

© КОЛЛЕКТИВ АВТОРОВ, 2015

УДК 616.314-089.843-07:519.24

Зязиков М.Д.<sup>1</sup>, Степанов А.Г.<sup>1</sup>, Джалалова М.В.<sup>2</sup>, Арутюнов С.Д.<sup>1</sup>

## ВЛИЯНИЕ ДЕЙСТВУЮЩЕЙ ПОД УГЛОМ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАГРУЗКИ НА КОСТНУЮ ТКАНЬ ЧЕЛЮСТИ И ЗУБ, АРМИРОВАННЫЙ ТРАНСДЕНТАЛЬНЫМ ИМПЛАНТАТОМ

<sup>1</sup>ГБОУ ВПО Московский государственный медико-стоматологический университет им. А.И. Евдокимова Минздрава России, 127473, Москва; <sup>2</sup>Научно-исследовательский институт механики МГУ им. М.В. Ломоносова, 119192, г. Москва

*Проведено методом конечных элементов численное исследование зависимости перемещений трансдентального имплантата и напряжений в окружающей его костной ткани от различных уровней резекции корня зуба и приложенной нагрузки под углом 45° к окклюзионной поверхности.*

**Ключевые слова:** трансдентальный имплантат (ТДИ), резекция корня зуба, математическое моделирование, напряжения, деформации, нагрузка под углом.

**Для цитирования:** Российский стоматологический журнал. 2015; 19(6): 7–9.

Zyazikov M. D.<sup>1</sup>, Stepanov A. G.<sup>1</sup>, Dzhalalova M. V.<sup>2</sup>, Arutyunov S. D.<sup>1</sup>

INFLUENCE OF THE CURRENT ANGLE OF THE FUNCTIONAL LOAD ON THE JAW BONE AND THE TOOTH, THE IMPLANT REINFORCED TRANSDERMALNY

<sup>1</sup>A. I. Evdokimov Moscow state medical dental University. Ministry of health of Russia, 127473, Moscow; <sup>2</sup>research Institute of mechanics of Moscow state University. M. V. Lomonosov Moscow State University, Russia, 119192, Moscow

*It was carried out numerical investigation of the dependence of displacements trans-dental implant and stresses in the surrounding jawbone of the different resection levels of the tooth root and the applied load to the occlusal surface at an angle of 45° by finite element method.*

**Keywords:** transdermalny implant; resection of the tooth root; mathematical modeling; stress; strain; load at an angle.

**Citation:** Rossiyskiy stomatologicheskii zhurnal. 2015; 19(6): 7–9.

В зависимости от плотности принимаемой пищи жевательные мышцы развивают силу, которая обуславливает определенную нагрузку, – жевательное давление, воспринимаемое всеми тканями пародонта. Вектор такой нагрузки может быть направлен по продольной оси зуба или под углом. А поскольку почти все зубы имеют тот или иной наклон, то действующая сила, приложенная к точке окклюзионной поверхности, чаще всего направлена под углом к продольной оси. Приходящееся на зуб давление вызывает его смещение, причем силы, действующие под углом к продольной оси, приводят к наибольшему пространственному смещению коронки. Поэтому наибольший интерес представляет исследование напряженно-деформированного состояния тканей пародонта и самого имплантата под действием угловой нагрузки. В работе [1] решена аналогичная задача, но рассматривалась только вертикальная нагрузка.

В данной работе так же, как и в [1] – первая часть исследовательской работы – рассматривались 3 варианта секвестирования корня зуба: 1/3 – резекция, 1/2 – ампутация, 2/3 – высокая ампутация с двумя этапами после установления самого имплантата. Первый этап – нет остеоинтеграции с костной тканью после установки имплантата, следовательно, объем удаленной части корня зуба при моделировании зубочелюстного сегмента (ЗЧС) можно считать незаполненным каким-либо материалом. Второй этап – остеоинтеграция трансдентального имплантата (ТДИ) с костной тканью произошла, и удаленный объем заполнился губчатой костью. Для построения компьютерной модели ЗЧС, включающего однокорневой зуб, коронку, дентин, периодонтальную щель, компактную кость альвеолы, десну, губчатую кость, использовали одонтометрические параметры из работы [2].

