

ЕСТЕСТВЕННО-НАУЧНЫЕ МЕТОДЫ В ИЗУЧЕНИИ
ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

УДК 531.7, 572.08

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ МОРФОМЕТРИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ
ТРЕХМЕРНЫХ ДАННЫХ В ПАЛЕОАНТРОПОЛОГИЧЕСКИХ
ИССЛЕДОВАНИЯХ

© 2021 г. В. А. Князь^{1,2,*}, А. В. Габучян³

¹ Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

² Государственный научно-исследовательский институт авиационных систем, Москва, Россия

³ Университет дружбы народов, Москва, Россия

*E-mail: knyaz@gosniias.ru

Поступила в редакцию 05.11.2020 г.

После доработки 08.12.2020 г.

Принята к публикации 10.12.2020 г.

Современные методы бесконтактных измерений обладают большим потенциалом для палеоантропологических исследований как с точки зрения расширения возможностей морфометрического анализа, так и с точки зрения повышения доступности уникальных палеоантропологических материалов для широкого круга исследователей. Представлены технологии получения и методы анализа трехмерных данных, разработанные для цифровых палеоантропологических исследований. Обсуждаются новые формы документирования палеоантропологических материалов, основанные на новых типах данных, а также преимущества использования новых данных.

DOI: 10.1134/S1992722321050095

ВВЕДЕНИЕ

Важную часть информации, необходимую для палеоантропологического исследования, ученые получают из геометрических измерений черепов, скелетных костей, зубов. Измерения и последующий анализ линейных, угловых параметров, анализ формы позволяют делать важные выводы о палеоантропологических характеристиках объекта. Традиционно для морфометрического анализа используют набор стандартных антропологических точек и измерений, которые отражают анатомические особенности объекта исследования.

Для геометрических измерений применяют специальные механические инструменты, позволяющие проводить необходимые измерения в соответствии со стандартизованными методами. Ручные измерения все еще широко применяют в практике палеоантропологических исследований. Основными инструментами антрополога являются точные механические инструменты, такие как линейка и различные типы суппортов. Исследователь может использовать и более сложные механические инструменты, например скользящий суппорт (тип Мартина), скользящий суппорт (тип Айхеля), раздвижной суппорт, краунофор Моллисона и мандибулометр.

В некоторых случаях, например при измерении зубов (одонтометрии), ориентиры измерений недостижимы из-за невозможности получить доступ к требуемой точке суппортом или из-за хрупкости объекта. Таким образом, практика ручного измерения существенно ограничивает возможность сбора статистически достоверных данных и обмена ими для широкого и всестороннего исследования.

Одонтологические исследования играют значительную роль в комплексном исследовании палеоантропологических материалов. Важность данных исследований обусловлена тем, что зубы обладают целым спектром хорошо изученных морфологических признаков, позволяющих интерпретировать находки в эволюционном, таксономическом или историческом аспектах. Помимо того, зубы обладают хорошей сохранностью, так как являются наиболее высокоминерализованными образованиями в человеческом организме. По этой причине одонтологический материал нередко составляет основу генетических исследований, надолго «консервируя» последовательности цепочек нуклеотидов. Наряду с генетическими исследованиями проводится датирование находок (например, радиометрическим методом).

Для изучения морфологии зубов преимущественно применяют экспертные визуальные

оценки, основанные на наличии тех или иных признаков и степени их выраженности. Такие признаки разнообразны и соответствуют морфологической вариабельности зубов, проявляющейся, в том числе, в очень тонких нюансах, выявляемых опытными экспертами, обладающими соответствующей подготовкой. Также в одонтологии применяют измерительные методы, которые в традиционно сформировавшихся стандартах проводятся ручными инструментами [1, 2]. Однако полученные в ходе отдельных измерений данные не могут служить для описания морфологии, а позволяют лишь получить оценки отдельных параметров зубов.

Устоявшееся состояние заметно меняют технологии, позволяющие получать высокоточные 3D-модели зубов и проводить на их основе морфологический анализ. Перемены затрагивают не только общие аспекты, относящиеся к удобству обмена информацией, повышению качества взаимодействия между специалистами, облегчению накопления данных, их документирования, систематизации и т.д. Принципиально важно разрабатывать новые методы изучения зубов: в частности, в работе представлена методика автоматизированной цифровой одонтометрии. Применение разных методов съемки (оптической и рентгеновской) позволяет достичь разноплановости проводимых исследований.

Применение цифровых методов визуализации для палеоантропологических исследований началось практически одновременно с появлением первых систем визуализации [3]. Впечатляющий прогресс и увеличение доступности цифровых систем получения и обработки данных о палеоантропологических материалах создают предпосылки для развития новых методов исследований. Возможность изучения 3D-модели, а не самого объекта, создает условия для сохранения высокоценного материала. Другими заметными преимуществами таких методов являются повторяемость исследований и возможность использования различных методов анализа данных. Подробный обзор применения компьютерной томографии (КТ) в палеоантропологии представлен в [4].

