

УДК 528.94:004.4

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-4-130-137

ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ WEB-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ДАННЫХ, ПОЛУЧАЕМЫХ С ПОМОЩЬЮ АКТИВНЫХ МЕТОДОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

Алексей Александрович Колесников

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, кандидат технических наук, доцент кафедры картографии и геоинформатики, тел. (913)725-09-28, e-mail: alexeykw@mail.ru

Денис Викторович Грищенко

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, 630108, Россия, г. Новосибирск, ул. Плеханова, 10, аспирант кафедры картографии и геоинформатики. тел. (383)361-06-35, e-mail: mr_divis@mail.ru

Все большее количество типов пространственных данных становится возможным отображать с помощью только технических средств web-сервисов и стандартного браузера, без необходимости установки ГИС или САД систем. Одним из таких типов данных являются данные, получаемые с помощью активных методов дистанционного зондирования (как правило, они представляют собой облака точек), полноценная работа с которыми буквально 3–4 года назад была возможна только на высокопроизводительных компьютерах и специализированном программном обеспечении. Существующие же сейчас web-технологии позволяют не только отображать облака точек, но и интерактивно взаимодействовать с ними – выполнять измерения, настраивать стили отображения, совмещать с пространственными данными других типов. Целью статьи является формирование критериев и анализ производительности программных средств для создания web-сервисов по визуализации данных, получаемых с помощью активных методов дистанционного зондирования. Для практической апробации выбранного программного обеспечения и выполнения анализа по сформулированной системе групп критериев были использованы несколько файлов, содержащих облака точек из открытых источников. Исследование проводилось на примере программных библиотек Three.js, Deck.gl, Plas.io, Potree, CesiumJS и Blend4Web. По результатам апробации сформированы сводные таблицы производительности и функциональности. Полученные результаты демонстрируют, что с точки зрения производительности, средств визуализации, базовых функций по оформлению и анализу облаков точек современные web-сервисы не уступают специализированному настольному программному обеспечению.

Ключевые слова: визуализация, пространственные данные, облака точек, web-сервис, октодерев, gLTF, JavaScript

Введение

Развитие технологии WebGL, позволяющей браузерам унифицированно использовать аппаратные средства видеокарт для визуализации интерактивной двух и трехмерной графики, дало возможность пользователям без установки дополнительного программного обеспечения работать с достаточно сложными трехмерными геопривязанными моделями [1, 2]. Примерами таких программных продуктов могут служить Google Earth, Cesium, MapBox GL [3, 4]. С точки зрения трехмерной визуализации в браузере вектор-

ных или растровых карт сейчас особых проблем, как с точки зрения качества, так и производительности, практически не возникает. Кроме этого, распространенности трехмерных web-карт во многом поспособствовали встроенные модули в наиболее популярных настольных ГИС, автоматически, без необходимости знаний в web-разработке, генерирующие трехмерные web-приложения [5–8]. Но если рассматривать такой тип пространственных данных, как облака точек, получаемые, как правило, с помощью активных методов дистанционного зондирования, то в этом случае для качественной визуализации необхо-

димы уже познания в базовом web-программировании, особенностях форматов данных и их преобразованиях, что обуславливается объемом и малой внутренней структурированностью [9–12]. В статье рассматриваются программные средства на базе web-технологий, позволяющие отображать и взаимодействовать с данными, получаемыми с помощью активных методов дистанционного зондирования только средствами web-браузера. Для выбранных средств проводится сравнительный анализ производительности, затрат на подготовку исходных данных и функциональности.

Методы и материалы

Суть исследования заключается в визуализации определенных облаков точек с помощью каждого из выбранных для тестирования программных средств, в результате оценивается производительность, сложность в подготовке данных, функциональность.

Под производительностью в данном случае будет подразумеваться среднее количество кадров в секунду (англ. FPS, frame per second) при отображении полного оборота облака точек в горизонтальной плоскости, выполняемого за 12 секунд.

Затраты на подготовку исходных данных оцениваются с точки зрения количества шагов, которые требуется выполнить для получения файла (или набора файлов) формата из исходного набора данных, подходящего для конкретного программного средства.

Функциональность программного средства анализировалась с позиций настройки параметров отображения облака точек, возможностей выполнения геометрических измерений и расчетов, наличия инструментов редактирования. Для проведения тестирования были взяты два облака точек: «Abenberg» [13] и «Stanford-2D-3D» [14].