На рис.1 показана верхняя часть коронки, разрезанной продольно пополам, с распределенной нагрузкой, действующей на окклюзионную поверхность зуба под углом 45° к оси Y. В каждом узле на окклюзионной поверхности вектор силы направлен по осям X и Y (равной величины), таким образом,

результатирующая силы направлена под углом 45°, а сумма всех значений нагрузки в каждом узле составляет  $F = 50$  Н.

Задача решена в трехмерной постановке методом конечных элементов (МКЭ) [3, 4]. Для построения модели использовался объемный элемент Solid 186 – элемент для трехмерного моделирования твердых тел с 20 узлами и 3 степенями свободы в каждом узле (перемещение в каждом узле в направлениях X, Y, Z). Значения механических свойств тканей пародонта и материалов имплантата, таких как модуль Юнга и коэффициент Пуассона, представлены в табл. 1 [5].

Для сравнительного анализа во всех вариантах на окклюзионную поверхность зуба (площадь которой –  $S = 40,6768$  мм<sup>2</sup>) задана одинаковая распределенная нагрузка  $F = 5$  кг = 50 Н (или давление  $p = F/S = 0,1229$  кг/мм<sup>2</sup> = 1,229 МПа).

Для каждого варианта посчитаны суммарные перемещения по осям X, Y, Z и распределения напряжений по Мизесу.

Граничные условия заданы в виде ограничений на перемещения нижней поверхности зубочелюстного сегмента, т.е. выбиралась опция, соответствующая полному запрету перемещений во всех направлениях X, Y, Z.

Численные исследования методом конечных элементов проведены для двух этапов и 3 вариантов резекции корня зуба: 1/3, 1/2 и 2/3. В качестве примера в работе на рис. 2 и 3 помещены результаты расчета однокорневого зуба с резекцией корня 1/2 для 1-го и 2-го этапов соответственно. Как уже было отмечено в начале статьи, в отличие от работы [1], в которой исследовали распределение перемещений имплантата и напряжений в костной ткани при вертикальной нагрузке на окклюзионную поверхность зуба, в настоящей работе рассмотрена нагрузка под углом 45°. Поэтому величины перемещений представлены в виде суммарного перемещения основания имплантата и коронки зуба по осям X, Y, Z – обозначено как  $\Delta_{xyz}$  в микронах (мкм).

На рис. 2, а изображена компьютерная модель однокорневого зуба с резекцией корня 1/2 для 1-го этапа. На рис. 2, б, в и г показаны результаты численного решения исследуемой

Таблица 1. Механические свойства материалов

| Ткань и материал   | Модуль упругости (МПа) | Коэффициент Пуассона |
|--------------------|------------------------|----------------------|
| Дентин             | 15 000                 | 0,32                 |
| Периодонт          | 50                     | 0,45                 |
| Слизистая оболочка | 10                     | 0,46                 |
| Компактная кость   | 20 000                 | 0,30                 |
| Губчатая кость     | 5000                   | 0,35                 |
| Имплантат (титан)  | 110 000                | 0,30                 |

проблемы в трехмерной постановке, которые представлены также в сводной табл. 2. На всех рисунках зубочелюстной сегмент изображен половиной объема (для того чтобы можно было определить значения перемещений и напряжений внутри объема). После разбиения ЗЧС на элементы, каждая такая половина объема содержит более 400 тыс. элементов. Результаты решения для зуба с резекцией 1/3 и 2/3 на 1-м и 2-м этапах представлены в табл. 2 и на графиках рис. 4 и 5 – левые и правые столбцы желтого и зеленого цветов.

Нагружение зуба под углом к вертикальной оси приводит к перемещению не только самого имплантата, но и тканей ЗЧС – см. на рис. 2, б (1-й этап) и на рис. 3, б (2-й этап) четко видны уровни смещения материалов, показывающие количественное смещение всех тканей. Максимальные значения перемещения находятся в верхней части коронки зуба, перемещения основания имплантата отмечены цифрами: на 1-м этапе  $\Delta_{xyz}$  основания ТДИ = 0,002094 мм = 2,094 мкм, а на 2-м этапе  $\Delta_{xyz}$  основания ТДИ = 1,46 мкм. В табл. 2 перемещение основания обозначено словом “низ”, а перемещение коронки – словом “верх”.

