

ИЗУЧЕНИЕ РАЗМЕРНОЙ ТОЧНОСТИ МОДЕЛЕЙ ЧЕЛЮСТЕЙ, ПОЛУЧЕННЫХ С ПОМОЩЬЮ 3D-ПРИНТЕРА ПО ТЕХНОЛОГИИ СТЕРЕОЛИТОГРАФИИ

Е. Н. Жулев¹, Ю. А. Вокулова^{2,*}

¹ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации, пл. Минина и Пожарского, д. 10/1, г. Нижний Новгород, 603950, бокс-470, Россия

² Федеральное государственное казенное учреждение «Поликлиника № 2 Федеральной таможенной службы России», ул. Артельная, д. 2, г. Нижний Новгород, 603098, Россия

Аннотация

Цель исследования: изучить на экспериментальной модели влияние метода получения моделей зубных рядов (цифровой и традиционный) на их размерную точность с использованием цифровых технологий.

Материалы и методы. Представлена оценка размерной точности моделей челюстей, созданных с помощью 3D-принтера Asiga Max UV по цифровым изображениям зубных рядов, созданных внутриротовым сканером iTero Cadent, и гипсовых моделей челюстей, полученных по одноэтапным двухслойным А-силиконовым оттискам. Для изучения размерной точности цифровых изображений использовали программное обеспечение DentalCAD и компьютерную программу MeshLab. Для статистического анализа полученных данных применяли непараметрический ранговый критерий Уилкоксона.

Результаты. Выявлено, что модели челюстей, созданные с помощью 3D-принтера Asiga Max UV, на основе цифровых оттисков, полученных внутриротовым сканером iTero Cadent, обладают большей размерной точностью в сравнении с гипсовыми моделями челюстей, полученными по одноэтапным двухслойным А-силиконовым оттискам, на 31,6% с уровнем значимости $p < 0,05$.

Заключение. Модели челюстей, созданные с помощью 3D-принтера Asiga Max UV, обладают более высокой размерной точностью по сравнению с гипсовыми моделями.

Ключевые слова: цифровые оттиски, CAD/CAM, внутриротовой сканер, стереолитография, 3D-печать

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Жулев Е.Н., Вокулова Ю.А. Изучение размерной точности моделей челюстей, полученных с помощью 3D-принтера по технологии стереолитографии. *Кубанский научный медицинский вестник*. 2020; 27(1): 40–48. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2020-27-1-40-48>

Поступила 06.11.2019

Принята после доработки 25.01.2020

Опубликована 20.02.2020

STUDY OF THE DIMENSIONAL ACCURACY OF JAW MODELS OBTAINED BY 3D PRINTING USING STEREOLITHOGRAPHY

Evgeny N. Zhulev¹, Yuliya A. Vokulova^{2,*}

¹Privolzhsky Research Medical University,
Minina i Pozharskogo square, 10/1, Nizhny Novgorod, Russia

²Polyclinic No. 2 of the Federal Customs Service of Russia,
Artelnaya str., 2, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract

Aim. To study the dimensional accuracy of dentition models produced by digital and conventional methods using an experimental model and digital technologies.

Materials and methods. This article presents an assessment of the dimensional accuracy of jaw models created using an Asiga Max UV 3D printer from digital images of dentition created by an iTero Cadent intraoral scanner and plaster jaw models obtained from one-stage two-layer A-silicone impressions. The DentalCAD software and the Meshlab computer program were used to study the dimensional accuracy of the as-obtained digital images. The nonparametric Wilcoxon rank test was used for statistical analysis of the obtained data.

Results. It is established that jaw models made of DETAX Freeprint model UV photopolymer using an Asiga Max UV 3D printer, based on digital impressions obtained by an iTero Cadent intraoral scanner, have a greater dimensional accuracy in comparison with plaster jaw models obtained from single-stage double-layer A-silicone impressions by 31.6% with a significance level $p < 0.05$.

Conclusion. Jaw models created using an Asiga Max UV 3D printer are characterized by high dimensional accuracy as compared to plaster models.

Keywords: digital impressions, CAD/CAM, intraoral scanner, stereolithography, 3D printing

Conflict of interest: the authors declare no conflicts of interest.