В настоящее время одонтометрия является неотъемлемой частью исследований в различных дисциплинах: физической антропологии современного человека и палеоантропологии, ортопедической стоматологии и ортодонтии; она применяется также в судебных и криминалистических экспертизах [5–10]. Измерения можно проводить непосредственно на зубах в полости рта у исследуемых [11], на гипсовых моделях, полученных по оттискам с зубных рядов исследуемых [12] или, например, на рентгенограммах [13, 14]. Однако все чаще объектами исследований становятся 3D-реконструкции зубов и зубных ря-

дов. На них стали применять методики, принятые для измерений на реальных зубных рядах, уже занявшие устойчивые позиции в диагностике, проводимой в ортодонтии [15–17]. Позже стали проводить исследования, сочетающие разные методики, позволяя тем самым расширять исследовательские возможности [18]. В антропологии и палеоантропологии данная тенденция особенно ярко себя проявила в сочетании цифровых методик с геометрической морфометрией и компьютерной микротомографией [19–21]. Так, ранее измерения толщины эмали проводили с использованием рентгенограмм или распилов зубов [22, 23], сейчас активно развиваются методики, основанные на сочетании геометрических измерений и томографических реконструкций высокого разрешения [24–28]. Отметим, что проводятся более комплексные исследования, сочетающие перечисленные выше подходы [29, 30]. В данной работе показано, что сочетание метода автоматизированной цифровой одонтометрии и цифровых 3D-методов позволяет существенно расширить спектр получаемых данных, а также придать морфологическую ориентированность одонтометрическим исследованиям.

В настоящий момент существует множество методов получения 3D-реконструкций, среди которых оптическая съемка [31, 32] и стереофотограмметрия, позволяющие проводить краниологические и одонтологические исследования [33–36]. Ряд задач в одонтологических исследованиях решают с использованием стоматологических интраоральных сканеров [37, 38]. Рентгенологические методы широко представлены КТ [39, 40], конусно-лучевой КТ [41, 42], а также компьютерной микротомографией [43–47]. Интерес представляют одонтологические исследования с применением муаровой съемки [48], а также реконструкции, полученные при помощи пьезоэлектрического дигитайзера [49]. Особого внимания заслуживают 3D-реконструкции, выполненные по томографическим срезам, полученным посредством нейтронного сканирования одонтологического материала [50].

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальная часть проведенных одонтометрических исследований основана на представительной выборке компьютерных 3D-моделей зубов, полученной при помощи различных средств бесконтактных 3D-измерений. 3D-модели поверхности объекта получали как с использованием лабораторного стоматологического оборудования Evolution plus (Zfx, США) и S600 Arti Scanner (ZirkonZahn, Германия), так и на оригинальной фотограмметрической установке, разработанной для одонтометрического анализа [51, 52]. Оптическое сканирование уникальных нахо-

док, требующих особо бережного обращения, выполняли интраоральными стоматологическими сканерами с конфокальной оптикой и специальным подсветом Trios (3Shape, Дания), CEREC Omnicam (Sirona, Германия).

Рентгеновские методы сканирования проводили на конусно-лучевой томографической аппаратуре PaX-i 3D (Vatech, Южная Корея) и рентгеновских микротомографах Skyscan 1174 (Bruker, Германия) и phoenix v|tome|x m (General Electric, США). На конусно-лучевом томографе реконструкцию проводили с размером вокселя $0.08 \times 0.08 \times 0.08$ мм при области съемки 50×50 мм с предельными для аппарата, вручную установленными значениями напряжения и силы тока в трубке. Наивысшее разрешение при увеличенной области съемки 100×850 мм позволило получить реконструкции с размером вокселя $0.2 \times 0.2 \times 0.2$ мм. Работа рентгеновского микротомографа осуществлялась при подаваемом напряжении 275 кВ, позволяющем провести реконструкцию поверхности зубов с размером вокселя 43 мкм в каждом из трех измерений при съемке черепа и 10.33 мкм при съемке отдельных зубов.

Первичную обработку данных измерений для получения 3D-модели зуба выполняли в программном обеспечении (ПО), входящем в состав систем сканирования. При помощи данного ПО проводили удаление артефактов, настройку оптимального оттенка серого, тотальное и локальное сглаживание, преобразование формата и некоторые другие процедуры. Непосредственно измерительные исследования на полученных 3D-моделях проводили разработанными оригинальными методами в реализующем их специальном ПО.