Таблица 2. Значения перемещений  $\Delta_{xyz}$  и напряжений  $\sigma$  при различных резекциях корня зуба. Вектор силы, действующей на окклюзионную поверхность, направлен под углом 45°

| Этап | Резекция 1/3 корня            |                                       |
|------|-------------------------------|---------------------------------------|
| 1-й  | $\Delta_{xyz}$ мкм            | 56,44 верх–1,74 низ                   |
|      | $\sigma$ в кости МПа          | 21,49 в дентине–17,36 под имплантатом |
|      | $\sigma_{max}$ имплантата МПа | 90,97                                 |
| 2-й  | $\Delta_{xyz}$ мкм            | 55,99 верх–1,42 низ                   |
|      | $\sigma$ в кости МПа          | 21,66 в дентине–2,238 под имплантатом |
|      | $\sigma_{max}$ имплантата МПа | 91,86                                 |
|      | Резекция 1/2 корня            |                                       |
| 1-й  | $\Delta_{xyz}$ мкм            | 58,36 верх–2,1 низ                    |
|      | $\sigma$ в кости МПа          | 20,74 в дентине–30,73 под импл.       |
|      | $\sigma_{max}$ импл. МПа      | 88,03                                 |
| 2-й  | $\Delta_{xyz}$ мкм            | 54,9 верх–1,46 низ                    |
|      | $\sigma$ в кости МПа          | 21,82 в дентине–2,563 под импл.       |
|      | $\sigma_{max}$ импл. МПа      | 92,8                                  |
|      | Резекция 2/3 корня            |                                       |
| 1-й  | $\Delta_{xyz}$ мкм            | 74,85 верх–2,99 низ                   |
|      | $\sigma$ в кости МПа          | 15,09 в дентине–68,53 под импл.       |
|      | $\sigma_{max}$ импл. МПа      | 151,95                                |
| 2-й  | $\Delta_{xyz}$ мкм            | 54,1 верх–1,464 низ                   |
|      | $\sigma$ в кости МПа          | 21,39 в дентине–2,597 под импл.       |
|      | $\sigma_{max}$ импл. МПа      | 91,69                                 |

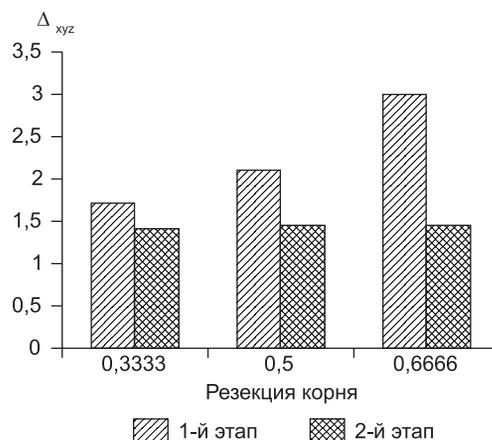


Рис. 4. Зависимость суммарного перемещения основания ТДИ ( $\Delta_{xyz}$  в микронах) от уровня резекции корня зуба 1/3, 1/2 и 2/3 на 1-м и 2-м этапах.

Здесь и на рис. 5–6: нагрузка под углом 45°.

Для оценки сложного напряженного состояния выбрано напряжение по Мизесу – средне-квадратичное значение касательных напряжений в окрестности данной точки [6]. На рис. 2, в и 3, в показаны значения напряжений в имплантате:  $\sigma_{max} = 88$  МПа (1-й этап) и  $\sigma_{max} = 92$  МПа (2-й этап).

В столбцах табл. 2 представлены значения напряжений по Мизесу для всех вариантов: максимальные значения в самом ТДИ на 1-м и 2-м этапах при резекции корня 1/3 и 1/2 находятся в местах, соответствующих примерно 2/3 длины ТДИ от нижнего конца соприкосновения имплантата с компактной частью альвеолярной кости (см. рис. 2, в и 3, в).

Совсем иная картина распределения напряжений при резекции (ампутации) 2/3 корня – максимальное значение напряжения на 1-м этапе находится в основании имплантата и равно  $\sigma_{max} = 151,95$  МПа, т.е. больше в 1,67 раза аналогичных значений напряжения при резекции корня 1/3 и 1/2. Но на 2-м этапе при ампутации 2/3 корня  $\sigma_{max} = 91,69$  МПа.

