCAD Civil 3d.

Методы получения данных для построения трехмерных моделей сравнивались по следующим критериям:

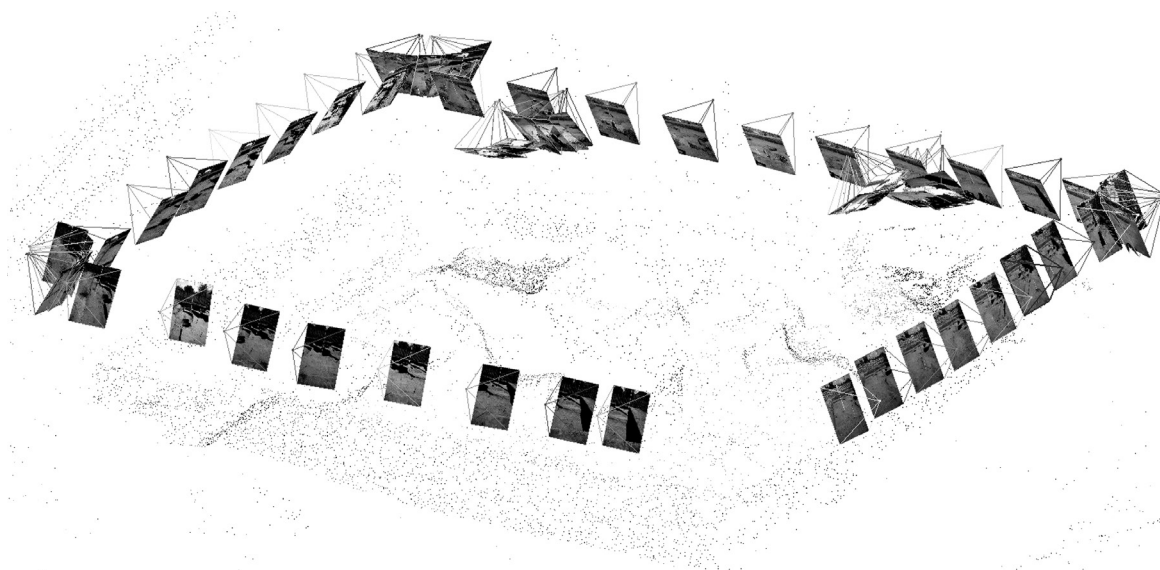


Рис. 1. «Облако точек» раскопа Увекского городища, построенное на основе фотографий в программе VisualSFM

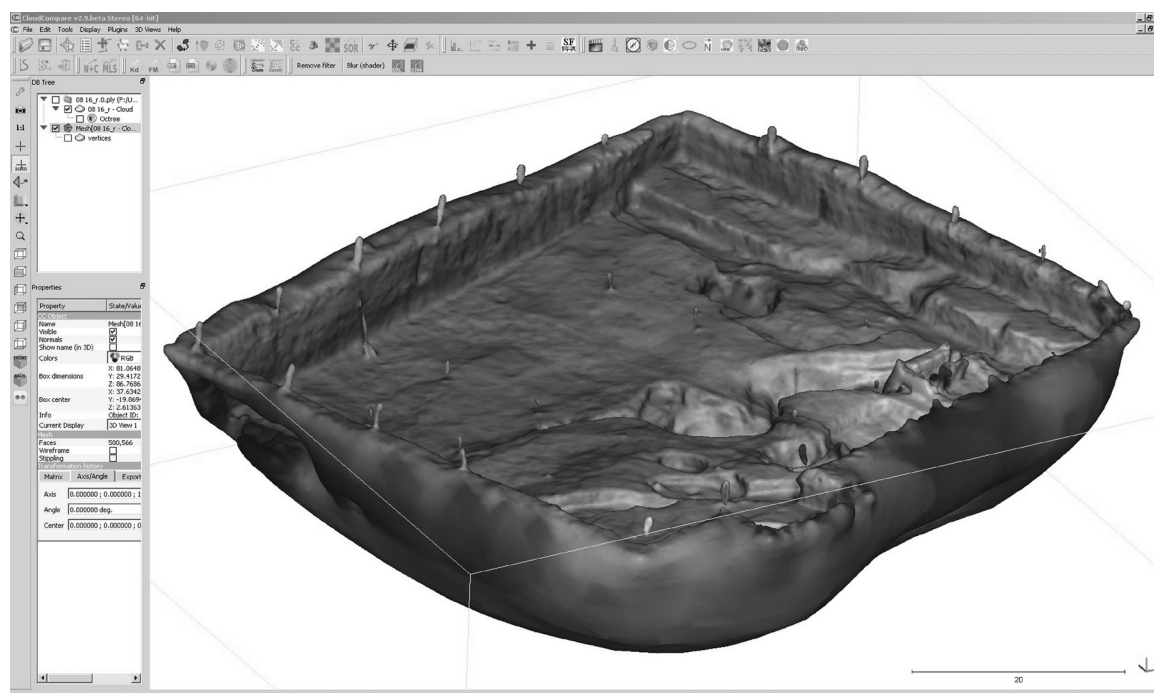


Рис. 2. 3D-модель раскопа Увекского городища, построенная в программе CloudCompare