Представленная методика автоматизированной цифровой одонтометрии (АЦО) берет свое начало из клиническо-экспериментальных исследований в ортопедической стоматологии. В ее основу положена разработанная и обоснованная интерпретация морфологии зуба, которую в максимально доступном виде можно представить на вестибуло-оральном сечении зуба (рис. 1). На нем различимы два возвышения, соответствующие вестибулярным и оральным бугоркам зуба (данное разделение берет начало из нормальной анатомии человека, согласно которой сомкнутые зубные ряды делят полость рта на преддверие, или вестибулум, и ротовую, или оральную, части). Однако при описании не расположения, а функции этих бугорков, их четкое разделение становится не только затруднительным, но и попросту невозможным. Исходя из тесной взаимосвязи функции и морфологии, помимо упомянутых выше бугорков на сечениях следует различать еще одну структуру, обеспечивающую как функциональное, так и морфологическое единство зуба, — анатомическую окклюзионную поверх-

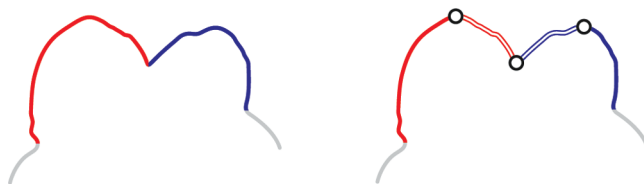


Рис. 1. Анатомические ориентиры.

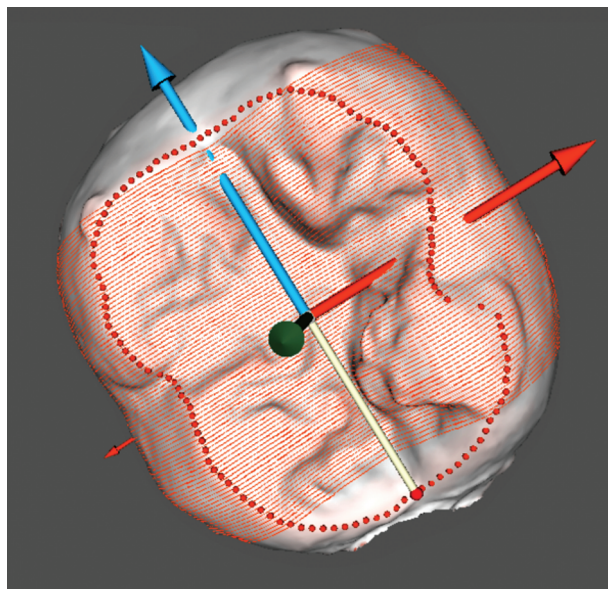


Рис. 2. Определение окклюзионной поверхности и системы координат зуба.

ность. Упомянутые бугорки и поверхность имеют границы, задаваемые анатомическими ориентирами, для нахождения которых достаточно рассмотрения геометрии полученного сечения. Они служат основой для дальнейших построений, измерений и вычислений.

Полученные параметры (более двух сотен на сегодня в каждом сечении) широко, объективно и разносторонне описывают не только сечения, но и при определенных условиях (правильной ориентации и достаточном количестве сечений, а также соблюдении интервалов при их получении) зуб в целом, его составные части: бугорки, скаты бугорков, анатомическую окклюзионную поверхность.

Нахождение ориентиров на контурах зубов и измерение их координат в ручном режиме оператором являются весьма рутинным и трудоемким процессом, который служит источником ошибок измерений, искажающих результат исследований. Поэтому для проведения множественных измерений разработаны методы и алгоритмы, позволяющие выполнять морфометрический анализ в автоматическом режиме, начиная с вы-