На рис. 2, г и 3, г показано распределение напряжений по Мизесу в окрестных материалах ТДИ (для определения значений напряжений внутри материалов имплантат удален). Можно видеть, что максимальные значения напряжений в дентине находятся в местах, соответствующих максимальным значениям напряжений в самом имплантате.

Независимо от уровня резекции, максимальные величины напряжения в ТДИ и в дентине находятся примерно в

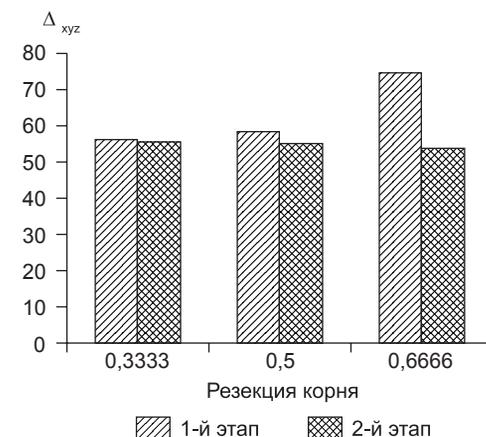


Рис. 5. Зависимость суммарного перемещения коронки зуба ( $\Delta_{xyz}$  в микронах) от уровня резекции корня зуба 1/3, 1/2 и 2/3 на 1-м и 2-м этапах.

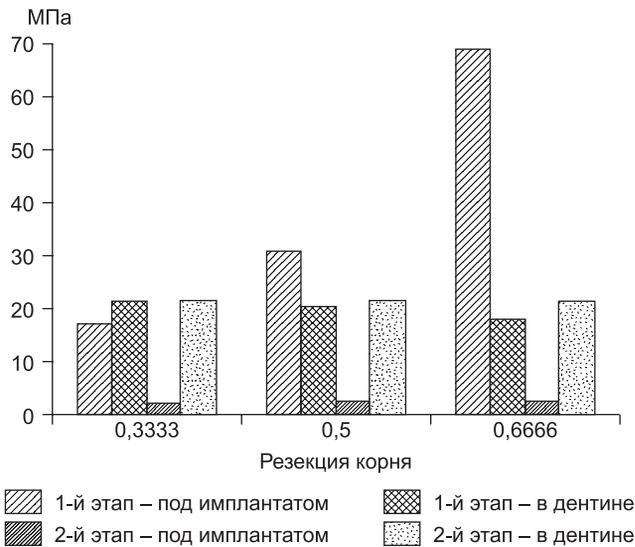


Рис. 6. Зависимость значений напряжений в костной ткани под имплантатом и в дентине от уровня резекции корня зуба 1/3, 1/2 и 2/3 на 1-м и 2-м этапах.



Рис. 7. Временная коронка с поперечными отростками для перераспределения жевательной нагрузки с оперируемого зуба.

одном и том же месте (за исключением напряжений в ТДИ при резекции 2/3 корня на 1-м этапе).

Результаты численного решения по перемещениям показаны на рис. 4 – перемещения основания ТДИ, на рис. 5 – перемещения коронки зуба. Сравнение показывает, что перемещения верхней части коронки почти в 30-40 раз больше перемещения основания ТДИ. Следует отметить, что при всех резекциях корня на 2-м этапе перемещения основания имплантата и коронки зуба практически не изменяются. На 1-м этапе при резекции 2/3 довольно резко возрастает значение перемещений основания и коронки (см. на рис. 4 и 5 правые желтые столбцы).

Картина распределения напряжений на рис. 6 наглядно характеризует зависимость напряжений от уровня резекции корня зуба и этапов: хорошо видно, что на 2-м этапе значения напряжений в костной ткани под имплантатом и в дентине от уровня резекции корня зуба не зависят, а вот на 1-м этапе с увеличением резекции резко возрастает напряжение в костной ткани под имплантатом (столбцы синего цвета).

Сравнение полученных результатов данной работы с аналогичными результатами работы [1] (с вертикальной нагрузкой) показывает, что значения перемещений коронки от действующей нагрузки под углом 45° почти на порядок больше, чем при вертикальной нагрузке на обоих этапах. Что касается перемещения основания имплантата, то для варианта с на-

грузкой под углом эти значения примерно в 1,5 раза меньше аналогичных с вертикальной нагрузкой на 1-м и 2-м этапах при резекции 1/3 и 1/2. При резекции корня 2/3 перемещение основания ТДИ на 70% больше аналогичного по сравнению с резекцией 1/3, и на 40% больше по сравнению с резекцией 1/2, но меньше на 13% такого же показателя для варианта с вертикальной нагрузкой.