For citation: Zhulev E.N., Vokulova Yu.A. Study of the dimensional accuracy of jaw models obtained by 3D printing using stereolithography. *Kubanskiy Nauchnyi Meditsinskiy Vestnik*. 2020; 27(1): 40–48. <https://doi.org/10.25207/1608-6228-2020-27-1-40-48>

Submitted 06.11.2019

Revised 25.01.2020

Published 20.02.2020

Введение

Быстро развивающиеся цифровые технологии в ортопедической стоматологии — это трехмерное (3D) моделирование и изготовление протезов с помощью CAD/CAM-систем и 3D-принтеров. Данные технологии побуждают перейти от более традиционного клинического рабочего процесса к почти исключительно цифровому формату [1, 2].

Первым этапом цифрового протокола изготовления ортопедических конструкций является получение цифровых изображений зубных рядов пациента с помощью внутриротового сканера. Системы объемного сканирования способны создавать виртуальные изображения препарированных зубов, пригодные для изготов-

ления не прямых реставраций зубов с помощью CAD/CAM-систем [3–6] и для создания физических моделей челюстей методом быстрого прототипирования с помощью 3D-принтера.

Быстрое прототипирование — одна из методик 3D-печати, которая в скором будущем может сыграть значительную роль в возможной замене гипсовых моделей челюстей [1]. Научных публикаций, посвященных изучению размерной точности моделей челюстей, полученных из фотополимерных материалов с помощью аддитивного производства по технологии стереолитографии (SLA), крайне мало, что является обоснованием необходимости проведения дальнейших исследований в этом направлении.

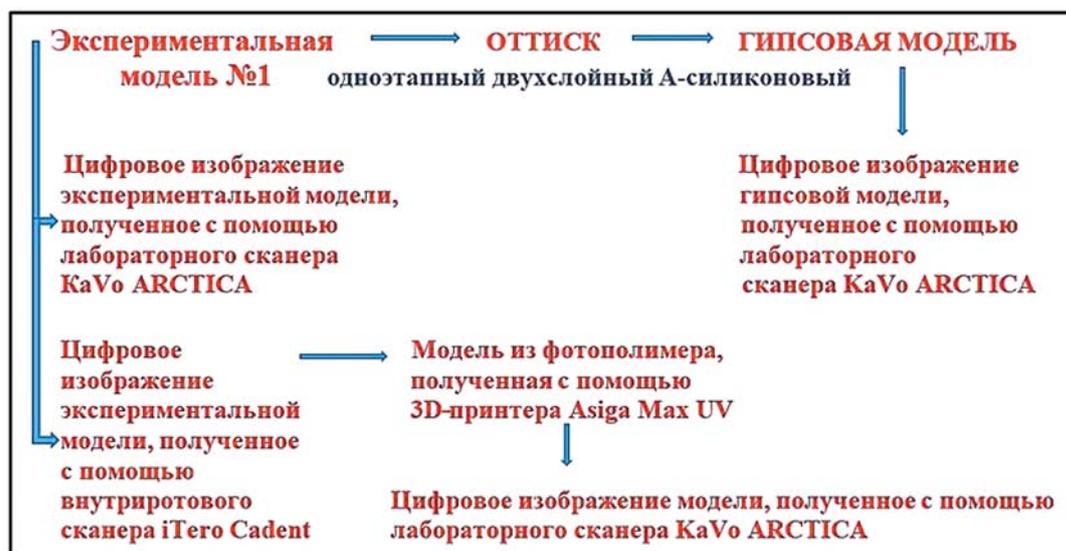


Рис. 1. Схема проведения эксперимента.

Fig. 1. Scheme of the experiment.

Цель исследования: изучить на экспериментальной модели влияние метода получения моделей зубных рядов (цифровой и традиционный) на их размерную точность с использованием цифровых технологий.

Материалы и методы

Для изучения размерной точности моделей челюстей нами была разработана специальная схема проведения исследования (рис. 1).

На первом этапе была создана экспериментальная модель (рис. 2), на которой было проведено препарирование 8 зубов. С помощью внутриротового лазерного сканера iTero Cadent (США) были получены 5 цифровых оттисков экспериментальной модели.

