

DOI: 10.37988/1811-153X\_2024\_4\_114

[В.А. Бадалян](#)<sup>1,2</sup>,

д.м.н., профессор кафедры стоматологии;  
ведущий научный сотрудник отделения  
клинической и экспериментальной  
имплантологии

[Э.А. Левонян](#)<sup>1</sup>,

аспирант кафедры стоматологии

[Б.А. Кудзаев](#)<sup>2</sup>,

аспирант отделения клинической  
и экспериментальной имплантологии

<sup>1</sup> Первый МГМУ им. И.М. Сеченова,  
119991, Москва, Россия

<sup>2</sup> ЦНИИСиЧЛХ, 119021, Москва, Россия

## Поиск оптимального объекта для определения первичной стабильности дентальных имплантатов в рамках экспериментального исследования

**Аннотация.** При изучении дентальных имплантатов часто одной из задач является определение показателей их первичной стабильности. Однако это не всегда возможно в ходе установки имплантатов пациентам. Вследствие этого перед специалистами возникает задача поиска оптимальной модели для определения первичной стабильности дентальных имплантатов в рамках экспериментального исследования. В статье систематизированы и обобщены данные литературных источников, а также результаты собственных исследований применительно к выбору модели для изучения первичной стабильности дентальных имплантатов.

**Заключение.** При изучении показателей первичной стабильности с использованием кости низкой плотности оптимальным объектом являются материалы животного происхождения с иссеченным кортикальным компонентом, например грудная кость овец или свиней. При необходимости исследования первичной стабильности при более плотной структуре кости рекомендуется использование большеберцовой кости свиней.

**Ключевые слова:** имплантация, первичная стабильность, эксперимент, минипиги, синтетические блоки

### ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ:

Бадалян В.А., Левонян Э.А., Кудзаев Б.А. Поиск оптимального объекта для определения первичной стабильности дентальных имплантатов в рамках экспериментального исследования. — *Клиническая стоматология*. — 2024; 27 (4): 114—121. DOI: 10.37988/1811-153X\_2024\_4\_114

[V.A. Badalyan](#)<sup>1,2</sup>,

Doctor of Science in Medicine, professor  
of the Dentistry Department; leading  
researcher at the Clinical and experimental  
implantology Division

[E.A. Levonian](#)<sup>1</sup>,

postgraduate at the Dentistry Department

[B.A. Kudzaev](#)<sup>2</sup>,

postgraduate at the Clinical and experimental  
implantology Division

<sup>1</sup> Sechenov University,  
119991, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Central Research Institute  
of Dental and Maxillofacial Surgery,  
119021, Moscow, Russia

## The search for the optimal object for determining the primary stability of dental implants in the framework of an experimental study

**Annotation.** In the study of dental implants, one of the objectives is often to determine indicators of primary stability. However, this is not always possible during implant placement. Due to this fact the specialists face the task of searching for the optimal model for determining the primary stability of the dental implants within the framework of the experimental research. The article systematizes and summarizes the data of literature sources as well as the results of our own research in relation to the choice of the model for studying the primary stability of dental implants.

**Conclusion.** When studying the primary stability parameters with the use of low-density bone the optimal object is the materials of animal origin with the dissected cortical component, for example, the breastbone of sheep or pigs. If it is necessary to study the primary stability with a more dense bone structure, the use of pig tibia is recommended.

**Key words:** implantation, primary stability, experiment, minipigs, synthetic blocks

### FOR CITATION:

Badalyan V.A., Levonian E.A., Kudzaev B.A. The search for the optimal object for determining the primary stability of dental implants in the framework of an experimental study. *Clinical Dentistry (Russia)*. 2024; 27 (4): 114—121 (In Russian). DOI: 10.37988/1811-153X\_2024\_4\_114

## ВВЕДЕНИЕ

Внутрикостная дентальная имплантация — широко распространенный метод хирургического лечения, предшествующий протезированию. Важным фактором для достижения интеграции имплантатов в костную ткань является их стабильность, под которой понимают отсутствие клинической подвижности последних.

Различают первичную и вторичную стабильность. В период остеоинтеграции первичная стабильность влияет на жесткость, прочность положения имплантата в кости и предотвращает его перемещение [1]. Первичную стабильность можно считать достаточной, когда микроподвижность имплантата находится в диапазоне 50–150 мкм. Микроподвижность выше этого уровня вызывает резорбцию кости и фиброзную инкапсуляцию вокруг имплантата, что с большой долей вероятности может привести к его отторжению [2, 3].

Со временем происходит снижение показателей первичной стабильности, что связано с процессом ремоделирования костной ткани, возникающей после установки имплантата. При благоприятном заживлении появляется вторичная стабильность благодаря образованию кости *de novo* на поверхности самих дентальных имплантатов, таким образом достигается их остеоинтеграция [4].