Ампутация корня 2/3 значительно ухудшает все показатели на 1-м этапе, особенно это касается величин напряжений: по сравнению с резекцией 1/3 значение напряжения в костной ткани под имплантатом почти в 4 раза больше (см. рис. 6), и в 2 раза больше аналогичного значения для варианта с вертикальной нагрузкой. Но на 2-м этапе значения перемещений и напряжений не отличаются от соответствующих значений при резекции 1/3 и 1/2. Поэтому после установки ТДИ необходимо на период формирования костной ткани интраоперационного дефекта (1-й этап) перераспределить функциональную нагрузку с оперируемого зуба.

С этой целью на кафедре пропедевтической стоматологии стоматологического факультета МГМСУ им. А.И. Евдокимова разработаны временный зубной протез-прототип после проведения трансдентальной имплантации и способ временного протезирования зуба после проведения трансдентальной имплантации (заявки на получение патентов РФ № 2015117569 и 2015117568 от 12.05.2015).

На рис. 7 показан временный зубной протез-прототип после проведения трансдентальной имплантации, изготовленный монолитно из полимера, методом компьютерного фрезерования. Этот протез состоит из искусственной коронки, полностью повторяющей клиническую коронку оперированного зуба или ее реконструкцию, и поперечных отростков, имеющих толщину 0,5 мм, которые по форме повторяют рельеф оральной поверхности зубов, расположены по обе стороны от причинного зуба и фиксированы на рядом стоящих зубах посредством стоматологических цементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Арутюнов С.Д., Джалалова М.В., Степанов А.Г., Зязиков М.Д. Влияние уровня резекции корня зуба на величины перемещений и напряжений трансдентального имплантата и костной ткани. *Российский вестник дентальной имплантологии*. 2015; 31(1): 31–5.
2. Дмитриенко С.В., Иванов Л.П., Краюшкин А.И., Пожарицкая М.М. *Практическое руководство по моделированию зубов*. М.: ГОУ ВУНМЗ РФ; 2001.
3. Д. Норри, Ж. де Фриз. *Введение в метод конечных элементов*. М.: Изд-во Мир; 1981.
4. Зенкевич О., Морган К. *Конечные элементы и аппроксимация*. М.: Изд-во Мир; 1986.
5. Соловьев М.М., Лисенков В.В., Демидова И.И. Биомеханические свойства тканей пародонта. *Стоматология*. 1999; 3: 61–7.
6. Eroshin V.A., Dzhahalova M.V. Stress-strain state of the biomechanical system implant – elastic base. *Russian Journal of Biomechanics*. 2012; 16(3): 70–81.

Поступила 09.11.15

REFERENCES

1. Arutyunov S.D., Dzhahalova M.V., Stepanov A.G., Zyazikov M.D. The tooth root resection level influence on the values of displacements and stresses of trans-dental implant and bone tissue. *Russian Bulletin of dental implantology*. 2015; 31(1): 31–5. (in Russian)
2. Dmitrienko S.V., Ivanov L.P., Krayushkin A.I., Pozharickaya M.M. A Practical Guide to Modeling of teeth. Moscow: GOU VUNMZ RF; 2001. (in Russian)
3. Norri D., de Friz Zh. *Introduction to the finite element method*. Moscow: Publishing “Mir”; 1981. (in Russian)
4. Zienkiewicz O., Morgan K. *Finite elements and approximation*. Moscow: Publishing “Mir”; 1986. (in Russian)
5. Solov'ev M.M., Lisenkov V.V., Demidova I.I. Biomechanical properties of periodontal tissues. *Stomatologiya*. 1999; 3: 61–7. (in Russian)
6. Eroshin V.A., Dzhahalova M.V. Stress-strain state of the biomechanical system implant - elastic base. *Russian Journal of Biomechanics*. 2012; 16(3): 70–81.

Received 09.11.15

К ст. Лебеденко И.Ю. и соавт.