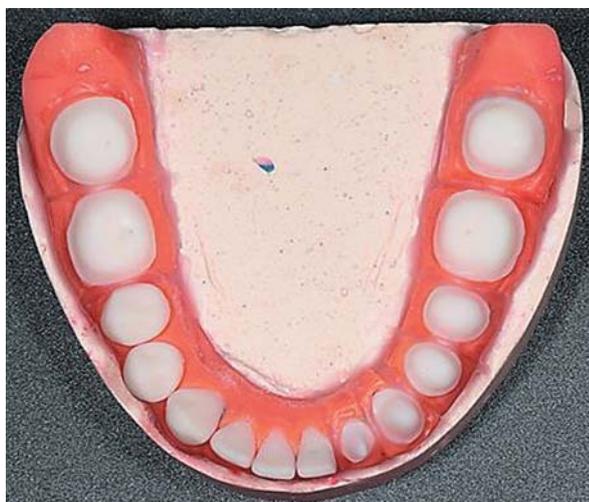


Рис. 2. Экспериментальная модель.

Fig. 2. Experimental model.

В программном обеспечении DentalCAD 2. 2 Valletta в приложении Model Creator на основе данных внутриротового сканирования были созданы цифровые изображения экспериментальной модели (рис. 3 А).

Далее с помощью 3D-принтера Asiga Max UV (рис. 3 Б) были изготовлены 5 моделей из фотополимерного материала Freeprint model UV (DETAX, Германия) по технологии SLA (рис. 4 А).

С экспериментальной модели получали 5 одноэтапных двухслойных А-силиконовых оттисков (Express STD, Express XT Regular Body, 3M ESPE, США), по которым готовили разборные модели из высокопрочного гипса Fujirock (GC, Япония) (рис. 4 Б).

С помощью лабораторного оптического сканера KaVo ARCTICA AutoScan получали цифровое изображение экспериментальной модели, 5 цифровых изображений гипсовых моделей и 5 цифровых изображений моделей, созданных с помощью 3D-принтера. Цифровое изображение экспериментальной модели, полученное с помощью лабораторного оптического сканера KaVo ARCTICA AutoScan, было принято за эталон.

В программном обеспечении KaVo multiCAD каждое полученное цифровое изображение разрезали с сохранением 9 виртуальных фрагментов для каждого цифрового изображения (рис. 5 А). В компьютерной программе MeshLab провели 45 совмещений фрагментов цифрового изображения экспериментальной модели с фрагментами цифровых изображений гипсовых моделей и 45 совмещений фрагментов цифрового изображения экспериментальной модели

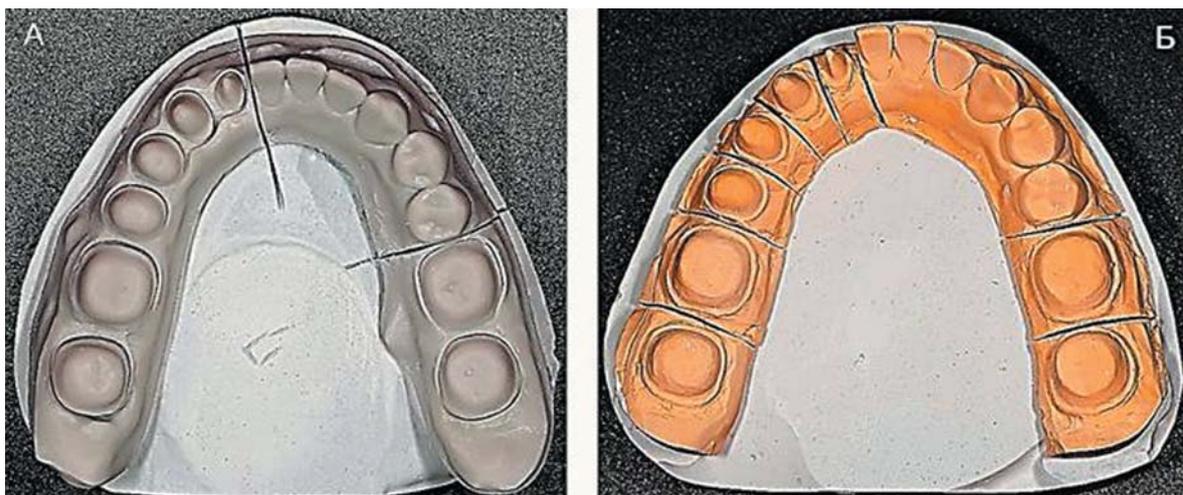


Рис. 3. А — цифровое изображение экспериментальной модели; Б — 3D-принтер Asiga Max UV.
Fig. 3. А — digital image of the experimental model; Б — Asiga Max UV 3D printer.