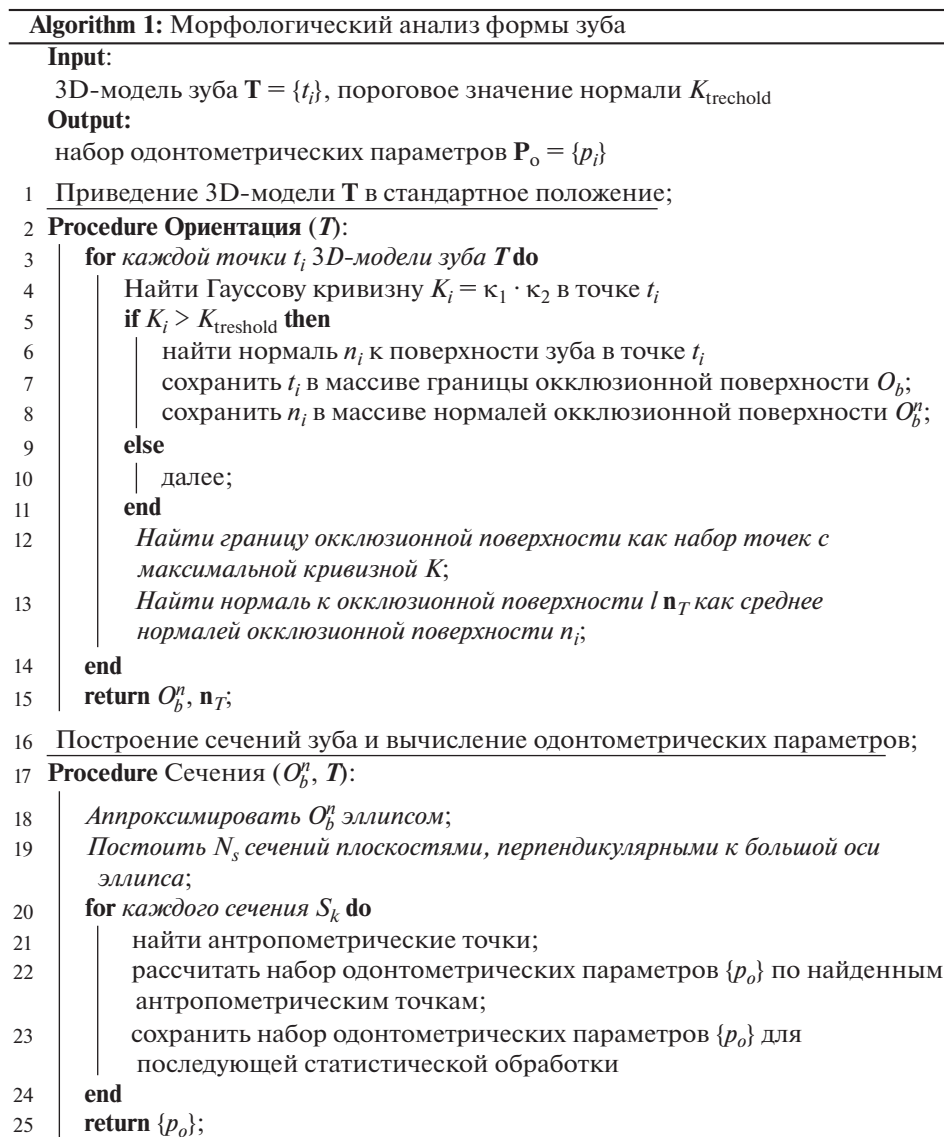


Рис. 3. Алгоритмы автоматизированного одонтометрического анализа.

полнения процедуры ориентирования модели зуба в стандартное анатомическое положение и заканчивая поиском анатомических ориентиров в сечениях и выполнением измерений заданных параметров.

Процедура измерений выполняется поэтапно и включает в себя:

- ориентирование и определение системы координат зуба (рис. 2): нахождение контура анатомической окклюзионной поверхности на основе анализа кривизны поверхности зуба; определение мезио-дистальной (переднезадней) оси зуба; определение системы координат зуба; формирование набора сечений зуба.

- морфометрический анализ зуба: нахождение анатомических ориентиров (бугорков, скатов бу-

горков); расчет набора морфометрических параметров на основе найденных анатомических ориентиров; статистический анализ результатов измерений.

Алгоритмы обработки данных 3D-модели зуба представлены на рис. 3.

Методом АЦО изучили ряд уникальных палеоантропологических образцов, среди которых верхнепалеолитическая находка из Сунгиря (индивид С2) (рис. 4), образец из Черновой (серия VIII, индивид К8 В7.2), отдельные зубы из захоронений в Фофаново (данный археологический памятник содержит захоронения, относящиеся к периоду от неолита до бронзового века), материал из захоронения 4 памятника Шенгавит, относящегося к бронзовому веку на территории Респуб-

лики Армении, а также ряд образцов, относящихся к раннему и позднему средневековью.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Разработана и обоснована одонтометрическая методика, позволяющая получать в сжатые сроки и в автоматизированном режиме широкое разнообразие объективных данных, характеризующих не только физические размеры зубов, но и позволяющих описывать их морфологические особенности. Данные получены на образцах, имеющих сложные характеристики, такие как загнуто́сть вершин бугорков моляров у индивида С2 из Сунги́ря, описанной как архаичный признак в [1]. Проведено одонтометрическое сравнение упомянутых моляров друг с другом (правого и левого), а также с образцами, обладающими меньшей выраженностью или полным отсутствием данного признака. В результате проведенного анализа выявлен комплекс параметров, очевидно отражающих визуально определяемые различия [53].

В полученных измерительных данных можно выделить ряд групп. Так, линейные параметры на сунгирских молярах в вестибуло-оральном направлении в целом схожи, за исключением относительно массивных оральных бугорков на правом моляре (зубе 1.7 в соответствии с нумерацией зубов, принятой в стоматологии) размером 6.57 мм (оральные бугорки имеют на зубе сильный наклон). Более детальное рассмотрение результатов на уровне не только бугорков, но и их скатов подтвердило наблюдение, связанное с различием правого и левого моляров по стороне, где больше загнуты вершины бугорков. Так, правый зуб 1.7 отличается массивностью оральных (3.95 мм) и узостью вестибулярных (2.62 мм) скатов на оральных бугорках по сравнению с левым зубом 2.7 (3.39 и 2.75 мм соответственно). В свою очередь, на вестибулярных бугорках рассматриваемых зубов наблюдается обратная ситуация. Вестибулярные бугорки на зубе 2.7 более массивны и имеют более высокие показатели на внешних вестибулярных скатах. Это находится в соответствии с большей загнуто́стью именно вестибулярных бугорков на данном зубе по сравнению со своим антимером. Внутренние скаты бугорков сунгирских моляров имеют некоторую тенденцию к укорочению на бугорках, которые загнуты сильнее (2.62 мм на зубе 1.7 и 3.04 мм на зубе 2.7).