Ввиду активной социальной жизни человека, желания большинства пациентов как можно быстрее завершить хирургический этап лечения и установить ортопедические конструкции возникает необходимость проведения немедленной нагрузки с опорой на дентальные имплантаты, что в свою очередь напрямую зависит от величины их первичной стабильности. В некоторых случаях достижение ее оптимальных значений затруднительно, например при работе с атрофированным альвеолярным гребнем верхней челюсти. Основными факторами, влияющими на первичную стабильность имплантатов, являются состояние костной ткани, ее плотность и степень васкуляризации, а также геометрическая форма и особенности конструкции самого имплантата, специфика обработки его поверхности, его положение и протокол формирования имплантационного ложа [5]. Однако в некоторых случаях традиционное определение первичной стабильности не всегда возможно в ходе установки внутрикостных дентальных имплантатов, например при испытании новых образцов, еще не допущенных до клинического применения, или при разработке новых техник подготовки имплантационного ложа. Для того чтобы определить, соответствуют ли новые разработки в дентальной имплантологии требованиям биосовместимости, механической стабильности, а также безопасности, они должны пройти тщательное тестирование *in vitro* и *in vivo*. В связи с этим возникает необходимость выбора оптимальной модели для изучения первичной стабильности имплантатов в рамках экспериментального исследования. При правильно поставленных экспериментах, отвечающих действующим этическим нормам, выбранная модель должна обеспечить получение надежного результата с минимальными финансовыми издержками.

Накопленный исследователями опыт по выбору оптимальной модели нуждается в определенном обобщении, что требует проведения соответствующего анализа и систематизации материалов научных работ, посвященных рассматриваемому вопросу.

## АНАЛИЗ НАУЧНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ, ПОСВЯЩЕННОЙ ВЫБОРУ ОБЪЕКТА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЙ В ОБЛАСТИ ДЕНТАЛЬНОЙ ИМПЛАНТОЛОГИИ

В доклинических исследованиях при разработке дентальных имплантатов, а также для определения оптимального протокола препарирования для получения первичной стабильности используются различные модели (полиуретановые блоки, животные, трупная кость и др.). Широкое распространение получили опыты, проводимые на животных, которых условно можно разделить на крупно- и малогабаритных. Животные биомодели играют ключевую роль при первоначальной разработке продукта и являются важными компонентами доклинических данных, включаемых в заявки на одобрение регулирующих органов. Выбор вида животного должен быть тщательно задокументирован и обоснован с учетом физиологических особенностей каждого животного, а также сходства с костью человека. Факторы, которые принимаются во внимание в ходе решения об использовании того или иного вида животных, связаны с доступностью последних, необходимыми условиями содержания и связанными с этим затратами, а также с поведенческими особенностями, рисками, связанными с наличием заболеваний, опасных для человека, квалифицированного персонала для обращения с животными, а также этическими нормами в отношении подопытных существ, пригодностью к хирургическому вмешательству и продолжительностью жизни вида, которые должны соответствовать плану исследования [6, 7] (табл. 1).

В Российской Федерации принят ГОСТ Р 54328-2011, соответствующий международному стандарту ISO/TS 22911:2005, согласно которому проводится доклиническая оценка систем имплантатов на животных. Основными группами животных, используемыми при проведении экспериментальных исследований в стоматологии, являются различные грызуны (крысы и кролики), а также более крупные представители млекопитающих: овцы, собаки и карликовые свиньи (минипиги). При проведении опытов с применением внутрикостных дентальных имплантатов эти группы животных по сравнению друг с другом обладают определенными преимуществами и недостатками.

Рассмотрим подробнее основные характеристики данных групп с точки зрения целесообразности их использования для изучения первичной стабильности дентальных имплантатов.

В 2020 г. проводилось исследование на моделях животных, часто используемых при тестировании биосовместимости дентальных имплантатов. Целью исследования являлось предоставление данных о костной структуре видов животных, участвующих в стоматологических исследованиях, подчеркнув особенности

**Таблица 1. Основные преимущества и недостатки различных типов моделей, используемых в исследованиях в области дентальной имплантологии**

**Table 1. Key advantages and disadvantages of the different types of models used in dental implantology research**

Объект	Достоинства	Недостатки
Нечеловекообразные приматы	Схожесть в анатомии и физиологии ротовой полости. Высокая степень генетического родства с человеком (~99%). Высокая достоверность данных, интерпретируемых применительно к человеку. Возможность проведения функциональных исследований	Этические ограничения. Дорогостоящее содержание в специализированных условиях. Долгий жизненный цикл
Крупногабаритные животные	Размер и форма челюстных костей близки к таковым у человека. Возможность проведения костно-пластических операций, использования имплантатов, подходящих по размеру для человека. Возможность моделирования периимплантита (у собак). Схожая с человеком фармакокинетика. Схожая с человеком анатомия костной ткани	Этические ограничения (применительно к собакам). Дорогостоящее содержание в специализированных условиях. Долгий жизненный цикл. Ограничения в области генетических исследований (применительно к собакам)
Малогабаритные животные	Возможность моделирования различных заболеваний. Возможность проведения генетических исследований. Возможность проведения метаболического фенотипирования. Невысокая стоимость содержания и простота ухода	Необходимость использования адаптированных по размеру имплантатов. Ограничение выполнимых хирургических манипуляций. Небольшой размер костей. Ограниченная ценность данных, полученных при исследовании заболеваний человека
In vitro/ in silico/био-материалы	Возможность проведения исследования, контролируя необходимые физиологические процессы. Невысокая стоимость. Отсутствие этических ограничений. Небольшие временные затраты	Отсутствие физиологических процессов в биоматериалах. Отсутствие возможности проведения хирургических манипуляций. Невозможность использования имплантатов (in vitro/in silico)