«Abenberg» представляет собой облако, состоящее из 5,4 млн точек со средней плотностью в 16 точек на квадратный метр. Все точки разделены на классы поверхностей, растительности и строений. В процессе использования данных, кроме координат и значения класса, в семантику точки также заносилось значение интенсивности отраженного сигнала.

«Stanford-2D-3D» – это набор облаков точек, преимущественно внутренних помещений (холлы, офисы, конференц-залы) общественных зданий. В исходных данных, кроме координат, каждая точка содержит значения ее цвета в формате RGB и класс объекта, к которому эта точка принадлежит. Для экспериментов был использован конференц-зал № 2 из набора № 1, состоящий из 1,5 млн точек.

Поскольку наиболее универсальным форматом хранения данных облаков точек является LAS, а исходные данные в обоих наборах представляют собой текстовые файлы со значениями определенных параметров, разделенными запятыми, то предварительно выполнялась конвертация в этот формат посредством программного обеспечения libLAS.

В качестве исследуемого было выбрано следующее наиболее популярное бесплатное либо распространяемое с открытым исходным кодом программное обеспечение: Three.js, Potree, Plas.io, Deck.gl, CesiumJS, Blend4Web.

Three.js [15] – это библиотека на языке JavaScript, используемая для создания и отображения интерактивной трехмерной графики при разработке веб-приложений. Она является базовой программной библиотекой трехмерной графики для большинства рассматриваемых в статье библиотек (Potree, Plas.io, Deck.gl), то есть построение базовых элементов трехмерной сцены и взаимодействие с пользователем осуществляются через функции библиотеки Three.js. Для загрузки и визуализации облаков точек Three.js использует формат PCD (Point Cloud Data) программного обеспечения с открытым исходным кодом Point Cloud Library [16]. Особенностью этого формата является сочетание человекочитаемого заголовка, определяющего количество, размер, размерность и тип данных облака точек и раздела данных, который может быть представлен как в текстовом, так и двоичном формате, который не читается человеком. Также имеется вариант отображения из формата gLTF, но формируемые с помощью pdal файлы часто обладают некорректным синтаксисом и не отображаются.

Deck.gl [17] является JavaScript библиотекой, ориентированной на отображение пространственных данных большого объема. Встроенный модуль PointCloudLayer позво-

ляет в качестве исходных данных использовать файлы формата LAS/LAZ. Для наиболее полного использования всех функций необходимо использовать Node.js и React.

Plas.io [18, 19] также формирует визуальное отображение непосредственно из файла формата LAS. На официальном сайте представлен сервис, который позволяет загрузить произвольный файл и отобразить его, задав необходимый набор базовых параметров. Для создания локальной копии этого сервиса используется система сборки файлов Gulp.

JavaScript библиотека Potree [20–22] использует для хранения и визуализации собственный формат, базирующийся на структуре октодеревя. Он формируется на принципах рекурсивного разделения трехмерного пространства на восемь ячеек (октантов) и формирования древовидной структуры, в дальнейшем используемой для генерализации облака точек и его оптимального отображения. Для создания файла нужного формата разработчиками предоставляется специальный конвертер. Для стандартного развертывания приложения нет необходимости в дополнительном программном обеспечении.

CesiumJS [23, 24] представляет собой web-приложение для визуализации различных пространственных данных посредством виртуального глобуса. Для облаков точек используются трехмерные тайлы в формате gLTF [25, 26]. gLTF (GL Transmission Format) – это формат для хранения трехмерных сцен и отдельных моделей со структурой в стандарте JSON. Технически он основывается на двух файлах: JSON для описания структуры всей трехмерной сцены и бинарного файла, для хранения данных (модели, текстуры, освещение, камеры и т. д.).

Файлы этого формата можно получить, используя либо pdal, либо сервис от разработчиков CesiumJS – Cesium Ion.

Описанные пять JavaScript библиотек реализуют традиционный подход к разработке web-приложений, и для сравнения с ними взят Blend4Web, который представляет собой расширение для настольного приложения Blender, генерирующего весь необходимый программный код на основе объектов трехмерной сцены и указанных параметров. Загрузка LAS файла осуществлялась с помощью модуля LiDAR-Importer. Для корректной визуализации облако точек в сцене Blender должно быть преобразовано в полигональный объект, что может занять довольно продолжительное время и потребовать ручного исправления ошибок обработки.