По сравнению с двумя сунгирскими молярами верхний зуб мудрости из Черновой отличается меньшими размерами за исключением линейного параметра, характеризующего вестибуло-оральный размер анатомической окклюзионной поверхности, который составляет 6.11 мм. Это полностью коррелирует с небольшой загнуто́стью его бугорков и мало заглубленной окклюзионной поверхностью (как следствие, бугорки кажутся

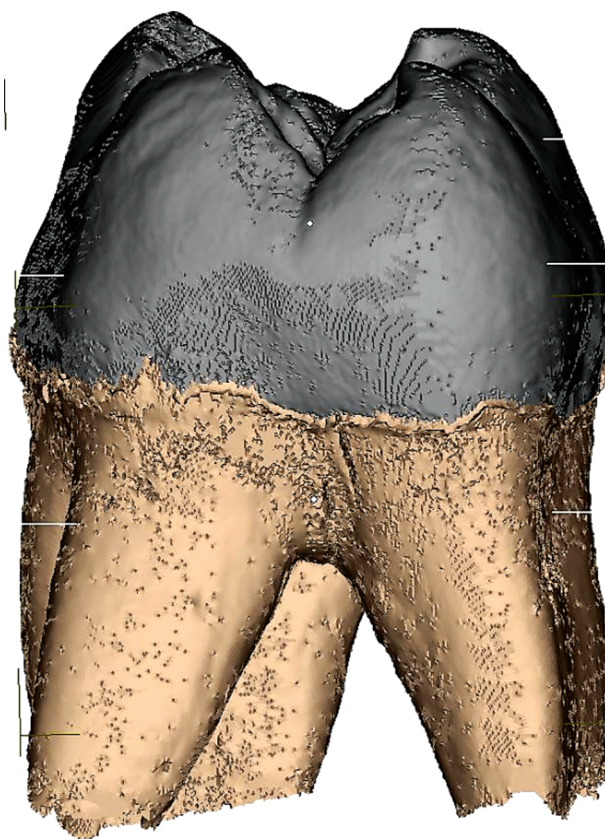


Рис. 4. Трехмерная модель верхнепалеолитической находки из Сунги́ря (индивид С2).

невысокими). Все изученные верхние моляры, имеющие то или иное расположение и выраженность изучаемого морфологического признака (внутреннего изгиба вершин бугорков), обладают большими линейными параметрами в вестибуло-оральном направлении по сравнению с нижним моляром из Фофаново, за исключением размеров его вестибулярного бугорка (5.65 мм), что преимущественно связано с удлиненным наружным скатом (длина контура составляет 5.32 мм). Данное наблюдение характеризует некоторую стертость нижнего зуба по сравнению с верхними. Отметим, что в связи с характером взаимоотношений между верхними и нижними зубами в ортогнатии корректными являются сравнения верхних оральных и нижних вестибулярных бугорков или верхних вестибулярных – с нижними оральными.

Параметры, характеризующие контуры, находятся в соответствии с линейными горизонтальными параметрами. Так, длина контура зуба из Черновой составляет 17.02 мм и уступает верхним молярам из Сунги́ря, причем последние имеют достаточно близкие показатели (правый зуб 1.7–22.70 мм, левый 2.7–21.67 мм). Значительное превосходство правого сунгирского 1.7 по показате-

Таблица 1. Одонтометрические параметры. Абсолютные значения

Зуб	1.7 С2	2.7 С2	2.8 Ч	3.6 Ф
Линейные горизонтальные параметры, мм				
зуб	12.71	12.34	10.59	9.89
оральный бугорок (ОБ)	6.57	6.14	5.19	4.24
оральный скат ОБ	3.95	3.39	2.08	1.24
вестибулярный скат ОБ	2.62	2.75	3.11	3.00
вестибулярный бугорок (ВБ)	6.14	6.20	5.40	5.65
оральный скат ВБ	3.33	3.04	3.00	2.79
вестибулярный скат ВБ	2.80	3.16	2.40	2.86
анатомическая окклюзионная поверхность	5.95	5.79	6.11	5.79
Линейные вертикальные параметры, мм				
анатомическая окклюзионная поверхность	2.25	2.13	1.66	1.14
Длина контуров, мм				
зуб	22.70	21.67	17.02	14.92
ОБ	11.51	10.12	8.45	6.42
оральный скат ОБ	7.83	6.47	4.76	3.04
вестибулярный скат ОБ	3.69	3.65	3.69	3.38
ВБ	11.19	11.54	8.57	8.51
оральный скат ВБ	4.30	4.05	3.83	3.19
вестибулярный скат ВБ	6.89	7.49	4.75	5.32
анатомическая окклюзионная поверхность	7.99	7.71	7.52	6.57
Угловые параметры, град				
зуб	82.8	86.2	90.4	95.6
ОБ	33.0	34.2	28.2	27.6
оральный скат ОБ	49.8	52.0	62.1	68.0
вестибулярный скат ОБ	82.2	81.6	97.9	103.9
ВБ	56.2	54.8	59.9	66.7
оральный скат ВБ	26.0	26.8	38.0	37.2
вестибулярный скат ВБ	106.0	106.8	122.1	134.7