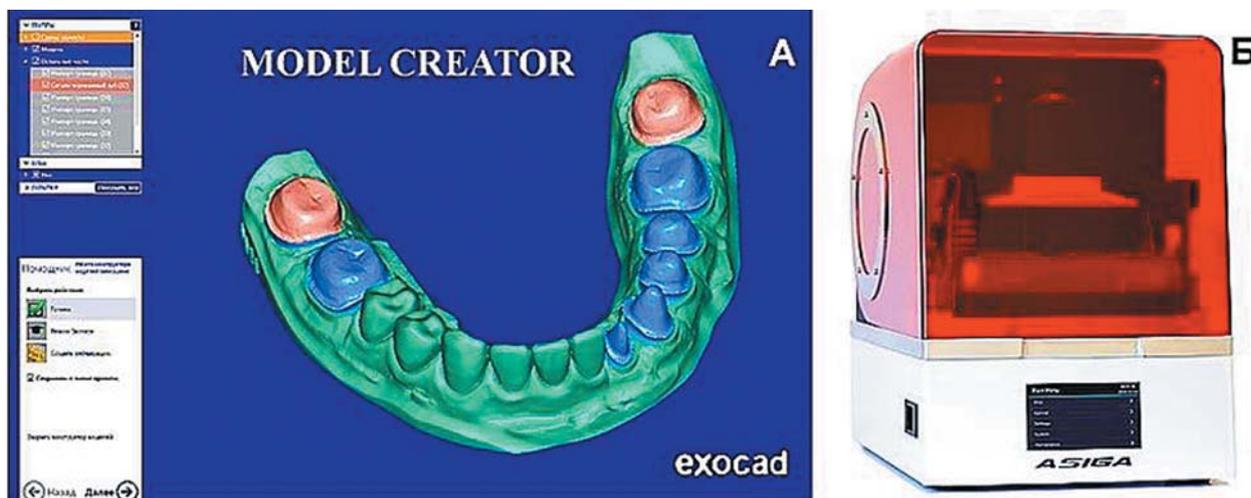


Рис. 4. А — модель нижней челюсти, изготовленная по технологии быстрого прототипирования с помощью 3D-принтера Asiga Max UV; Б — модель нижней челюсти, изготовленная из высокопрочного гипса Fujirock (GC, Япония) по одноэтапному двухслойному А-силиконовому оттиску.
Fig. 4. А — model of the lower jaw developed by a rapid prototyping technology using Asiga Max UV 3D printer; Б — model of the lower jaw made of high-strength Fujirock plaster (GC, Japan) on a single-stage double-layer A-silicone impression.

с фрагментами цифровых изображений моделей, созданных с помощью 3D-принтера Asiga Max UV по технологии SLA. В ходе проведения эксперимента было проведено 90 совмещений цифровых изображений.

Совмещение цифровых изображений в компьютерной программе MeshLab осуществляется автоматически. После наложения двух цифровых изображений программа рассчитывает «медиану расстояний» между цифровыми объектами (рис. 5 Б).

Алгоритм сравнения в компьютерной программе MeshLab состоит в следующем. Случайным

образом выбирается достаточно большое число точек на двух цифровых изображениях, равное числу вершин в одной из моделей. Для каждой точки одного цифрового изображения перебираются точки другого виртуального изображения для определения ближайшей. Расстояние между этими двумя точками запоминается. Среди всех запомненных расстояний в программе MeshLab автоматически рассчитывается медиана расстояний между двумя цифровыми изображениями [7–9]. В приложении к нашему исследованию размерная точность моделей тем больше, чем меньше значение медианы расстояний между цифровыми изображениями после их совмещения.