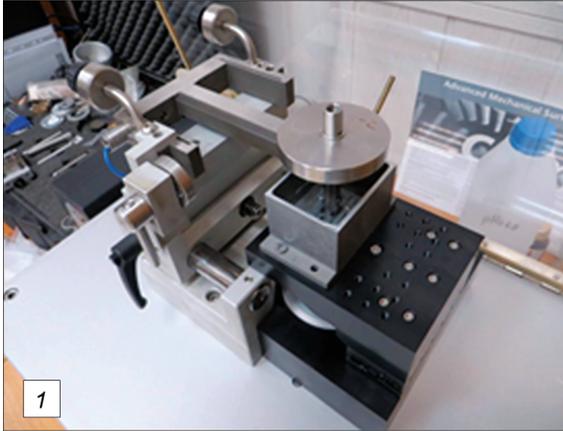


Рис. 1. Автоматизированная машина трения (трибометр) TRIBOMETER.



Рис. 3. Оптический микроскоп в составе адгезиметра Revetest.

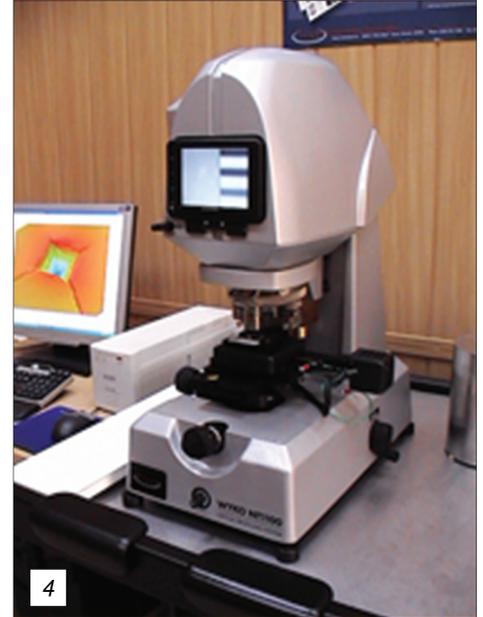


Рис. 4. Оптический профилометр WYKO NT1100.

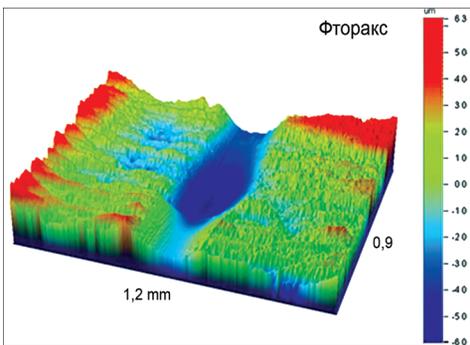


Рис. 11. Трехмерное изображение бороздки износа образца базиса зубного протеза из пластмассы «Фторакс» без покрытия.

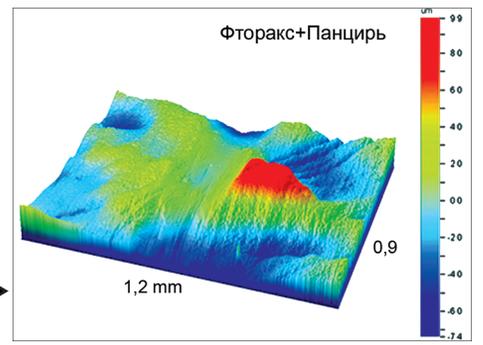


Рис. 13. Трехмерное изображение бороздки износа образца базиса зубного протеза из пластмассы «Фторакс» с покрытием «Панцирь».

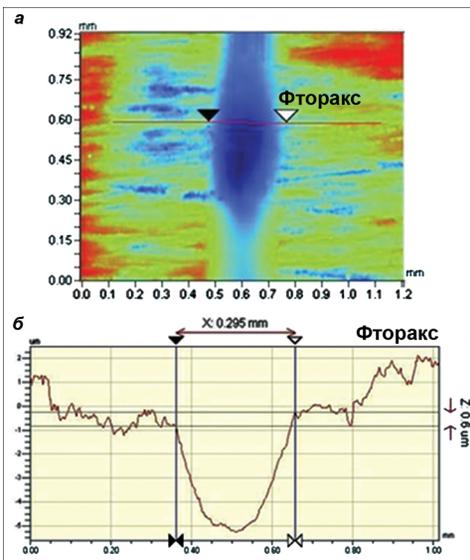


Рис. 12. Двухмерная (а) и графическая (б) профилограммы бороздки износа образца базиса зубного протеза из пластмассы «Фторакс» без покрытия.