остеоинтеграции в зависимости от вида. В то же время отмечалась важность выбора моделей на животных, чтобы получить наиболее точные данные для разработки дентальных имплантатов и их использования на людях. В результате исследований были получены данные, которые помогли описать характеристики костей крыс, кроликов, свиней, овец, коз, собак и соотнести их с костным скелетом человека (табл. 2) [6].

Биомодели-грызуны являются самым распространенным объектом для проведения медицинских исследований во всех лабораториях мира. Например, в Бразилии крысы до недавнего времени использовались в 82,7% стоматологических опытов, проводимых *in vivo* [8]. При исследованиях восстановления переломов кости относительная частота изучения данного процесса на крысах равна 38%. Данные животные устойчивы к инфекционным заболеваниям, что, несомненно, является преимуществом при проведении разного рода экспериментов, включающих хирургические вмешательства. Кроме того,

следует отметить неприхотливость этих млекопитающих, простоту в обращении с ними, невысокие затраты на их содержание, а также низкую этическую напряженность по отношению к ним. В то же время при работе с этими грызунами возникает ряд ограничений, в основном связанных с небольшим размером их анатомических образований и структур, в том числе костей. В связи с этим крысам затруднительно установить дентальные имплантаты, подходящие по размерам человеку, и проводить различные хирургические вмешательства в целом. В исследованиях областью выбора для установки имплантатов являются нижняя челюсть, бедренная и большеберцовая кость [7, 9]. Следует также отметить, что процессы метаболизма у крыс более ускорены по сравнению с таковыми у человека, что обуславливает более быстрое костеобразование, и, как следствие, может быть причиной погрешностей при изучении остеогенеза в области внутрикостных дентальных имплантатов и определения их первичной стабильности [10].

**Таблица 2. Характеристики человеческой кости и кости животных**  
Table 2. Characteristics of human and animal bone

Вид	Макроскопические сходства	Микроскопические сходства	Возраст созревания костной ткани
Человек	—	Пластинчатая кость с экстенсивным ремоделированием	16–20 лет
Крыса	Отсутствуют	Первичная кость в течение жизни	26 недель
Кролик	Минимальные	Первичная кость с развитием вторичных остеонов и их преобразованием с возрастом	8–11 месяцев
Свинья	Умеренные	Плексиформная организация с переходом ко вторичным остеоном	2–4 года
Мелкий рогатый скот	Умеренные	Плексиформная организация до 7–9 лет (у овец) и вторичными остеоном (у коз)	2 года
Собака	Значительные	Плексиформная организация с небольшим ремоделированием остеонов	18 месяцев

Кролики, как и крысы, широко распространены в качестве животных моделей — они используются более чем в 35% случаев при проведении различных медицинских исследований. Высокая степень доступности, простота в уходе и содержании — вот несомненные достоинства при работе с этими млекопитающими, поэтому они часто используются для изучения внутрикостных дентальных имплантатов. Для кроликов характерно ускоренное созревание скелета и восстановление костной ткани, благодаря чему значительно сокращаются временные затраты на проведение экспериментов [7]. Имплантаты устанавливаются в проксимальный мыщелок большеберцовой кости — по своей структуре он очень близок к челюстным костям человека и легкодоступен для хирургических вмешательств, в связи с чем многие исследователи используют такую модель для экспериментальной имплантации [11]. Однако следует иметь в виду, что быстрая сменяемость структуры кости в долгосрочной перспективе может привести к искажениям результатов, что затруднит их интерпретацию применительно к биологии человека. Кроме того, гистологический анализ компактной пластинки показал, что кости кролика существенно отличаются от человеческих не только по строению, но и по васкуляризации [12]. Существуют также ограничения, связанные с размерами имплантатов, которые можно установить исходя из параметров кроличьих костей. В области имплантации часто возникают переломы и фрагментация кости, так как скелет даже взрослого кролика очень хрупок [11].

Мелкие жвачные животные (овцы/козы) по сравнению с другими видами применяются не так часто для доклинических исследований дентальных имплантатов. При их рассмотрении в качестве биомодели для стоматологических экспериментов следует выделить такие сходства их ротовой полости с ротовой полостью человека, как сменяемость зубов, похожую зубную формулу и анатомию постоянных зубов. Данные животные доступны, довольно просты в уходе и не требуют высоких затрат на содержание. Однако такие факторы, как свойственное овцам пережевывание пищи, pH слюны, отсутствие верхних резцов и нижних клыков, плотность челюстных костей, их ремоделирование и биомеханические свойства существенно отличаются от таковых у человека, что, несомненно, будет влиять на интерпретацию полученных данных. Анатомические отличия в строении зубов и челюстей отчетливо видны на компьютерной томограмме (КТ) черепа овцы [13].