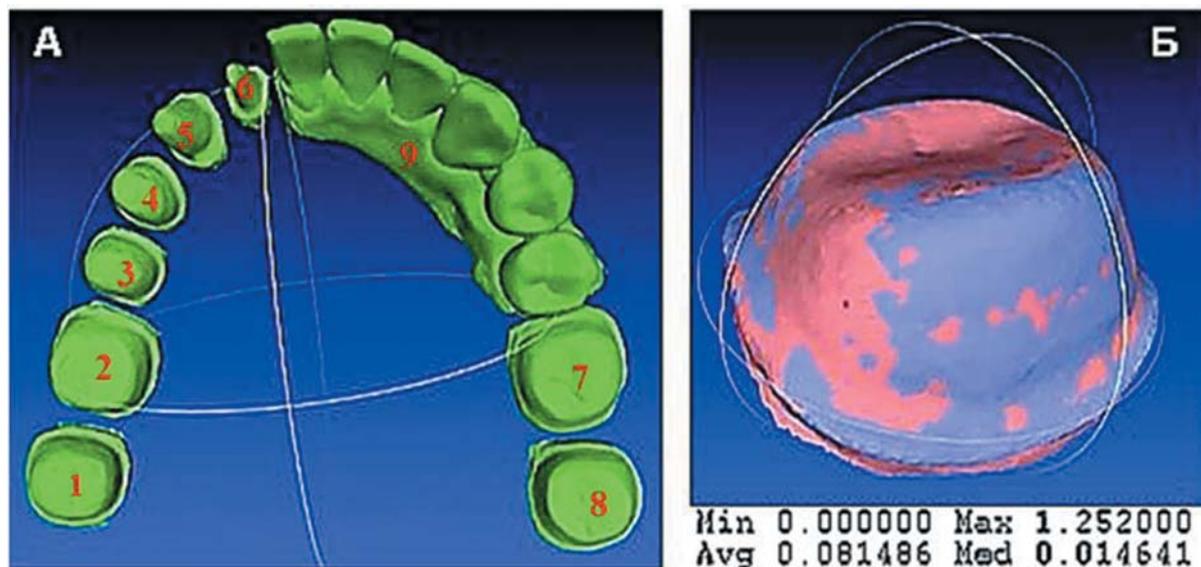


Рис. 5. А — фрагменты цифрового изображения зубов экспериментальной модели; Б — скриншот рабочего окна программы MeshLab с совмещенными цифровыми изображениями и значением медианы расстояний между ними (Med 0,014641 мм).

Fig. 5. A — fragments of the digital image of the teeth of the experimental model; Б — screenshot of the working window of the MeshLab program with combined digital images and the value of the median distance between them (Med 0.014641 mm).

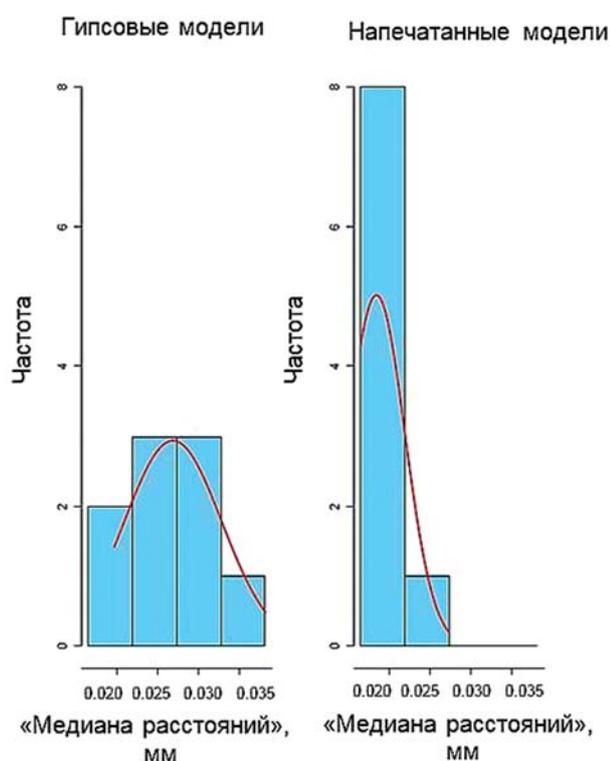


Рис. 6. Гистограммы распределения значений медианы расстояний между цифровыми изображениями моделей челюстей, полученных разными методами.

Fig. 6. Histograms of distribution of median distance values between digital images of jaw models obtained by different methods.

Результаты и обсуждение

Результаты по измерению медианы расстояний между цифровыми изображениями моделей челюстей, полученных разными методами, представлены в таблицах 1 и 2.