- ограничение по условиям съемки;
- техническая и программная обеспеченность;
- квалификация исполнителя;
- репрезентативность данных;
- качество (геометрическая и метрическая точность);
- условная себестоимость.

Критерий ограничения по условиям съемки обусловлен следующими факторами: геометрической формой исследуемого объекта, его физической доступностью, погодными условиями на момент съемки и техническими ограничениями устройств. Объект или территории со

значительной диспропорцией по ширине, длине и высоте ограничены для проведения съемки фотоаппаратом, за исключением съемки с беспилотных летательных аппаратов, что приводит к значительным сложностям по созданию единой модели и, следовательно, вычислению геометрических параметров. Погодные условия оказывают существенное влияние как на фотосъемку, так и на лазерное сканирование объектов. К неблагоприятным условиям проведения лазерной съемки относятся атмосферные осадки в твердой или жидкой форме, густой туман, значительная отрицательная температура и состояние деятельной поверхности, при фотосъемке это полуденное



солнце, контрастирующее с интенсивными тенями, муар в атмосфере, туман разного происхождения, атмосферная дымка и темное время суток.

По технической и программной обеспеченности фотограмметрический метод исследований является более доступным и распространенным, но сложным с квалификационной точки зрения. Разработка и широкое распространение бесплатных программ автоматической фотограмметрической обработки с куда меньшими начальными затратами на фотографическое оборудование сделали его более распространенным по сравнению с технологией лазерного сканирования.

Не менее важным критерием для сравнения является репрезентативность данных, под которой понимают повторяемость геометрических и точностных характеристик исходных материалов создаваемой трехмерной модели объекта. Для описываемого фотограмметрического метода условно характерен «субъективизм», когда результаты полученных исходных данных, рассчитанных по одинаковому набору снимков, отличаются. Это вызвано различиями в используемом программном обеспечении или даже в аппаратной части компьютера. По данному критерию метод лазерного сканирования выступает эталоном, поскольку обеспечивает повторяемость результатов сканирования в пределах допустимых отклонений, обусловленных предельной точностью измерений, и контроль на всех этапах получения исходного единого «облака точек».

Критерий качества переключается с репрезентативностью и связан в первую очередь уже не с

самими исходными данными, а с точностью вычисления и построения трехмерной модели. Именно по этому критерию значительно отличаются сравниваемые методы. Так, изначально созданная фотограмметрическая модель выполнена в условной системе координат и единицах измерения. Для осуществления измерений по ней требуется провести ее уравнивание по точкам с заданными пространственными характеристиками. Для осуществления данной процедуры дополнительно требуется осуществить, как минимум, тахеометрическую съемку на местности опорных точек каким-либо инструментом, при этом точность самой фотограмметрической модели будет не лучше точности полученных результатов. Данное требование по съемке, обработке и интерпретации полученных результатов и делит фотограмметрию условно на «любительскую» и профессиональную. Геометрическая и метрическая точность технологии лазерного сканирования напрямую зависит от класса точности и параметров используемого оборудования для съемки.

Для сравнения геометрической и метрической точности трехмерных моделей в качестве основы взяты данные лазерного сканирования, поскольку они объективно подтверждены техническими характеристиками использованного для съемки оборудования, а отдельные точки используются в качестве опорных в рамках операции уравнивания фотограмметрических данных.

Визуальное совмещение и сравнение показало (рис. 3), что для геометрии фотограмметрической модели характерна некоторая «волнистость»