лю длины контура орального бугорка (11.51 мм) служит дополнительным свидетельством выраженности его оральных бугорков и сильной загнутой их вершин. Более того, его наружные оральные скаты обладают заметно большей длиной контуров по сравнению с внутренними (7.83 мм против 3.69 мм). Схожие наблюдения относятся к вестибулярным бугоркам зуба 2.7, имеющим наибольшую длину контура среди измеренных зубов (11.54 мм) и наибольшую протяженность контура его наружного вестибулярного ската (7.49 мм), что позволяет использовать измерения длин контуров как эффективный способ изучения морфологии зуба. Интересно наблюдать и разное сочетание параметров на примере зуба из Черновой. Наряду с отмеченным выше высоким линейным вестибуло-оральным показателем его анатомической окклюзионной поверхности наблюдается небольшая длина контура этой поверхности, что полностью коррелирует с небольшим вертикальным линейным параметром (1.66 мм). Представленный обзор получен-

ных результатов является исключительно сжатым. В заключение отметим, что наименьший вертикальный линейный размер анатомической окклюзионной поверхности имеет стертый зуб (в отличие от верхних моляров) из Фофаново (1.14 мм). Таким образом, такое явление как стираемость, накладывающее свой отпечаток на морфологию зуба, также может быть описано при помощи измерений. В табл. 1 в качестве примера приведены также угловые параметры, представляющие определенный интерес, но не описанные в данной работе. Помимо того, интерес для исследователей представляет не только анализ абсолютных значений одонтометрических параметров, но и изучение их соотношений и пропорций.

Несмотря на то что предложенный измерительный метод АЦО нуждается в совершенствовании, в том числе в направлении анализа полученных данных, отметим его преимущество по сравнению с широко применяемым в одонтометрии и других дисциплинах методом геометрического морфометрического анализа. Геометриче-

ский морфометрический анализ в отличие от специализированной АЦО является универсальным методом, однако со следующими отсюда допущениями. Измерительные данные неизменно характеризуют каждый изучаемый зуб в отдельности, их можно сравнивать на зубах, включенных в группу для изучения, однако понимание формы и очертаний изучаемых образцов в геометрическом морфометрическом анализе на каждом образце попадает в зависимость от образцов, включенных в изучаемую группу. Морфометрические методики имеют сильную зависимость от ориентации изучаемых образцов, тогда как предложенная измерительная методика АЦО обладает развитыми автоматизированными измерительными алгоритмами. Последние могут сочетаться не только с одонтометрией внешней поверхности коронковой части зуба, но и измерением толщины эмали (в данной методике ориентация зуба и секущей плоскости является исключительно важным фактором, определяющим точность полученных результатов).

Разнообразие методов, примененных для получения трехмерных изображений в проведенных исследованиях, позволило накопить определенный опыт по их применению, учитывая разнотипные различия изучаемых образцов. Применительно к методу АЦО можно утверждать, что он находится в непосредственной зависимости от точности сканирования и имеет высокие требования к разрешению проводимых 3D-реконструкций [54]. В ходе проведенных работ по сканированию образцов создана постоянно пополняющаяся база данных цифровых 3D-реконструкций.

Наряду с разработкой измерительной методики и исследованиями проводили работу по сохранению и извлечению данных из 3D-реконструкций и восстановлению утраченного материала. На примере образца из погребения Шенгавит восстановлен один из утраченных зубов, его 3D-реконструкция, полученная в ходе конусно-лучевой томографии, послужила материалом для проведения генетического анализа [55]. Таким образом, подчеркивается важность и ценность документирования антропологического и палеоантропологического материала и создания баз данных по их цифровым 3D-реконструкциям.

Необходимо отметить наличие потенциала для развития автоматизации цифровых измерительных методов и их реализации в изучении смыкания зубов — окклюзиометрии, принципы которой имеют общие морфологические основы с одонтометрией [56, 57].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Автоматизированная цифровая одонтометрия показала эффективность в изучении размеров зубов и их структурных частей, а также в описании морфологии зубов, что повышает ценность применения измерительных методик в одонтологиче-