Значения медианы расстояний для каждого фрагмента, усредненные по пяти моделям, использовались для сравнения групп фрагментов напечатанных и гипсовых моделей. Визуальный анализ с помощью гистограмм (рис. 6) и описательные статистики (табл. 3) позволяют качественно оценить характеристики распределения средних значений медианы расстояний. Можно сделать вывод о том, что распределения значений признака «медианы расстояний» отличаются от нормального (наблюдается ярко выраженная асимметрия). Кроме того, группы для напечатанных и гипсовых моделей не являются независимыми, т.к. все модели воспроизводят одну и ту же экспериментальную модель. Анализ полученных данных, представленных в таблицах 1 и 2, проводился в программной среде R, предназначенной для статистической обработки данных и работы с графикой.

Было выявлено, что модели челюстей, созданные из фотополимерного материала Freeprint model UV (DETAX, Германия) с помощью 3D-принтера Asiga Max UV (Австралия) на основе цифровых оттисков, полученных внутриворотным сканером iTero Cadent (США), облада-

Таблица 1. Результаты измерения медианы расстояний между виртуальными изображениями экспериментальной модели и моделями, созданными с помощью 3D-принтера Asiga Max UV, мм
Table 1. Results of measuring the median distance between virtual images of the experimental model and models created using an Asiga Max UV 3D printer, mm

n	Номер напечатанной модели					Среднее значение медианы расстояний
	1	2	3	4	5	
1	0.013649	0.018127	0.016811	0.018532	0.01676	0.0167758
2	0.014305	0.016487	0.018791	0.016426	0.019272	0.0170562
3	0.020327	0.014889	0.020126	0.018852	0.013786	0.017596
4	0.017403	0.011637	0.019531	0.022274	0.013229	0.0168148
5	0.014141	0.014412	0.022568	0.014175	0.017399	0.016539
6	0.01593	0.024261	0.018528	0.021744	0.020233	0.0201392
7	0.015926	0.016167	0.013786	0.017731	0.020844	0.0168908
8	0.017208	0.016617	0.016087	0.023634	0.012405	0.0171902
9	0.023254	0.032948	0.032696	0.022578	0.025049	0.027305

Примечание: n — порядковый номер фрагментов цифровых изображений.
Note: n — order number of digital image fragments.

Таблица 2. Результаты измерения медианы расстояний между виртуальными изображениями экспериментальной модели и гипсовыми моделями, мм
Table 2. Results of measuring the median distance between virtual images of the experimental model and the plaster models, mm

n	Номер гипсовой модели					Среднее значение медианы расстояний
	1	2	3	4	5	
1	0.02536	0.015442	0.01796	0.019257	0.029457	0.0214952
2	0.03208	0.019119	0.022953	0.022681	0.027899	0.0249464
3	0.023914	0.018288	0.016785	0.020103	0.019478	0.0197136
4	0.021004	0.023605	0.019619	0.024498	0.030758	0.0238968
5	0.022194	0.016525	0.017841	0.020432	0.034576	0.0223136
6	0.030762	0.031473	0.027546	0.02747	0.030365	0.0295232
7	0.034348	0.018232	0.01973	0.03685	0.046391	0.0311102
8	0.036109	0.01947	0.025215	0.029003	0.044682	0.0308958
9	0.026791	0.02874	0.029465	0.043238	0.062656	0.038178

Примечание: n — порядковый номер фрагментов цифровых изображений.
Note: n — order number of digital image fragments.

Таблица 3. Описательные статистики распределения значений медианы расстояний между цифровыми изображениями моделей челюстей, полученных разными методами
Table 3. Descriptive statistics of the distribution of median distance values between digital images of jaw models obtained by different methods

Метод изготовления моделей челюстей	n	Среднее ± стандартное отклонение	Медиана	Минимум	Максимум	25-й процентиль	75-й процентиль	Стандартная ошибка среднего
Гипсовые модели	9	0.0269 ± 0.005942	0.02495	0.01971	0.03818	0.02231	0.0309	0.001981
Модели, полученные по технологии SLA	9	0.01848 ± 0.003483	0.01706	0.01654	0.0273	0.01681	0.0176	0.001161

Примечание: n — количество фрагментов цифровых изображений.
Note: n — order number of digital image fragments.

ют большей размерной точностью в сравнении с гипсовыми моделями челюстей, полученными по одноэтапным двухслойным А-силиконовым оттискам, на 31,6% с уровнем значимости $p < 0,05$ (V-критерий Уилкоксона = 45, $p = 0,004$).