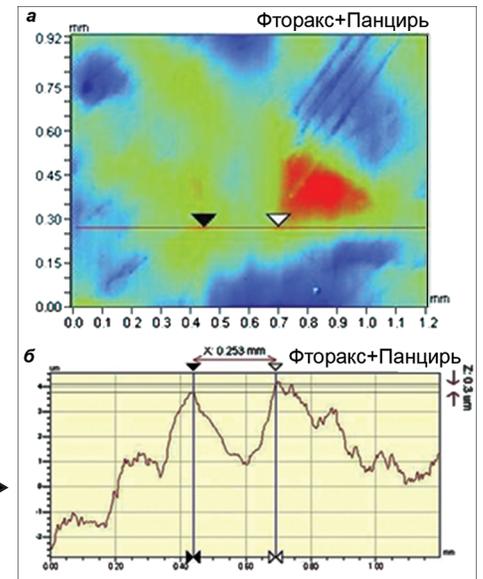
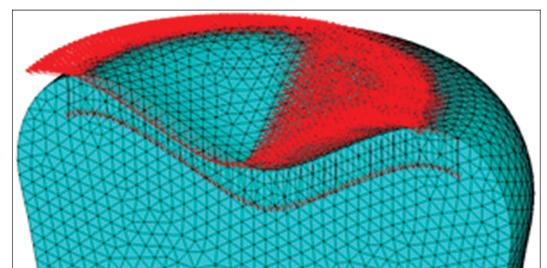


Рис. 14. Двухмерная (а) и графическая (б) профилограммы бороздки износа образца базиса зубного протеза из пластмассы «Фторакс» с покрытием «Панцирь».

К ст. Зязикова М.Д. и соавт.

Рис. 1. Нагрузка  $F = 50 \text{ Н}$  под углом  $45^\circ$  на окклюзионную поверхность зуба.



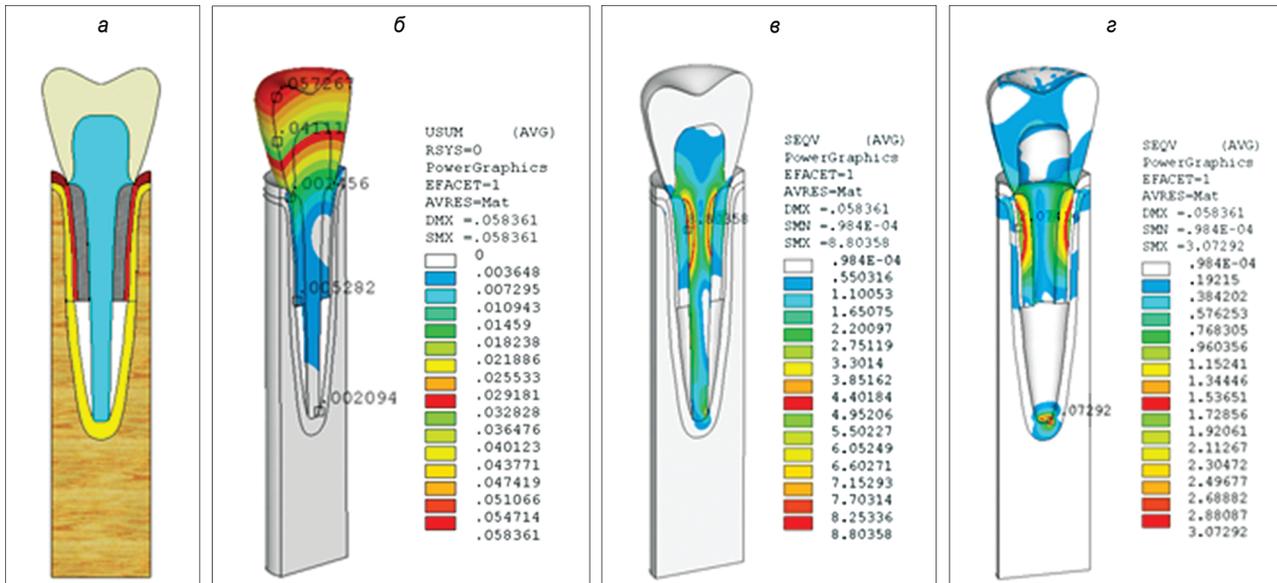


Рис. 2. Схема ТДИ.