В стоматологических исследованиях чаще применяются бедренная и большеберцовая кости мелких жвачных животных, где можно установить несколько имплантатов, чуть реже используются челюстные и грудная кости. Последняя имитирует кость низкой плотности, что особенно актуально при исследовании техник препарирования (неполное препарирование, остеоденсификация) и дизайна имплантатов (так называемых активных и агрессивных имплантатов), применение которых направлено на увеличение показателей первичной стабильности.

Собаки используются для медицинских экспериментов на протяжении многих лет. Преимущества этих

млекопитающих как биомоделей для проведения стоматологических исследований — сходство с человеком в анатомии зубов и их сменяемости с временных на постоянные, подобие зубной формулы, строение периодонта и размеры челюстных костей, что обуславливает возможность установки имплантатов таких диаметров, которые вживляются человеку [13].

Биологические особенности костей собак сопоставимы с таковыми у человека. Они являются ценной моделью при изучении периимплантита из-за их восприимчивости к спонтанному пародонтиту. Однако кость собак имеет смешанную микроструктуру со вторичными остеонами, которые расположены главным образом в центре кортикальной кости [14]. Данные клетки имеют плексиформную организацию (в виде плетения), которая обеспечивает быстрое сращение в случае перелома, что является своеобразным недостатком при проведении хирургических вмешательств, так как у человека такая микроструктура обнаруживается только в детском возрасте в период быстрого роста и служит для повышения прочности костной ткани. Кроме того, скорость ремоделирования трабекулярной кости различна у людей и собак. Более того, она отличается у костей одного и того же животного. Так, например, интенсивность восстановления нижней челюсти в 2 раза выше, чем верхней. Вдобавок строение челюстных костей отличается у собак в разные возрастные периоды. Наиболее подходящее время для установки имплантатов — возраст 1–2 года. При установке имплантатов необходимо учитывать всю вышеизложенную специфику. Однако наиболее серьезным препятствием при работе с собаками является выросшая с недавнего времени высокая этическая настороженность общества по отношению к данным животным, что затрудняет их использование в качестве биомоделей при проведении медицинских исследований [13].

Особое внимание с точки зрения выбора биомодели уделяется свиньям, в частности минипигам, их широко используют в качестве объектов проведения различных медицинских исследований, в том числе в области стоматологии. Отмечается целый ряд анатомических и физиологических характеристик, схожих с таковыми у человека. Это можно наблюдать на примере сердечно-сосудистой системы, пищеварения, строения зубов и альвеол, костей, в том числе челюстных, их кровоснабжения, состава крови, метаболизма, фармакокинетики и т.д. [7, 13]. Исследования показывают, что стволовые клетки свиньи в будущем могут быть использованы при выращивании человеческой пульпы и системы ее кровоснабжения [15].

Большим преимуществом при работе с этими животными является возможность установки имплантатов стандартных размеров (3–4,8 мм в диаметре и 6–12 мм в длину). Определяется высокое сходство не только в морфологии челюстных костей, но и в их клеточном и интерстициальном строении [16].

Следует отметить, что челюсти свиньи имеют большую массу и более плотную трабекулярную систему. Кроме того, существуют различия в строении самих остеонов. Такие сходства, как пластинчатая структура,

плотность и концентрация минералов в кости, по сравнению с человечески-ми, делают свинью хорошей моделью для изучения процесса остеоинтеграции дентальных имплантатов. Кроме того, большеберцовая кость свиньи считается эквивалентом нижней челюсти человека [6, 17, 18].

Грудная кость свиней также используется в экспериментальных исследованиях с целью сравнения разных техник подготовки имплантационного ложа, так как имитирует кость низкой плотности, встречающуюся в дистальных отделах верхней челюсти [19].

Свиньи достаточно трудны с точки зрения содержания и взаимодействия, так как они имеют большую массу и часто довольно агрессивный характер [13]. Вследствие этого значительно легче использовать именно минипигов при проведении стоматологических экспериментов, например светлогорской породы, на представителях которой регулярно изучаются внутрикостные дентальные имплантаты [20]. Минипиги имеют несущественные различия в анатомии и физиологии по сравнению с обычными свиньями, но при этом они гораздо проще в обращении [7].

Наибольшим анатомическим, физиологическим и генетическим сходством с человеком среди животных, которые используются при проведении медицинских экспериментов, обладают нечеловекообразные приматы. Однако недоступность и высокая этическая напряженность по отношению к данным представителям дикой природы исключает возможность применения этих животных в качестве биомоделей для проведения стоматологических исследований. В исследовании N. Blanc-Sylvestre и соавт. (2021) были изучены относительно крупные и небольшие животные. В настоящее время в рамках бинарной классификации появился новый уровень процедур принятия решений относительно целей исследования с установлением подклассов в соответствии с конкретными видами и характеристиками каждой биомодели. Выбор животного для исследования внутрикостных дентальных имплантатов зачастую обусловлен размером последних. Иначе говоря, при исследовании имплантата размером, подходящего для человека, выбирается модель крупногабаритного животного,