В этом плане представляют интерес исследования иностранных авторов, занимающихся изучением данной проблемы. В частности, G.V. Brown и соавт. [10] в своем исследовании по сравнительной оценке точности метода

цифровой светодиодной проекции (DLP) и технологии PolyJet пришли к выводу, что полученные с помощью этих двух методов 3D-печати модели челюстей обладают высокой размерной точностью и в клинической практике могут служить заменой гипсовым моделям челюстей. S.J. Jin и соавт. [11] в своем исследовании не выявили статистически значимой разницы в размерной точности гипсовых моделей челюстей и моделей, полученных методом стереолитографии, но пришли к выводу, что модели, изготовленные из фотополимерных материалов с помощью 3D-принтера, могут быть рекомендованы для клинического использования.

Заключение

В результате проведенного эксперимента мы пришли к выводу, что модели челюстей, созданные с помощью 3D-принтера Asiga Max UV, обладают более высокой размерной точностью по сравнению с гипсовыми моделями.

Источник финансирования

Авторы заявляют об отсутствии спонсорской поддержки при проведении исследования.

Funding

The authors declare that no funding was received during the research.

Список литературы

1. Шустова В.А., Шустов М.А. *Применение 3D-технологий в ортопедической стоматологии*. СПб.: СпецЛит; 2016. 159 с.
2. Карякин Н.Н., Горбатов Р.О. *3D-печать в медицине*. М.: ГЭОТАР-Медиа; 2019. 240 с.
3. Вокулова Ю.А., Жулев Е.Н. Оценка точности получения оттисков зубных рядов с применением технологии лазерного сканирования. *Современные проблемы науки и образования*. 2016; 5: 164.
4. Жулев Е.Н., Вокулова Ю.А. Изучение размерной точности цифровых оттисков, полученных с помощью внутриротового сканера ITERO. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2016; 12-2: 257–261.
5. Жулев Е.Н., Вокулова Ю.А. Сравнительная оценка размерной точности оттисков в эксперименте. *Dental Forum*. 2017; 1: 38–42.
6. Ряховский, А.Н. *Цифровая стоматология*. М.: ООО «Авантис»; 2010. 282 с.
7. Aspert N., Santa-Cruz D., Ebrahimi T. MESH: Measuring Errors between Surfaces using the Hausdorff Distance. *Proc. IEEE ICME*. 2002; 1: 705–708. DOI: 10.1109/icme.2002.1035879
8. Oniga E., Chirila C. Hausdorff Distance for the Differences Calculation Between 3D Surfaces. *Journal of Geodesy and Cadastre RevCAD*. 2013; 15:193–202.
9. Михайлов И.А. Распознавание изображений с помощью метода радиальных окрестностей. *Компьютерная оптика*. 2010. 34(3): 399–407.
10. Brown G.B., Currier G.F., Kadioglu O., Kierlb J.P. Accuracy of 3-dimensional printed dental models reconstructed from digital intraoral impressions. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* 2018; 154(5): 733–739. DOI: 10.1016/j.ajodo.2018.06.009
11. Jin S.J., Kim D.Y., Kim J.H., Kim W.C. Accuracy of dental replica models using photopolymer materials in additive manufacturing: in vitro three-dimensional evaluation. *J. Prosthodont*. 2019; 28(2): 557–562. DOI: 10.1111/jopr.12928

References

1. Shustova V.A., Shustov M.A. *Application of 3D-technologies in orthopedic dentistry*. Satnt Peterburg: SpetsLit; 2016. 159 p. (In Russ.).
2. Karyakin N.N., Gorbato R.O. *3D printing in medicine*. Moscow: GEOTAR-Media; 2019. 240 p. (In Russ.).
3. Zhulev E.N., Vokulova Y.A. Evaluation of the accuracy of obtaining impressions of the dentition with the use of technology of laser scanning. *Sovremennye Problemy Nauki i Obrazovaniya*. 2016; 5: 164 (In Russ., English abstract).
4. Zhulev E.N., Vokulova Y. A. Evaluation of dimensional accuracy digital impressions obtained using the intraoral scanner ITERO. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamental'nykh Issledovaniy*. 2016; 12-2: 257–261 (In Russ., English abstract).
5. Zhulev E.N., Vokulova Y.A. Comparative evaluation of impressions' dimensional accuracy in the experiment. *Dental Forum*. 2017; 1: 38–42 (In Russ., English abstract).
6. Ryakhovskiy A.N. *Digital Dentistry*. Moscow: Avantis; 2010. 282 p. (In Russ.).
7. Aspert N., Santa-Cruz D., Ebrahimi T. MESH: Measuring Errors between Surfaces using the Hausdorff Distance. *Proc. IEEE ICME*. 2002; 705–708. DOI: 10.1109/icme.2002.1035879
8. Oniga E., Chirila C. Hausdorff Distance for the Differences Calculation Between 3D Surfaces. *Journal of Geodesy and Cadastre RevCAD*. 2013; 15:193–202.
9. Mikhaylov I.A. Image recognition using a radial neighborhood method. *Komp'yuternaya Optika*. 2010. 34(3): 399–407 (In Russ., English abstract).