1-й этап (а); суммарное перемещение основания имплантата по осям XYZ:  $\Delta_{xyz}$  основания ТДИ = 0,002094 мм = 2,094 мкм (б); значения напряжений по Мизесу в имплантате  $\sigma_{max} = 8,8036 \text{ кг/мм}^2 = 88,036 \text{ МПа}$  (в); значения напряжений по Мизесу в дентине  $\sigma = 20,74 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{max} = 30,73 \text{ МПа}$  – под имплантатом (г).

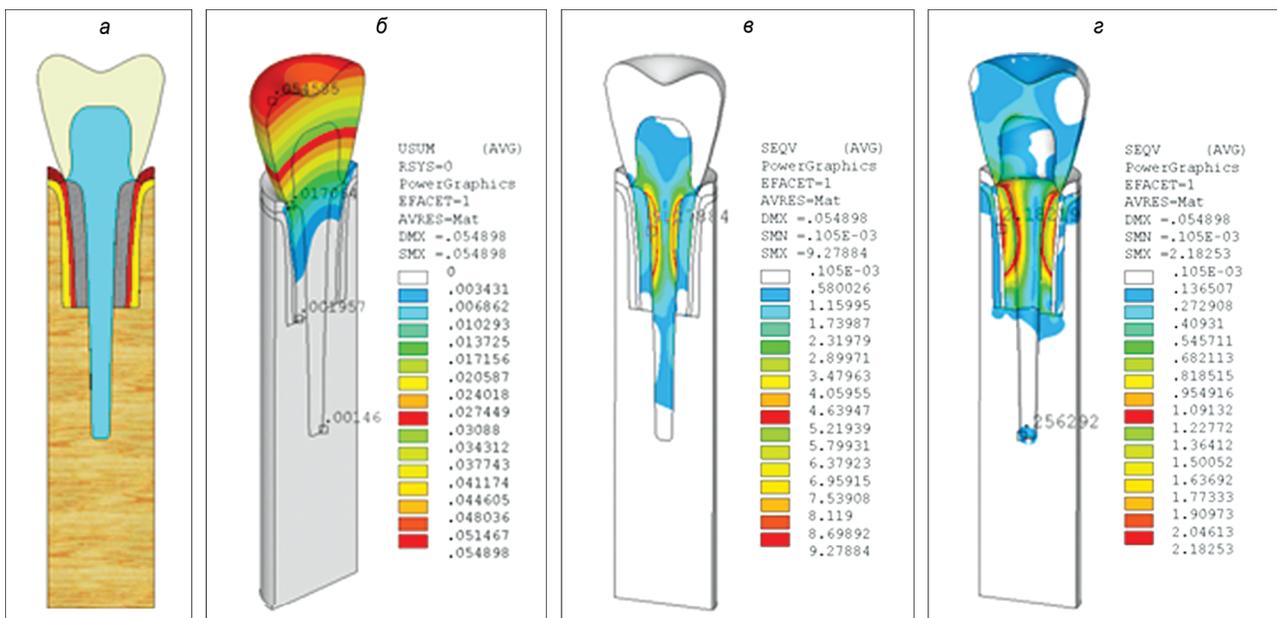


Рис. 3. Схема ТДИ.

2-й этап (а); суммарное перемещение основания имплантата по осям XYZ:  $\Delta_{xyz}$  основания ТДИ = 1,46 мкм (б); значения напряжений по Мизесу в имплантате  $\sigma_{max} = 9,27884 \text{ кг/мм}^2 = 92,79 \text{ МПа}$  (в); значения напряжений по Мизесу в дентине  $\sigma = 21,82 \text{ МПа}$  и  $\sigma_{max} = 25,63 \text{ МПа}$  – под имплантатом (г).

К ст. Верховского А. Е. и соавт.

Рис. 1. Забор материала с изучаемых биотопов.

а – со слизистой оболочки щеки, б – с задней трети спинки языка, в – со слизистой оболочки альвеолярного отростка, г – ротовой жидкости из подъязычной области.