Запуск всего описанного программного обеспечения выполнялся на видеокартах Radeon 8600M и Nvidia 720M. Выбор обусловлен относительно низкой (и очень близкой) производительностью, что позволит наглядно увидеть различия в производительности отдельных программных решений.

Поскольку не все используемые варианты построения web-приложений обладали встроенными счетчиками количества кадров в секунду, то для унификации визуализации значений использовалась библиотека stats.js.

Результаты

С помощью каждого программного обеспечения визуализировались указанные облака точек с максимально близкими параметрами оформления. Сводные результаты представлены в табл. 1 (большее значение – лучше).

Таблица 1

Сводная таблица показателей производительности

Программное обеспечение	Abenberg, количество кадров в секунду	Stanford-2D-3D, количество кадров в секунду
Three.js	21	26
Deck.gl	12	15
Plas.io	36	48
Potree	30	39
CesiumJS	22	28
Blend4web	38	51

С точки зрения подготовки данных Deck.gl и Plas.io (пример визуализации облака точек Abenberg с помощью Plas.io приведен на рис. 1) позволяют загружать облака точек непосредственно в исходном формате LAS, второй вариант работает гораздо быстрее, но нужно отметить, что требуется затратить больше времени на предварительную настройку отображения (по умолчанию выбирается некорректная цветовая схема, что приводит к сокрытию части элементов облака).



Рис. 1. Визуализация Abenberg в Plas.io

ния в Blend4web. Первым шагом выполняется конвертация в среду Blender с помощью модуля LiDAR-Importer, затем полученное облако точек необходимо конвертировать в полигональный объект (или их набор) и потом преобразовать трехмерную сцену в набор файлов web-приложения (на всех этапах могут возникнуть дополнительные сложности с согласованием различных версий моделей и основного приложения, что зачастую приводит к необходимости изменения исходного программного кода). Итоговая сводная информация по подготовке данных приведена в табл. 2.

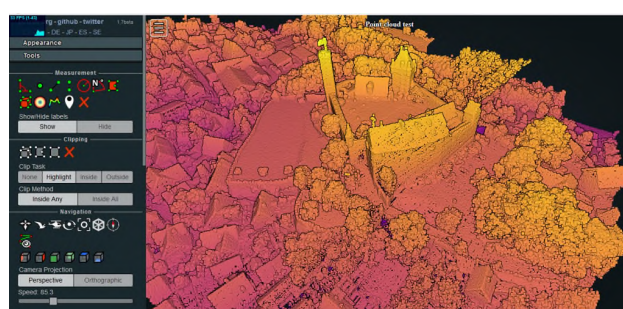


Рис. 2. Визуализация Abenberg в Potree

Three.js, Potree (пример визуализации облака точек Abenberg с помощью Potree приведен на рис. 2) и CesiumJS (пример визуализации облака точек Abenberg с помощью CesiumJS приведен на рис. 3) требуют конвертации каждая в свой формат и наиболее простым вариантом является подготовка данных для последнего (использованием сервиса Cesium Ion), в случае первых двух вариантов требуются установка и настройка дополнительного программного обеспечения.

Наибольшее количество времени требуется на подготовку файла LAS для отображе-

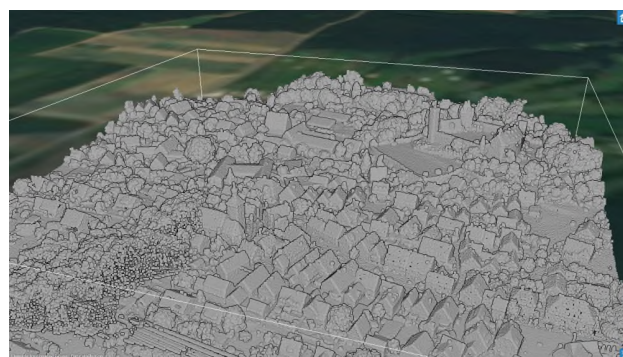


Рис. 3. Визуализация Abenberg в CesiumJS

Таблица 2

Сводная таблица этапов подготовки данных

Программное обеспечение	Количество шагов, их описание
Three.js	1, конвертация в формат Point Cloud Data (PCD) с помощью программного обеспечения Point Cloud Library или PDAL
Deck.gl	0, используется исходный формат LAS
Plas.io	0, используется исходный формат LAS
Potree	1, конвертация в формат октодерева potree octree
CesiumJS	1, конвертация в формат 3D тайлов gLTF
Blend4web	3, импорт в Blender, конвертация вертексов в полигоны, формирование web-приложения