**Таблица 3. Выбор модели крупногабаритного животного в зависимости от изучаемого вопроса**

Table 3. The choice of large-size animal model depending on the studied issue

Собаки	Свиньи	Приматы
Исследования на костях конечностей	Изучение остеоинтеграции	Исследования, имеющие высокую научную ценность
Операция синус-лифтинга	Изучение поверхности/состава материала	
Моделирование периимплантита	Сравнение имплантатов	Исследования, подтвержденные на других моделях
Проведение исследований в неблагоприятных условиях полости рта	Операции по устранению костных дефектов	

и, соответственно, при исследовании имплантата уменьшенного размера — малогабаритного. Помимо этого, выбор биомодели обусловлен и другими факторами, например локализацией устанавливаемых имплантатов, спецификой изучаемых процессов, наличием сопутствующих хирургических вмешательств и т.д. (табл. 3) [7].

Кроме того, были сделаны выводы по изучаемым животным:

- 1) В Европе и других странах в рамках аккредитованных процедур запрещено проведение доклинических исследований на приматах. Модели приматов, особенно бабуинов, следует рассматривать как подтверждающую модель, зарезервированную для исследований крупных достижений, обеспечивающих существенную дополнительную научную ценность, уже подтвержденную на моделях других животных.
- 2) Минипиги — оптимальные и наиболее распространенные модели, заменившие собак в доклинических исследованиях. Минипиг — идеальная модель для исследований регенерации костной ткани вокруг дентальных имплантатов при их установке в полости рта.
- 3) Собак следует использовать только в тех случаях, когда использование свиней невозможно. В основном при проведении операции открытый синус-лифтинг и моделирование периимплантита.
- 4) При изучении имплантатов маленького размера и проведении экспериментов на биосовместимость следует использовать мелких животных, поскольку для ее определения форма и размер имплантата не имеют значения (табл. 4.) [7].

Особый интерес вызывают исследования, проведенные с использованием как различных костей, так и блоков животного и синтетического происхождения. Например, в исследовании F. Orlando и соавт. (2019), проведенном на блоках из лошадиной кости без имитации кортикального слоя, утверждается, что данный материал лучше подходит для изучения первичной стабильности имплантатов в сравнении с полиуретановыми блоками, так как его механические свойства схожи с таковыми у костей человека [21].

Довольно часто проводятся экспериментальные исследования с использованием синтетических блоков. При выборе синтетических материалов следует иметь в виду не только их плотность, но и саму структуру, так как блоки могут состоять

**Таблица 4. Выбор модели малогабаритного животного в зависимости от изучаемого вопроса**

Table 4. The choice of small-size animal model depending on the studied issue

Кролики	Мыши	Крысы
Исследования на общую биосовместимость с использованием более 2 имплантатов на одно животное	Генетические исследования заболеваний человека	Исследования на общую биосовместимость с использованием 1–2 имплантатов на одно животное
	Исследования периимплантита	Исследования на здоровых животных
		Исследования на животных с индуцированными заболеваниями
		Исследования периимплантита

из твердой пены, иметь жесткое ячеистое и композитное строение, что может отразиться на величине первичной стабильности имплантата [22].

По данным ASTM (American Society Testing Materials), полиуретановые блоки доступны в различных микроструктурах и плотностях, способны имитировать губчатую и кортикальную кость человека, обеспечивая стандартизацию процедур без учета анатомической и структурной неоднородности естественной кости [22]. Блоки из полиуретана выпускаются разной степени плотности, что позволяет имитировать при их помощи кость различных типов от D1 по D4 по классификации Misch.

Однако структурные особенности блоков заметно отличаются от нативной кости. В отличие от полиуретана, для кости характерна пластическая деформация. Это особенно актуально при сравнении разных техник расщепления гребня и при применении метода остеоденсификации [23].

### РЕЗУЛЬТАТЫ СОБСТВЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЫБОРУ ОПТИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПЕРВИЧНОЙ СТАБИЛЬНОСТИ ДЕНТАЛЬНЫХ ИМПЛАНТАТОВ

При исследовании имплантатов, подходящих по размеру человеку, наиболее благоприятное сочетание таких факторов, как биологические особенности кости, доступность, стоимость, соблюдение этических норм имеет место при использовании определенных костей овец и свиней.

Так, в первой серии исследований была проведена установка 12 имплантатов в губчатое вещество грудной кости овцы с измерением момента силы и коэффициента первичной стабильности (рис. 1). Величину крутящего момента измеряли непосредственно в ходе имплантации при помощи физиодиспенсера, а коэффициенты стабильности ISQ были получены при помощи аппарата Osstell Veacon. Предварительно было проведено КТ-исследование используемой кости. При помощи обеспечения программы для просмотра КЛКТ была изучена плотность костной ткани в трех проекциях: сагитальной, коронарной и аксиальной. Так, по данным исследования трех участков в коронарной проекции губчатой костной ткани грудной кости овцы с помощью функции измерения средней плотности, последняя находилась в диапазоне от 19 до 144 ед. по Хаунсфилду, что соответствует кости типа D5 по классификации Misch (рис. 2).