ских и антропологических исследованиях. Потенциал дальнейшего развития метода заключается в повышении объема информации, извлекаемой из измерений, совершенствовании методов обработки и анализа полученных данных, а также интеграции одонтометрии с другими измерительными методиками в антропологии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 17-29-04509).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зубов А.А.* // Homo sungirensis: Верхнепалеолитический человек: экологические и эволюционные аспекты исследования. М.: Научный мир, 2000. С. 256.
2. *Zubova A., Chikisheva T., Shunkov M.* // Archaeol. Ethnol. Anthropol. Eurasia. 2017. V. 45. № 1. P. 121. <https://doi.org/10.17746/1563-0110.2017.45.1.121-134>
3. *Hounsfield G.N.* // Brit. J. Radiol. 1973. V. 46 № 552. P. 1016. <https://doi.org/10.1259/0007-1285-46-552-1016>
4. *Uldin T.* // Forensic Sci. Res. 2017. V. 2. № 4. P. 165. <https://doi.org/10.1080/20961790.2017.1369621>
5. *Peckmann T.R., Logar C., Garrido Varas C. et al.* // Sci. Justice. 2016. V. 56. № 2. P. 84. <https://doi.org/10.1016/j.scijus.2015.10.002>
6. *Arapović-Savić M., Savić M., Umičević-Davidović M. et al.* // Srp. Ark. Celok. Lek. 2018. V. 147. № 1. P. 74. <https://doi.org/10.2298/SARH180419074A>
7. *Bailey S.E., Benazzi S., Buti L. et al.* // Am. J. Phys. Anthropol. 2016. V. 159. № 1. P. 93. <https://doi.org/10.1002/ajpa.22842>
8. *Berger L.R., Hawks J., de Ruiter D.J. et al.* // Lect. Notes. Bus. Inf. P. 2015. V. 4. P. 1. <https://doi.org/10.7554/eLife.09560.028>
9. *Bermúdez de Castro J.M., Martínón-Torres M., Martínez de Pinillos M. et al.* // Quaternary Sci. Rev. 2019. V. 217. № 1. P. 45. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.04.003>
10. *Camardella L.T., Breuning H., de Vasconcellos Vilella O.* // Dental Press J. Orthod. 2017. V. 22. № 1. P. 65. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.22.1.065-074.oar>
11. *Igbemi M.A., Oghenemavwe E.L., Ugwa O.Ch.* // Eur. J. Biomed. Pharm. Sci. 2019. V. 6. № 6. P. 9.
12. *Eboh D.E.O.* // Anat. Cell Biol. 2019. V. 52. № 3. P. 1. <https://doi.org/10.5115/acb.18.221>
13. *Kapila R., Nagesh K.S., Iyengar A. et al.* // J. Dent. Res. Dent. Clin. Dent. Prospect. 2011. V. 5. № 2. P. 51. <https://doi.org/10.5681/joddd.2011.011>
14. *Nadendla L.K., Paramkusam G., Pokala A. et al.* // Indian J. Dent. Res. 2016. V. 27. № 9. P. 27. <https://doi.org/10.4103/0970-9290.179810>
15. *Naidu D., Freer T.J.* // Aust. Orthod. J. 2013. V. 29. № 2. P. 159.
16. *Naidu D., Freer T.J.* // Aust. Orthod. J. 2013. V. 29. № 2. P. 164.
17. *El-Zanaty H.M., El-Beialy A., El-Ezz A. et al.* // Am. J. Orthod. Dentofac. 2008. V. 137. № 2. P. 259. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2008.04.030>
18. *Talaat S., Kaboudan A., Breuning H. et al.* // Am. J. Orthod. Dentofac. 2015. V. 147. № 2. P. 264. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2014.07.027>