Кроме основной функциональности по визуализации облаков точек, большинство описываемых программных средств обладают дополнительными функциями. К ним относятся инструменты для измерения длин, площадей и объемов, настройки цветовых схем и т. д. Описание конкретных инструментов приведено

в табл. 3. Нужно отметить, что не все возможности Blender по созданию визуальных эффектов для трехмерных сцен могут быть корректно преобразованы в приложение Blend4web.

Более подробная информация по функциональности каждого программного обеспечения приведена в табл. 3.

Таблица 3

Функциональность программного обеспечения

Программное обеспечение	Функциональность
Three.js	Статичный набор файлов для создания web-страницы
Deck.gl	Цветовые схемы
Plas.io	Измерение расстояний, цветовые схемы
Potree	Измерение расстояний и площадей, цветовые схемы, настройка цвета для каждого класса точек
CesiumJS	Измерение расстояний, цветовые схемы, расчет зон видимости
Blend4web	Цветовые схемы, визуальные эффекты, источники света

Заключение

С точки зрения производительности наилучшим выбором является Blend4web и Plas.io, но нужно учитывать значительные временные затраты на подготовку данных в случае с Blend4web. С точки зрения сочетания функциональности, простоты сборки приложения и подготовки данных наилучшим выбором представляется Potree.

Также проведенное исследование показало, что зависимости производительности только от формата представления данных

не наблюдается, в отличие от его сочетания с определенным программным обеспечением.

Дополнительно нужно отметить, что на текущий момент web-инструменты позволяют на достаточно высоком уровне реализовать только функции визуализации и базовых измерений облака точек, а то, что касается редактирования, фильтрации, сегментации, сравнения и выравнивания нескольких наборов данных, остается прерогативой настольного (и при этом практически всегда проприетарного) программного обеспечения.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Разработка теории и технологических решений контроля состояния защитных сооружений при перекачке нефтепродуктов методами активного дистанционного зондирования», № 0807-2020-0002).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Behr J., Eschler P., Jung Y., Zöllner M. X3DOM: a DOM-based HTML5/X3D integration model // Web3D '09: Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology. – 2009. – P. 127–135. doi: 10.1145/1559764.1559784.
- Evans A., Romeo M., Bahrehand A., Agenjo J., Blat J. 3D Graphics on the Web: A Survey // Computers & Graphics. – 2014. – No. 41. – P. 43–61. doi: 10.1016/j.cag.2014.02.002.
- Li L., Qiao X., Lu Q., Ren P., Lin R. Rendering optimization for mobile web 3D based on animation data separation and on-demand loading // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8. – P. 88474–88486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993613.
- Potenziani M., Callieri M., Dellepiane M., Corsini M., Scopigno R. 3DHOP: 3D heritage online presenter // Computers & Graphics. – 2015. – No. 52. – P. 1–15. doi: 10.1016/j.cag.2015.07.001.
- Елшина Т. Е., Утробина Е. С., Сысоев А. В. Визуализация модели горного рельефа для web-карт // Вестник СГУГиТ. – 2020. – Т. 25, №. 1. – С. 145–155.