Показатели крутящего момента и первичной стабильности, полученные в первой серии опытов, приведены в табл. 5.

Аналогичным образом в следующей серии опытов была проведена установка 12 образцов тех же имплантатов и измерены момент силы и коэффициент первичной стабильности, однако в данном случае была использована грудная кость свиньи (рис. 3). Перед экспериментом была проанализирована КТ грудной кости и при помощи программного обеспечения Vatech с функцией измерения средней плотности последняя изучена в сагитальной, коронарной и аксиальной проекциях. По данным

исследования трех участков кости в коронарной проекции средние значения плотности губчатого вещества



Рис. 1. Имплантат, установленный в губчатое вещество грудной кости овцы

Fig. 1. Implant placed into cancellous bone of sheep's sternum

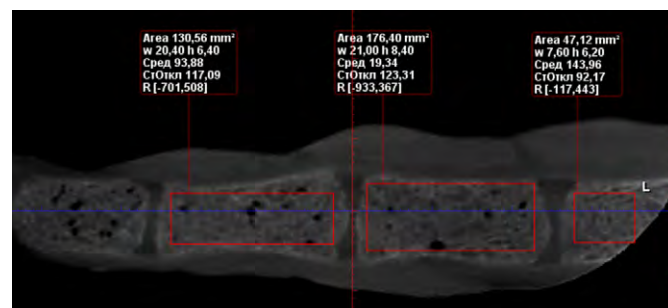


Рис. 2. Коронарная проекция среза КЛКТ грудной кости овцы с измеренной средней плотностью трех участков губчатого вещества

Fig. 2. CBCT section in coronary projection of three areas with measured average density of cancellous bone of sheep's sternum



Рис. 3. Имплантаты, установленные в губчатое вещество грудной кости свиньи

Fig. 3. Implants placed into cancellous bone of pig's sternum

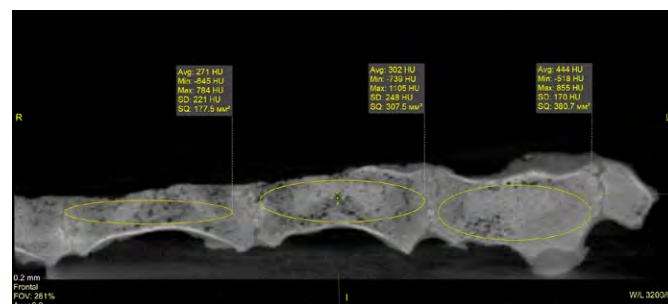


Рис. 4. Срез КЛКТ в коронарной проекции с измеренной средней плотностью трех участков губчатого вещества грудной кости свиньи

Fig. 4. CBCT section in coronary projection of three areas with measured average density of cancellous bone of pig's sternum

**Таблица 5. Момент силы и показатель первичной стабильности при установке имплантатов в губчатое вещество грудины овцы**  
Table 5. Torque and primary stability values gained during implantation into cancellous bone of sheep's sternum

№	Момент силы, Н·см	Коэффициент стабильности имплантата (ISQ)
1	12	65
2	11	67
3	10	67
4	7	57
5	14	68
6	15	72
7	22	77
8	8	59
9	9	61
10	12	71
11	12	72
12	14	73

**Таблица 6. Момент силы и показатель первичной стабильности при установке имплантатов в губчатое вещество грудины свиньи**  
Table 6. Torque and primary stability values gained during implantation into cancellous bone of pig's sternum

№	Момент силы, Н·см	Коэффициент стабильности имплантата (ISQ)
1	19	76
2	22	79
3	26	84
4	20	74
5	23	81
6	25	83
7	21	79
8	21	77
9	17	73
10	19	77
11	20	74
12	22	75

находились в диапазоне от 271 до 444 ед. по Хаунсфилду, что соответствует кости типа D3—D4 по классификации Misch (рис. 4).

Показатели крутящего момента и первичной стабильности, полученные во второй серии опытов, приведены в табл. 6.

На основании полученных данных можно сделать вывод, что плотность костной ткани непосредственно отражается на величине момент силы и коэффициента первичной стабильности.

## ОБСУЖДЕНИЕ

Грудная кость овец и свиней является благоприятным объектом для исследования первичной стабильности имплантатов в кости низкой плотности.

В современной дентальной имплантологии в зависимости от цели исследования применяются различные модели, выбор которых должен проводиться с учетом комплекса факторов: биологических, этических, стоимости проведения экспериментов. Вместе с тем следует отметить ряд характеристик применяемых сегодня моделей.

Несмотря на относительную дешевизну полиуретановых блоков и простоту их применения они отнесены к неоптимальным моделям, так как не учитывают вязкость, упругость и пластическую деформацию кости. При этом они признаны оптимальным объектом в ситуациях, когда описанные выше свойства не имеют первостепенную значимость (например, при модификации подготовки имплантационного ложа в кости разной степени плотности).