19. *Benazzi S., Bailey S.E., Mallegni F.* // Am. J. Phys. Anthropol. 2013. V. 152. № 2. P. 300.
<https://doi.org/10.1002/ajpa.22355>
20. *Weber G.W., Fornai C., Gopher A. et al.* // Quatern. Int. 2016. V. 398. P. 159.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.10.027>
21. *Hublin J.J., Ben-Ncer A., Bailey S.E. et al.* // Nature. 2017. V. 546. P. 289.
<https://doi.org/10.1038/nature22336>
22. *Martin L.B.* The relationships of the later Miocene Hominoida. PhD Thesis, London: University College London, 1983. 450 p.
23. *Schwartz G., Dean M.* // Am. J. Phys. Anthropol. 2005. V. 128. P. 312.
<https://doi.org/10.1002/ajpa.20211>
24. *Garcia C., Martínón-Torres M., Martín-Francés L. et al.* // C. R. Palevol. 2018. V. 18. № 1. P. 72.
<https://doi.org/10.1016/j.crpv.2018.06.004>
25. *Buti L., La Cabec A., Panetta D. et al.* // J. Hum. Evol. 2017. V. 113. P. 162.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.08.009>
26. *Guy F., Lazzari V., Gilissen E. et al.* // PLoS One. 2015. V. 10. № 9. P. e0138802.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138802>
27. *Margherita C., Oxilia G., Barbi V. et al.* // J. Hum. Evol. 2017. V. 113. P. 83.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2017.07.011>
28. *Westaway K.E., Louys J., Due Awe R. et al.* // Nature. 2017. V. 548. P. 322.
<https://doi.org/10.1038/nature23452>
29. *Olejniczak A.J., Gilbert Ch.C., Martin L.B. et al.* // J. Hum. Evol. 2007. V. 53. P. 292.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2007.04.006>
30. *Smith T.M., Olejniczak A.J., Zermeno J.P. et al.* // J. Hum. Evol. 2012. V. 62. P. 395.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2011.12.004>
31. *Dykes S.J., Pilbrow V.C.* // PeerJ. 2019. V. 7. P. e6990.
<https://doi.org/10.7717/peerj.6990>
32. *Gomez-Robles A., Smaers J.B., Holloway R.L. et al.* // P. Natl. Acad. Sci. USA. 2017. V. 114. № 3.
<https://doi.org/10.1073/pnas.1608798114>
33. *Gaboutchian A.V., Knyaz V.A., Novikov M.M. et al.* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2020. V. XLIII-B2-2020. P. 851.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-851-2020>
34. *Bertsatos A., Athanasopoulou K., Chovalopoulou M.E.* // Egypt. J. Forensic Sci. 2019. V. 9. № 25. P. 9.
<https://doi.org/10.1186/s41935-019-0133-7>
35. *Irish J.D., Scott G.R.* A companion to dental anthropology. Malden, MA: Wiley Blackwell, 2016. 540 p.
36. *Morch L.-O., Luengo J.* // Crón. IX Jornadas JIA. 2016.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34367.51368>
37. *Zhang F., Suh K.-J., Lee K.-M.* // PLoS One. 2016. V. 11. № 7. P. e0157713.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0157713>
38. *Габучян А.В., Лейбова Н.А., Васильев С.В. и др.* // Тез. докл. Междунар. науч. конф., посвященной памяти академиков В.П. Алексеева и Т.И. Алексеевой – VIII Алексеевские чтения. М.: НИИ и Музей антропологии МГУ, 2019. С. 43.
39. *Zaim Y., Ciochon R., Polanski J. et al.* // J. Hum. Evol. 2011. V. 61. P. 363.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2011.04.009>
40. *Toneva D., Nikolova S., Georgiev I.* // Acta Morphol. Anthropol. 2017. V. 24. P. 55.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-49544-6_18
41. *Ferreira J.B., Christovam I.O., Alencar D.S. et al.* // Dentomaxillofac. Rad. 2017. V. 46. № 7. P. 20160455.
<https://doi.org/10.1259/dmfr.20160455>
42. *Yu H., Yamaguchi T., Tomita D. et al.* // Angle Orthodontist. 2019. V. 88. № 5. P. 575.
<https://doi.org/10.2319/092917-659.1>
43. *Skinner M., Gunz Ph., Wood B.A. et al.* // J. Hum. Evol. 2008. V. 55. P. 979.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.08.013>
44. *Kato A., Ohno N.* // Clin. Oral. Invest. 2008. V. 13. P. 43.
<https://doi.org/10.1007/s00784-008-0198-4>
45. *Le Luyer M., Coquerelle M., Rottier S. et al.* // PLoS One. 2016. V. 11. № 7. P. e0159688.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0159688>
46. *Liao W., Xing S., Li D. et al.* // Sci. Rep.-UK. 2019. V. 9. № 2347. P. 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-38818-x>
47. *Martin R.M.G., Hublin J.-J., Gunz P. et al.* // J. Hum. Evol. 2017. V. 103. P. 20.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2016.12.004>
48. *Nowaczewska W., Dąbrowski P., Stringer Ch. et al.* // J. Hum. Evol. 2013. V. 64. № 3. P. 225.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2012.12.001>
49. *Benazzi S., Fantini M., De Crescenzo F. et al.* // J. Hum. Evol. 2009. V. 56. № 3. P. 286.
<https://doi.org/10.1016/j.jhevol.2008.07.006>
50. *Zanolli C., Schillinger B., Kullmer O. et al.* // Front. Ecol. Evol. 2020. V. 8. P. 42.
<https://doi.org/10.3389/fevo.2020.00042>
51. *Knyaz V.A.* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2012. V. XXXIX-B3. P. 585.
<https://doi.org/10.5194/isprsarchives-XXXIX-B3-585-2012>
52. *Knyaz V.A., Gaboutchian A.V.* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2016. V. XLIX-B3. P. 849.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLI-B5-849-2016>
53. *Gaboutchian A.V., Knyaz V.A., Leybova N.A. et al.* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2020. V. XLIII-B2-2020. P. 845.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-845-2020>
54. *Gaboutchian A.V., Knyaz V.A.* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2019. V. XLII-2/W18. P. 53.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W18-53-2019>
55. *Gaboutchian A.V., Knyaz V.A., Novikov M.M. et al.* // Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. 2020. V. XLIII-B2-2020. P. 851.
<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-851-2020>
56. *Габучян А.В.* // Клинико-экспериментальное обоснование препарирования окклюзионной поверхности зубов при ортопедическом лечении несъемными протезами. Автореф. канд. дисс. М: МГМСУ, 2011. 183 с.
57. *Габучян А.В., Князь В.А., Большаков Г.В.* // Вестник антропологии. 2017. № 3 (39). С. 98.