6. Каленов Н. Е., Кириллов С. А., Соболевская И. Н., Сотников А. Н. Визуализация цифровых 3d-объектов при формировании виртуальных выставок // *Russian Digital Libraries Journal*. – 2020. – № 23 (3). – С. 418–432.
7. Бугаков П. Ю., Кацко С. Ю., Басаргин А. А., Воронкин Е. Ю. Анализ функциональных возможностей веб приложения Kepler.gl для визуализации и анализа больших наборов пространственных данных // *Вестник СГУГиТ*. – 2018. – Вып. 4 (23). – С. 155–164.
8. Сотников А. Н., Соболевская И. Н., Кириллов С. А., Чередниченко И. Н. Технологии визуализации 3d web-коллекций // *Научный сервис в сети Интернет : труды XX Всероссийской научной конференции (17–22 сентября 2018 г., г. Новороссийск)*. – М. : ИПМ им. М. В. Келдыша, 2018. – С. 438–447.
9. Galeazzi F., Callieri M., Dellepiane M., Charno M., Richards J., Scopigno R. Web-based visualization for 3D data in archaeology: The ADS 3D viewer // *Journal of Archaeological Science: Reports*. – 2016. – No. 9. – P. 1–11. doi: 10.1016/j.jasrep.2016.06.045.
10. Gonizzi Barsanti S., Guidi G. 3D digitization of museum content within the 3D icons project // *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Annals)*. – 2013. – No. II-5/W1. – P. 151–156. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-151-2013.
11. Алтынцев М. А. Карпик П. А. Методика создания цифровых трехмерных моделей объектов инфраструктуры нефтегазодобывающих комплексов с применением наземного лазерного сканирования // *Вестник СГУГиТ*. – 2020. – Т. 25, № 2. – С. 121–139.
12. Анализ больших объемов данных [Электронный ресурс] // Технологии анализа данных BASEGROUP LABS. – Режим доступа: <https://basegroup.ru/community/articles/very-large-data> (дата обращения: 01.10.2020).
13. Hebel M., Arens M., Stilla U. Change detection in urban areas by object-based analysis and on-the-fly comparison of multi-view ALS data // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2013. – No. 86. – P. 52–64. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.005.
14. Armeni I., Sax A., Zamir A., Savarese S. Joint 2D-3D-Semantic Data for Indoor Scene Understanding // *arXiv preprint*. – 2017. – arXiv:1702.01105.
15. Williams J. Learning HTML5 game programming: a hands-on guide to building online games using Canvas, SVG, and WebGL. – Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 2012. – 142 p.
16. Rusu R. B., Cousins S. 3D is here: Point Cloud Library (PCL) // *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. – Shanghai. – 2011. – P. 1–4. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
17. Bostock M., Ogievetsky V., Heer J. D-3: Data-Driven Documents // *IEEE transactions on visualization and computer graphics*. – 2011. – No. 17. – P. 2301–2309. doi:10.1109/TVCG.2011.185.
18. Point cloud compression framework for the Web / S. Renault, T. Ebner, I. Feldmann, O. Schreer // *2016 International Conference on 3D Imaging (IC3D)*, Liege. – 2016. – P. 1–8. doi: 10.1109/IC3D.2016.7823455.
19. Schütz M., Mandlbürger G., Otepka J., Wimmer M. Progressive real time rendering of one billion points without hierarchical acceleration structures // *Computer Graphics Forum*. – 2020. – No. 39. – P. 51–64.
20. Sánchez-Aparicio L., Masciotta M., Alvarez J., Ramos L., Oliveira D., Jimenez J. A., Aguilera D., Monteiro P. Web-GIS approach to preventive conservation of heritage buildings // *Automation in Construction*. – 2020. – No. 118. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103304.
21. Scianna A., La Guardia M., Scaduto M. Sharing on web 3D models of ancient theatres. A methodological workflow // *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. – 2016. – No. XLI-B2. – P. 483–490. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B2-483-2016.
22. Zhang C., Florencio D., Loop C. Point cloud attribute compression with graph transform // *2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP*. – 2014. – P. 2066–2070. doi: 10.1109/ICIP.2014.7025414.
23. Alvarez M., Raposo J., Miranda M., Bello A., Barbero M. Web 3D: a CityGML viewer for cross-domain problem resolution // *Applied Geomatics*. – 2020. – No. 6. doi: 10.1007/s12518-020-00325-4.
24. De Paor D., Whitmeyer S., Bentley C. Cesium – a virtual globe with strong potential applications in geoscience education // *GSA Abstracts with Programs*. – 2020. – Vol. 48. – No. 2. doi: 10.1130/abs/2016NE-272098.
25. Chen Y., Shooraj E., Sabri S. From IFC to 3D tiles: An integrated open-source solution for visualising BIMs on Cesium // *ISPRS International Journal of Geo-Information*. – 2018. – No. 7(10). – P. 393–404. doi: 10.3390/ijgi7100393.
26. Gao Y., Cheung G., Maugey T., Frossard P., Liang Jie. 3D geometry representation using multiview coding of image tiles // *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*. – 2014. – P. 6157–6161. doi: 10.1109/ICASSP.2014.6854787.

