

УДК 004.921

Ю.Д. Васильева

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛИЦА ПАЦИЕНТА НА ОСНОВЕ БОКОВЫХ ОРТОГНАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ

Приводятся методы прогнозирования профиля лица пациента после лечения зубочелюстных аномалий. Они основываются на поиске оптимального профиля из базы данных ортогнатических моделей, ближайшего к профилю лица пациента после планируемого лечения. Практическая реализация методов позволяет на стадии предварительной диагностики показать пациенту его лицо после планируемого лечения и может быть полезна специалистам-ортодонтам для составления и корректировки плана лечения.

Введение

Зубочелюстные аномалии и нарушения строения зубочелюстной системы встречаются очень часто. Они отражаются на гармонии лицевого скелета, их следствием могут быть эстетические отклонения и развитие пародонтоза [1]. Лечат зубочелюстные аномалии с помощью различных ортодонтических аппаратов, а в сложных случаях прибегают к хирургическому вмешательству.

Существует ряд параметров пропорций лица, которые определяют гармонию лицевого профиля. Термин «гармония профиля» используется в настоящей работе в соответствии с основными понятиями о пропорции лица [2].

Перед лечением зубочелюстных аномалий (ортодонтическим лечением) специалист в зависимости от характера заболевания строит предварительный прогноз положения скелетных тканей лица. В процессе лечения важно предоставить пациенту визуальную информацию о его будущей внешности, о том, как будет выглядеть его лицо (граница мягких тканей) после изменения положения скелетных тканей (границы лицевого скелета).

Задача состоит в разработке метода и алгоритма, которые показывают, как будет выглядеть профиль лица пациента после планируемого ортодонтического лечения, имея только боковую телерентгенограмму черепа пациента [3] и базу данных боковых телерентгенограмм ортогнатических моделей (с гармоничным профилем).

Аналогичная тема затрагивается в работе В.Н. Трезубова [4], который при лечении больных с зубочелюстными аномалиями использует для прогнозирования мягких тканей лица фотографию пациента и программу двухмерного редактора. Прогноз строится специалистом вручную, а основное внимание уделяется построению и планированию скелетной границы.

В Берлине велась работа над проектом CAS [5], цель которого заключалась в точном моделировании хирургического вмешательства на трехмерных моделях лица пациента. В реальном времени хирург может изменять участок зубочелюстной системы и все изменения отражаются на лицевом профиле мягких тканей. Похожая работа была и у Erwin Keeve, Sabine Girod и Bernd Girod, которые визуализируют внешний вид пациента после челюстно-лицевой хирургии [6].

1. Постановка задачи

Необходимо разработать компьютерные методы и алгоритмы, которые в двухмерной среде показывают, как будет выглядеть профиль лица пациента после планируемого ортодонтического лечения. Рассматриваемые методы и алгоритмы основаны на использовании боковой телерентгенограммы (далее ТРГ) головы пациента и базы данных ортогнатических точечных моделей, которая создается заранее и постоянно пополняется. ТРГ представляет собой данные в двухмерной среде, и все расчеты и визуализация выполняются на боковой проекции.

Решение поставленной задачи включает следующие этапы:

- 1) структурирование базы данных ортогнатических моделей и формирование данных о пациенте;

- 2) выбор критериев подобия скелетных кривых;
- 3) поиск ближайшего профиля из базы данных боковых телерентгенограмм головы ортогнатических моделей к профилю лицевого скелета головы пациента;
- 4) корректировку предварительного положения кожного профиля лица пациента.

При выполнении исследований использована база данных ортогнатических моделей, представленных в виде точечных моделей.

Будем считать, что каждая ТРГ без существенной потери данных может быть заменена точечной моделью. Точечная модель представляет собой набор характерных точек профильной ТРГ. Рассматриваются только характерные точки, расположенные в области зубочелюстной системы, так как профиль лица после лечения зубочелюстных аномалий подвергается значительным изменениям только в этой части.

В ОИПИ НАН Беларуси разработаны методы построения индивидуальных и обобщенных норм лицевого скелета пациента после планируемого лечения зубочелюстных аномалий. Методы были предложены в рамках выполнения работы по автоматизированной диагностике и планированию лечения зубочелюстных аномалий Г.М. Левиным, Л.Н. Ламбиным, И.В. Токаревичем, Э.М. Мельниченко, О.П. Чудаковым и А.В. Глинником [7]. При прогнозировании была использована полученная авторами индивидуальная норма пациента в виде точечной модели, которая отражает приближенную форму скелетной границы профиля лица при прогнозируемом лечении. Задача сводится к формированию прогноза положения мягких тканей лица пациента относительно прогнозируемой формы индивидуальной нормы.

2. Этапы прогнозирования

Рассмотрим этапы прогнозирования более подробно.

1. *Структурирование базы данных ортогнатических моделей и формирование данных о пациенте.* Предлагаемый в работе метод прогнозирования положения мягких тканей лица пациента основан на поиске профиля в базе данных ортогнатических моделей (далее БД), похожего на индивидуальную норму лицевого скелета пациента. С этой целью была использована экспериментальная БД, которая создана заведующим кафедрой ортодонтии Белорусского государственного медицинского университета профессором И.В. Токаревичем. БД состоит из боковых ТРГ ортогнатических моделей, которые заменяются точечными моделями на лицевом скелете и кожном профиле.