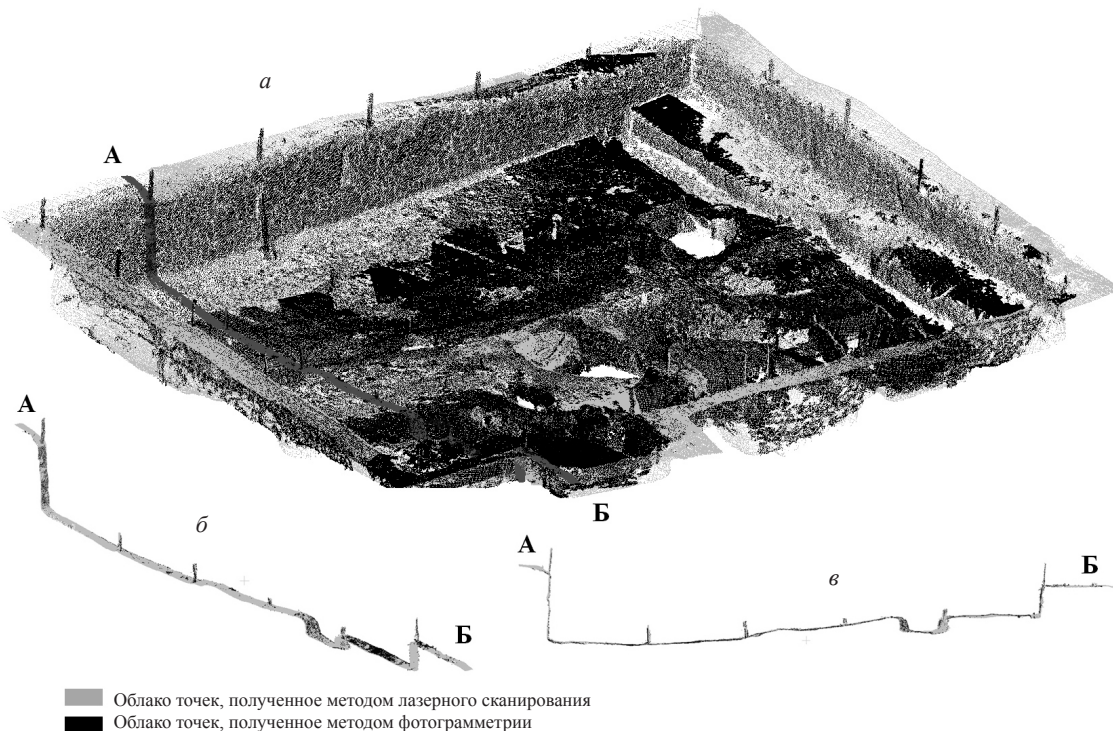


Рис. 3. Совмещенные облака точек: *a* – общий вид модели; *б* – вид сверху на разрез по линии А–Б; *в* – вид сбоку на разрез по линии А–Б



полученной поверхности, т. е. в пределах каждой плоскости раскопа целые коллекции точек (области) лежат выше/ниже, левее/правее и ближе/дальше относительно поверхностей модели лазерного сканирования. Как мы отмечали раньше, точность построенной поверхности по результатам лазерного сканирования эквивалентна суммарной точности всего выполненного хода, значит, отклонение фотограмметрической модели в плане и по высоте, как минимум, превысило значение ± 5 мм.

Разность высот между поверхностями моделей в отдельных точках составила до нескольких сантиметров, что незначительно для раскопа размером 10,0 x 11,9 м и глубиной до 2,4 м. Основные расхождения высот характерны, в частности, для участков верхней бровки раскопа, покрытых растительностью (ближний и дальний углы раскопа от наблюдателя, см. рис. 3). При этом во время подготовки эталонной модели осуществлялась ручная «чистка» данных участков от ошибочных измерений и «стрижка» растительности, а фотограмметрическая модель строилась автоматически и «компьютерный интеллект» никак не мог учесть фактор «растительности» при построении модели.

По результатам предварительного сравнения перечисленных критериев можно объективно сказать, что применение фотограмметрического метода в археологических изысканиях является более обоснованным и доступным для исследователей, если основной задачей не стоит получение качественных, т. е. точных по геометрии и метрике трехмерных моделей объектов. Для получения «облака точек» достаточно лишь наличия неметрической цифровой камеры приемлемого качества, физической доступности оптимальной формы объекта исследования и умения фотографировать. Само создание трехмерной модели проводится в полуавтоматическом режиме, что позволяет сократить время на обработку данных и ускорить получение наглядного результата. Однако применение свободно распространяемых программных комплексов по фотограмметрии возможно только для некоммерческого использования, создания комплекса из нескольких различных, не связанных между собой программных продуктов.

По себестоимости съемки и обработки полученных данных можно объективно утверждать, что в настоящий момент результаты, полученные фотограмметрическим методом, на порядок дешевле по сравнению с лазерным сканированием. Это связано со стоимостью оборудования и лицензионного программного обеспечения, а также трудовыми затратами.

Выводы

Методы фотограмметрии и лазерного сканирования для получения 3D-моделей находят все более широкое применение не только в археологических исследованиях [13, с. 127].