Получено 16.10.2020

© А. А. Колесников, Д. В. Грищенко, 2020

POSSIBILITIES OF USING WEB-TECHNOLOGIES FOR VISUALIZATION OF DATA OF ACTIVE METHODS OF REMOTE SENSING

Aleksey A. Kolesnikov

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D., Associate Professor, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (913)725-09-28, e-mail: alexeykw@mail.ru

Denis V. Grishchenko

Siberian State University of Geosystems and Technologies, 10, Plakhotnogo St., Novosibirsk, 630108, Russia, Ph. D. Student, Department of Cartography and Geoinformatics, phone: (383)361-06-35, e-mail: mr_divis@mail.ru

An increasing number of types of spatial data is possible to display and operate using only technical means of web services and a standard browser, without the need to install GIS or CAD systems. One of these types of data is data obtained with using active methods of remote sensing (as a rule, they are point clouds), full-fledged work with which 3–4 years ago was possible only on high-performance computers and specialized software. The existing web technologies allow not only displaying point clouds, but also interactively interacting with them - to perform measurements, customize display styles, combine with spatial data of other types. The purpose of the article is to form criteria and analyze the performance of software tools for creating web services for visualizing data obtained with using active methods of remote sensing. For practical testing of the selected software and analysis according to the formulated system of criteria groups, several files containing point clouds from open sources were used. The research was carried out with using the software libraries Three.js, Deck.gl, Plas.io, Potree, CesiumJS and Blend4Web. Based on the testing results, summary tables of performance and functionality were formed. The obtained results demonstrate that in terms of performance, visualization tools, basic functions for designing and analyzing point clouds, modern web services are not inferior to specialized desktop software.

Keywords: visualization, spatial data, point clouds, web service, octree, gLTF, JavaScript

REFERENCES

1. Behr, J., Eschler, P., Jung, Y., & Zöllner, M. (2009). X3DOM: a DOM-based HTML5/X3D integration model. *Web3D '09: Proceedings of the 14th International Conference on 3D Web Technology* (pp. 127–135). doi: 10.1145/1559764.1559784.
2. Evans, A., Romeo, M., Bahrehmand, A., Agenjo, J., & Blat, J. (2014). 3D Graphics on the Web: A Survey. *Computers & Graphics*, 41, 43–61. doi: 10.1016/j.cag.2014.02.002.
3. Li, L., Qiao, X., Lu, Q., Ren, P., & Lin, R. (2020). Rendering optimization for mobile web 3D based on animation data separation and on-demand loading. *IEEE Access*, 8, 88474–88486. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2993613.
4. Potenziani, M., Callieri, M., Dellepiane, M., Corsini, M., & Scopigno, R. (2015). 3DHOP: 3D heritage online presenter. *Computers & Graphics*, 52, 1–15. doi: 10.1016/j.cag.2015.07.001.
5. Elshina, T. E., Utrobina, E. S., & Sysoev, A. V. (2020). Visualization of the mountain digital elevation model in web-maps *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(1), 145–155 [in Russian].
6. Kalenov, N. E., Kirillov, S. A., Sobolevskaya, I. N., & Sotnikov, A. N. (2020). Visualization of digital 3d objects in the formation of virtual exhibitions. *Russian Digital Libraries Journal*. 23(3), 418–432.
7. Bugakov, P. Yu., Katsko, S. Yu., Basargin, A. A., & Voronkin E. Yu. (2018). Analysis of the functionality of the web application Kepler.gl for visualizing and analyzing of large spatial datasets. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 155–164 [in Russian].
8. Sotnikov, A. N., Sobolevskaya, I. N., Kirillov, S. A., & Kalenov, N. E. (2018). The use of 3D visualization technology web-collections for the formation of virtual exhibitions. In *Sbornik trudov XX Vserossiiskoi nauchnoi konferentsii: Nauchnyi servis v seti Internet [Proceedings of the XX All-Russian Scientific Conference: Scientific Service on the Internet]* (pp. 438–447). Moscow: Keldysh Institute of Applied Mathematics (Russian Academy of Sciences) Publ. [in Russian].