10. Brown G.B., Currier G.F., Kadioglu O., Kierlb J.P. Accuracy of 3-dimensional printed dental models reconstructed from digital intraoral impressions. *Am. J. Orthod. Dentofacial. Orthop.* 2018; 154(5): 733–739. DOI: 10.1016/j.ajodo.2018.06.009
11. Jin S.J., Kim D.Y., Kim J.H., Kim W.C. Accuracy of dental replica models using photopolymer materials in additive manufacturing: in vitro three-dimensional evaluation. *J. Prosthodont.* 2019; 28(2): 557–562. DOI: 10.1111/jopr.12928

Вклад авторов

Жулев Е.Н.

Разработка концепции — формирование идеи; формулировка и развитие ключевых целей и задач.

Проведение исследования — анализ и интерпретация полученных данных.

Подготовка и редактирование текста — составление черновика рукописи, его критический пересмотр с внесением ценного интеллектуального содержания.

Утверждение окончательного варианта статьи — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Разработка методологии — создание моделей.

Вокулова Ю.А.

Разработка концепции — развитие ключевых целей и задач.

Проведение исследования — проведение исследований, сбор данных.

Подготовка и редактирование текста — критический пересмотр черновика рукописи с внесением ценного интеллектуального содержания.

Утверждение окончательного варианта статьи — принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

Разработка методологии — создание моделей.

Проведение статистического анализа — применение статистических, математических, вычислительных методов для анализа и синтеза данных исследования.

Author contribution

Zhulev E.N.

Conceptualisation — concept formation; formulation and development of key goals and objectives.

Conducting research — data analysis and interpretation.

Text preparation and editing — compilation of a draft manuscript; its critical review with the introduction of valuable intellectual content.

The approval of the final version of the article — the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Methodology development — creation of models.

Vokulova Yu.A.

Conceptualisation — development of key goals and objectives.

Conducting research — conducting research, data collection.

Text preparation and editing — critical review of a draft manuscript with the introduction of valuable intellectual content.

The approval of the final version of the article — the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

Methodology development — creation of models.

Statistical processing — the application of statistical, mathematical and calculation methods for the analysis and synthesis of the research data.

Сведения об авторах / Information about the authors

Жулев Евгений Николаевич — доктор медицинских наук, профессор кафедры ортопедической стоматологии и ортодонтии федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Приволжский исследовательский медицинский университет» Министерства здравоохранения Российской Федерации.

ORCID iD 0000-0001-9539-3350

Вокулова Юлия Андреевна* — кандидат медицинских наук, заведующий стоматологическим отделением, врач стоматолог-ортопед федерального государственного казенного учреждения «Поликлиника № 2 Федеральной таможенной службы России».

ORCID iD 0000-0001-5220-2032

Контактная информация: e-mail: vokulova@rambler.ru; тел.: +7 (930) 802-01-90;

ул. Артельная, д. 2, г. Нижний Новгород, 603098, Россия

Evgeny N. Zhulev — Dr. Sci. (Med.), Prof., Department of Orthopaedic Dentistry and Orthodontics, Privolzhsky Research Medical University.

ORCID iD 0000-0001-9539-3350

Yuliya A. Vokulova* — Cand. Sci. (Med.), Departmental Head, Dentistry Department, Orthopaedic dentist, Polyclinic No. 2 of the Federal Customs Service of Russia.

ORCID iD 0000-0001-5220-2032

Contact information: e-mail: vokulova@rambler.ru; tel.: +7 (930) 802-01-90;

Artelnaya str., 2, Nizhny Novgorod, 603098, Russia

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author