На примере Увекского городища отработана методика создания 3D-модели одного из раскопов с помощью непрофессиональных фотограмметрических программных комплексов и фотографического оборудования. Полученная модель по набору общих точностных характеристик незначительно отличается от данных, полученных с использованием профессионального геодезического оборудования, поэтому может использоваться неквалифицированным в фотограмметрии исполнителем для целей фиксации, мониторинга и прочего всестороннего анализа работ на археологическом раскопе в ГИС.

В свою очередь, использование технологии лазерного сканирования позволило сразу работать в метрической системе координат, контролировать получаемые данные начиная с этапа полевых работ, учесть при моделировании растительности и прочие антропогенные объекты. Это позволило достигнуть в создаваемой 3D-модели ГИС точности съемочного оборудования. Данный метод является наиболее эффективным в исследованиях, где критична достоверность и точность получаемых данных.

Библиографический список

1. Сингатулин Р. А. Фотограмметрические технологии в археологии (краткий исторический очерк) [Электронный ресурс]. URL: <http://www.gramota.net/materials/3/2013/3-1/41.html> (дата обращения: 12.10.2018).
2. Берлянт А. М. Теория геоизображений. М. : ГЕОС, 2006. 262 с.
3. Шакиров З. Г. Методы фиксации в археологии : учеб.-метод. пособие. Казань : Казанский университет, 2015. 114 с.
4. Новел С., Керивен Р., Грэндорж Ф., Пу Ф. Сравнение методов аэрофотограмметрии и трехмерного лазерного сканирования для создания трехмерных моделей сложных объектов [Электронный ресурс]. URL: http://www.cadmaster.ru/magazin/articles/cm_84_20.html (дата обращения: 12.10.2018).
5. Объекты культурного наследия регионального значения Саратовской области [Электронный ресурс]. URL: <https://stroysar.ru/housing/culture-objects-regional/> (дата обращения: 15.10.18).
6. Недашковский Л. Ф. Золотоордынский город Укек и его округа. М. : Восточная литература. РАН, 2000. 224 с.
7. Безвершенко Л. С., Данилов В. А., Федоров А. В. Методика реконструкции палеорельефа Увекского массива в XIII веке с использованием ГИС-технологий // Современные проблемы территориального развития : электрон. журн. [Электронный ресурс]. URL: <https://terjournal.ru/wp-content/uploads/2018/07/ID48.pdf> (дата обращения: 12.10.2018).
8. Комплексный подход при сборе информации для визуализации историко-культурного наследия острова-града Свяжск / Д. Г. Бугров, И. И. Гайнуллин, А. В. Касимов [и др.] [Электронный ресурс]. URL: https://repository.kpfu.ru/?p_id=109047 (дата обращения: 12.10.2018).



9. Wu C., Agarwal S., Curless B., Seitz S. M. Multicore Bundle Adjustment [Электронный ресурс]. URL: <http://grail.cs.washington.edu/projects/mcbs/pba.pdf> (дата обращения: 12.10.2018).
10. Wu C. VisualSFM: A Visual Structure from Motion System [Электронный ресурс]. URL: <http://ccwu.me/vsfm/> (дата обращения: 12.10.2018).
11. CloudCompare : 3D point cloud and mesh processing software [Электронный ресурс]. URL: <http://cloudcompare.org/> (дата обращения: 20.09.18).
12. Безвершенко Л. С., Федоров А. В. Опыт применения метода фотограмметрии при фиксации археологического раскопа на Увекском городище (Саратовская область) // Международная археологическая школа в Болгаре / Институт археологии имени А. Х. Халикова Академии наук Республики Татарстан. Казань, 2018. Вып. 5. С. 29–35.
13. Шуберт Х. 3Д-фотограмметрия с применением БПЛА в процессе археологического исследования // Вестник Омского университета. Серия «Исторические науки». 2016. № 4 (12). С. 124–127.

Образец для цитирования:

Данилов В. А., Федоров А. В., Безвершенко Л. С. Сравнение методов фотограмметрии и лазерного сканирования для создания трехмерных моделей объектов и территорий археологических ГИС (на примере археологического раскопа Увекского городища) // Изв. Саратов. ун-та. Нов. сер. Сер. Науки о Земле. 2019. Т. 19, вып. 2. С. 72–78. DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-2-72-78>

Cite this article as:

Danilov V. A., Fedorov A. V., Bezvershenko L. S. The Comparison of the Methods of Photogrammetry and Laser Scanning for the Establishment of Three-Dimensional Models of Objects and Territories of Archeological GIS (on the Example of the Archeological Excavation of Uvek Hillfort). *Izv. Saratov Univ. (N. S.), Ser. Earth Sciences*, 2019, vol. 19, iss. 2, pp. 72–78 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2019-19-2-72-78>