9. Galeazzi, F., Callieri, M., Dellepiane, M., Charno, M., Richards, J., & Scopigno, R. (2016). Web-based visualization for 3D data in archaeology: The ADS 3D viewer. *Journal of Archaeological Science: Reports*, 9, 1–11. doi: 10.1016/j.jasrep.2016.06.045.
10. Gonizzi Barsanti, S., & Guidi, G. (2013). 3D digitization of museum content within the 3D icons project. *ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Annals)*, II-5/W1, 151–156. doi: 10.5194/isprsannals-II-5-W1-151-2013.
11. Altyntsev, M. A., & Karpik, P. A. (2020). The technique for creating digital three-dimensional models of oil and gas manufacturing facility object infrastructure using terrestrial laser scanning. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 25(2), 121–139 [in Russian].
12. Big Data Analysis. (n. d.). Retrieved from <https://basegroup.ru/community/articles/very-large-data> [in Russian].
13. Hebel, M., Arens, M., & Stilla, U. (2013) Change detection in urban areas by object-based analysis and on-the-fly comparison of multi-view ALS data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 86, 52–64. doi: 10.1016/j.isprsjprs.2013.09.005.
14. Armeni, I., Sax, A., Zamir, A., & Savarese, S. (2017). Joint 2D-3D-Semantic Data for Indoor Scene Understanding. *arXiv preprint*. arXiv:1702.01105.
15. Williams, J. (2012). *Learning HTML5 game programming: a hands-on guide to building online games using Canvas, SVG, and WebGL*. Upper Saddle River, NJ: Addison-Wesley, 142 p.
16. Rusu, R. B., & Cousins, S. (2011). 3D is here: Point Cloud Library (PCL). *2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 1–4). Shanghai. doi: 10.1109/ICRA.2011.5980567.
17. Bostock, M., Ogievetsky, V., & Heer, J. (2011). D-3: Data-Driven Documents. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 17, 2301–2309. doi:10.1109/TVCG.2011.185.
18. Renault, S., Ebner, T., Feldmann, I., & Schreer, O. (2016). Point cloud compression framework for the Web. *2016 International Conference on 3D Imaging (IC3D)* (pp. 1–8). Liege. doi: 10.1109/IC3D.2016.7823455.
19. Schütz, M., Mandlbürger, G., Otepka, J., & Wimmer, M. (2020). Progressive real-time rendering of one billion points without hierarchical acceleration structures. *Computer Graphics Forum*, 39, 51–64.
20. Sánchez-Aparicio, L., Masciotta, M., Alvarez, J., Ramos, L., Oliveira, D., Jimenez, J. A., Aguilera, D., & Monteiro, P. (2020). Web-GIS approach to preventive conservation of heritage buildings. *Automation in Construction*, No. 118. doi: 10.1016/j.autcon.2020.103304.
21. Scianna, A., La Guardia, M., & Scaduto, M. (2016). Sharing on web 3D models of ancient theatres. A methodological workflow. *ISPRS – International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLI-B2, 483–490. doi: 10.5194/isprs-archives-XLI-B2-483-2016.
22. Zhang, C., Florencio, D., & Loop, C. (2014). Point cloud attribute compression with graph transform. *2014 IEEE International Conference on Image Processing, ICIP*. (pp. 2066–2070). doi: 10.1109/ICIP.2014.7025414.
23. Alvarez, M., Raposo, J., Miranda, M., Bello, A., & Barbero, M. (2020). Web 3D: a CityGML viewer for cross-domain problem resolution. *Applied Geomatics*, No. 6. doi: 10.1007/s12518-020-00325-4.
24. De Paor, D., Whitmeyer, S., & Bentley, C. (2020). Cesium – a virtual globe with strong potential applications in geoscience education. *GSA Abstracts with Programs*, 48(2). doi:10.1130/abs/2016NE-272098.
25. Chen, Y., Shooraj, E., & Sabri, S. (2018). From IFC to 3D tiles: An integrated open-source solution for visualising BIMs on Cesium. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(10), 393-404 doi: 10.3390/ijgi7100393.
26. Gao, Y., Cheung, G., Maugey, T., Frossard, P., & Liang, Jie. (2014). 3D geometry representation using multiview coding of image tiles. *IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing* (pp. 6157–6161). doi:10.1109/ICASSP.2014.6854787.

Received 16.10.2020

© A. A. Kolesnikov, D. V. Grishchenko, 2020