Из описанных животных собаки и свиньи имеют наиболее схожую с человеком структуру костей, однако применение первых затруднено со стороны этики и закона. Свиньи и мини-пиги, чьи кости близки по структуре и происходящим в них физиологическим процессам к человеческим и чье применение не осложнено со стороны этических аспектов, являются оптимальными

животными для проведения доклинических исследований.

При изучении показателей первичной стабильности с использованием кости низкой плотности оптимальным объектом являются материалы животного происхождения с иссеченным кортикальным компонентом, например грудная кость овец, свиней или лошадей.

Проведенные нами исследования подтвердили целесообразность использования данных моделей для исследований первичной стабильности новых имплантатов и совершенствования методик их установки.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ научных работ по выбору экспериментальных моделей в области медицинских исследований показал, что, применительно к вопросу определения первичной стабильности имплантатов, на сегодняшний день не выявлено идеального объекта, отвечающего всем желаемым требованиям. В каждом конкретном случае выбор объекта необходимо проводить с учетом комплекса рассмотренных выше факторов, что способствует достижению цели исследований с минимальными издержками. Тем не менее авторы пришли к выводу, что при изучении показателей первичной стабильности с использованием кости низкой плотности оптимальным объектом являются материалы животного происхождения с иссеченным кортикальным компонентом, например грудная кость овец или свиней. При необходимости исследования первичной стабильности при более плотной структуре кости рекомендуется использование большеберцовой кости свиней.

**Конфликт интересов.** Авторы декларируют отсутствие конфликта интересов.

**Поступила:** 20.08.2024      **Принята в печать:** 07.10.2024

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interests.  
**Received:** 20.08.2024      **Accepted:** 07.10.2024

## ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES:

1. Liu Y., Rath B., Tingart M., Eschweiler J. Role of implants surface modification in osseointegration: A systematic review. — *J Biomed Mater Res A*. — 2020; 108 (3): 470—484. [PMID: 31664764](#)
2. Ziebart J., et al. Effects of interfacial micromotions on vitality and differentiation of human osteoblasts. — *Bone Joint Res*. — 2018; 7 (2): 187—195. [PMID: 29682285](#)
3. Kohli N., Stoddart J.C., van Arkel R.J. The limit of tolerable micromotion for implant osseointegration: a systematic review. — *Sci Rep*. — 2021; 11 (1): 10797. [PMID: 34031476](#)
4. Иващенко А.В., Яблоков А.Е., Марков И.И., Монаков В.А., Нестеров А.М. Особенности трофики костной ткани после установки дентальных имплантатов. — *Вестник медицинского института «РЕАВИЗ»: реабилитация, врач и здоровье*. — 2021; 3 (51): 79—84. [\[Ivaschenko A.V., Yablokov A.E., Markov I.I., Monakov V.A., Nesterov A.M. Features of trophism of bone tissue after the installation of dental implants. — \*Bulletin of Medical Institute "REAVIZ": Rehabilitation, Doctor and Health\*. — 2021; 3 \(51\): 79—84 \(In Russian\)\].](#) [eLibrary ID: 46245352](#)
5. Кулаков А.А., Каспаров А.С., Порфенчук Д.А. Факторы, влияющие на остеоинтеграцию и применение ранней функциональной нагрузки для сокращения сроков лечения при дентальной имплантации. — *Стоматология*. — 2019; 4: 107—115. [\[Kulakov A.A., Kasparov A.S., Porfenchuk D.A. Factors affecting osteointegration and the use of early functional load to reduce the duration of treatment in dental implantation. — \*Stomatology\*. — 2019; 4: 107—115 \(In Russian\)\].](#) [eLibrary ID: 39548529](#)
6. Ancuta D.L., Coman C., Alexandru D.M., Crivineanu M. Animal models used in testing the biocompatibility of the dental implant — A review. — *Bulletin of University of Agricultural Sciences and Veterinary Medicine Cluj-Napoca. Veterinary Medicine*. — 2020; 77 (2): 1—6. [DOI: 10.15835/buasvmcn-vm:2020.0020](#)
7. Blanc-Sylvestre N., Bouchard P., Chaussain C., Bardet C. Pre-clinical models in implant dentistry: Past, present, future. — *Bio-medicines*. — 2021; 9 (11): 1538. [PMID: 34829765](#)
8. de Macedo Bernardino I. de Lima Farias I., Cardoso A.M.R., Xavier A.F.C., Calvalcanti A.L. Use of animal models in experimental research in dentistry in Brazil. — *Pesquisa Brasileira em Odontopediatria e Clínica Integrada*. — 2014; 14 (1): 17—21
9. Ананьева А.Ш., Бараева Л.М., Быков И.М., Веревкина Ю.В., Курзанов А.Н. Моделирование повреждений костных структур в экспериментах на животных. — *Инновационная медицина Кубани*. — 2021; 1 (21): 47—55. [\[Ananeva A.Sh., Baraeva L.M., Bykov I.M., Verevkin Yu.V., Kurzanov A.N. Modeling of bone injuries in animal experiments. — \*Innovative Medicine of Kuban\*. — 2021; 1 \(21\): 47—55 \(In Russian\)\].](#) [eLibrary ID: 44817850](#)
10. Zhang Z., Gan Y., Guo Y., Lu X., Li X. Animal models of vertical bone augmentation (Review). — *Exp Ther Med*. — 2021; 22 (3): 919. [PMID: 34335880](#)
11. Тодер М.М., Шевела А.А., Шевела А.И., Майбородин И.В. Подробный протокол экспериментальных работ на кроликах: внутрикостное внедрение металлических имплантов. — *Современные проблемы науки и образования*. — 2017; 3: 17. [\[Toder M.M., Shevela A.A., Shevela A.I., Mayborodin I.V. The detailed protocol of experimental works on rabbits: intrabone introduction of metal implants. — \*Modern Problems of Science and Education\*. — 2017; 3: 17 \(In Russian\)\].](#) [eLibrary ID: 29452278](#)
12. Meng X., Ziadlou R., Grad S., Alini M., Wen C., Lai Y., Qin L., Zhao Y., Wang X. Animal models of osteochondral defect for testing biomaterials. — *Biochem Res Int*. — 2020; 2020: 9659412. [PMID: 32082625](#)
13. Mangione F., Salmon B., EzEldeen M., Jacobs R., Chaussain C., Vital S. Characteristics of large animal models for current cell-based oral tissue regeneration. — *Tissue Eng Part B Rev*. — 2022; 28 (3): 489—505. [PMID: 33882717](#)
14. Должиков А.А., Должикова И.Н. Выбор экспериментальной модели в биомедицинских исследованиях имплантатов (обзор). — *Научные результаты биомедицинских исследований*. — 2018; 3: 49—62. [\[Dolzhikov A.A., Dolzhikova I.N. The problem of experimental model choice in biomedical researches of implants \(review\). — \*Research Results in Biomedicine\*. — 2018; 3: 49—62 \(In Russian\)\].](#) [eLibrary ID: 36808913](#)
15. Aksel H., Huang G.T. Human and swine dental pulp stem cells form a vascularlike network after angiogenic differentiation in comparison with endothelial cells: A quantitative analysis. — *J Endod*. — 2017; 43 (4): 588—595. [PMID: 28258811](#)
16. Kochetkova T., Groetsch A., Indermaur M., Peruzzi C., Remund S., Neuenschwander B., Bellon B., Michler J., Zysset P., Schwiedrzik J. Assessing minipig compact jawbone quality at the microscale. — *J Mech Behav Biomed Mater*. — 2022; 134: 105405. [PMID: 35947925](#)
17. Sparks D.S., Saifzadeh S., Savi F.M., Dlaska C.E., Berner A., Henkel J., Reichert J.C., Wullschlegler M., Ren J., Cipitria A., McGovern J.A., Steck R., Wagels M., Woodruff M.A., Schuetz M.A., Huttmacher D.W. A preclinical large-animal model for the assessment of critical-size load-bearing bone defect reconstruction. — *Nat Protoc*. — 2020; 15 (3): 877—924. [PMID: 32060491](#)
18. Fabbro M.D., Taschieri S., Canciani E., Addis A., Musto F., Weinstein R., Dellavia C. Osseointegration of titanium implants with different rough surfaces: A histologic and histomorphometric study in an adult minipig model. — *Implant Dent*. — 2017; 26 (3): 357—366. [PMID: 28234707](#)
19. Seo D.J., Moon S.Y., You J.S., Lee W.P., Oh J.S. The effect of under-drilling and osseodensification drilling on low-density bone: A comparative ex vivo study. — *Applied Sciences*. — 2022; 12 (3): 1163. [DOI: 10.3390/app12031163](#)
20. Смбалян Б.С., Волков А.В., Омаров Т.В., Ломакин М.В. Изучение остеоинтеграции имплантатов КОНМЕТ с биоактивной поверхностью. — *Российская стоматология*. — 2014; 4: 15—24. [\[Smbatian B.S., Volkov A.V., Omarov T.V., Lomakin M.V. The study of osteointegration of KONMET implants having the bioactive surface. — \*Russian Stomatology\*. — 2014; 4: 15—24 \(In Russian\)\].](#) [eLibrary ID: 23052148](#)
21. Orlando F., Arosio F., Arosio P., Di Stefano D.A. Bone density and implant primary stability. A study on equine bone blocks. — *Dent J (Basel)*. — 2019; 7 (3): 73. [PMID: 31266214](#)
22. Comuzzi L., Tumedei M., Pontes A.E., Piattelli A., Iezzi G. Primary stability of dental implants in low-density (10 and 20 pcf) polyurethane foam blocks: Conical vs cylindrical implants. — *Int J Environ Res Public Health*. — 2020; 17 (8): 2617. [PMID: 32290361](#)
23. de Carvalho Formiga M., Gehrke A.F., De Bortoli J.P., Gehrke S.A. Can the design of the instruments used for undersized osteotomies influence the initial stability of implants installed in low-density bone? An in vitro pilot study. — *PLoS One*. — 2021; 16 (10): e0257985. [PMID: 34618848](#)