Предполагается, что уже имеется некоторый набор ортогнатических моделей, образующих БД. Для ее корректировки предусматривается возможность добавления или удаления данных. Пополнение БД положительно влияет на получение конечного результата, так как при этом увеличивается вероятность нахождения лучшей ортогнатической модели, по форме приближенной к индивидуальной норме скелетного профиля лица пациента.

После формирования БД собирается информация о пациенте, которая включает боковую ТРГ головы, скелетную кривую до лечения (рис. 1, кривая 1), индивидуальную норму пациента (рис. 1, кривая 3), а также кожную кривую до лечения (рис. 1, кривая 2).

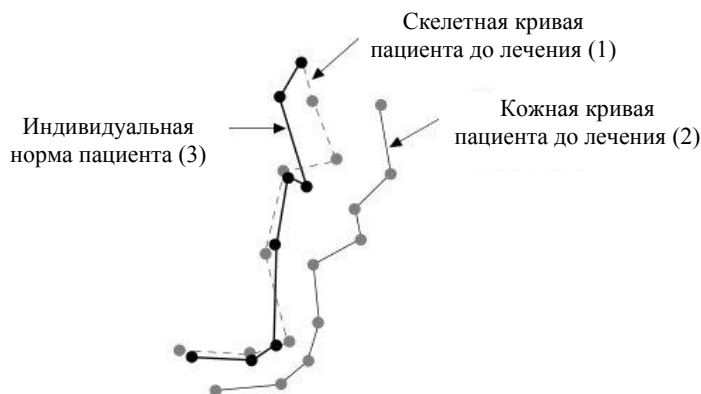


Рис. 1. Данные о пациенте

2. *Выбор критериев подобия скелетных кривых.* После формирования БД ортогнатических моделей и данных о пациенте необходимо в БД найти объект, который меньше всего отличался бы по «упитанности» (толщине мягких тканей) от модели лица пациента и скелетная кривая которого наименее отличалась бы от индивидуальной нормы пациента, представленной в виде кривой.

Для отбора критериев, приемлемых для решения поставленной задачи, были рассмотрены 27 скелетных кривых из БД. Затем совместно с группой экспертов были выбраны четыре критерия, оказывающих основное влияние на принятие решения: площадь между скелетной кривой из БД и индивидуальной нормой пациента; максимальное расстояние между соответствующими точками скелетных кривых; отношение площадей фигур, образованных кожной и скелетной кривыми пациента до лечения и кожной и скелетной кривыми из БД; сумма квадратов расстояний между соответствующими точками скелетных кривых.

Перед вычислением значений критериев предварительно выполняются преобразования данных, позволяющие устранить возможные погрешности, возникающие при подготовке данных о пациенте, а также данных в БД.

Таким образом, степень близости между скелетными кривыми лица пациента и лица из БД решено вычислять с применением следующих критериев:

- площади между скелетной кривой из БД и индивидуальной нормой пациента;
- максимального расстояния между соответствующими точками скелетных кривых из БД и индивидуальной нормой пациента;
- отношения площадей между скелетной и кожной кривыми пациента и скелетной и кожной кривыми из БД;
- суммы квадратов расстояний между соответствующими точками скелетных кривых из БД и индивидуальной нормой пациента.

В приведенной формулировке рассматриваемая задача является многокритериальной с использованием четырех критериев и решается с помощью метода последовательных уступок.

Для отыскания в БД кривой, ближайшей к индивидуальной норме пациента, на первом шаге было выполнено совмещение положения конечных вершин рассматриваемых кривых. Однако такое положение скелетной кривой из БД не обеспечивает ее положения относительно индивидуальной нормы пациента, при котором площадь между ними является минимальной. В связи с этим на следующем этапе применяется метод случайного поиска положения скелетной кривой из БД относительно индивидуальной нормы пациента с вычислением площади, заключенной между этими кривыми. Наименьшее из полученных значений площади для всех построенных случайных положений скелетной кривой из БД принимается за приближенное значение искомой площади. Скелетная кривая из БД, для которой найденное этим методом приближенное значение площади является минимальным, считается ближайшей к индивидуальной норме пациента.

Преобразования координат применяются к ближайшей скелетной кривой и кожной кривой из БД.

Для вычисления площади фигуры, образованной скелетной кривой объекта из БД и индивидуальной нормой пациента, используется известный метод вычисления площади произвольной односвязной или многосвязной области, ограниченной ломаной линией, вершины которой упорядочены вдоль границы области:

$$S_j = \frac{1}{2} \left| \sum_{i=1}^{n-1} (y_i + y_{i+1}) \times (x_{i+1} - x_i) \right|, \quad (1)$$

где i – номера вершин кривой, ограничивающей общую область; j – номер кривой из БД.

Предварительно вычисляются все точки самопересечения граничной кривой, и все вершины ломаных вместе с точками их самопересечения упорядочиваются вдоль ориентированной границы области таким образом, чтобы область всегда оставалась по одну сторону от ее границы. Среди всех полученных результатов выбирается то положение j -й кривой из БД, для которого вычисленная площадь S_j окажется минимальной.

Значение второго критерия представляет собой максимальное расстояние между соответствующими вершинами скелетных кривых из БД и индивидуальной нормой пациента:

$$d_j = \max_i \sqrt{(x_i - x_{i,j})^2 + (y_i - y_{i,j})^2}, \quad (2)$$

где i – номера вершин скелетных кривых; j – номер кривой из БД; (x_i, y_i) – координаты i -й вершины скелетной кривой пациента; $(x_{i,j}, y_{i,j})$ – координаты i -й вершины j -й скелетной ломаной из БД.

Третий критерий рассчитывается исходя из сформированных точечных моделей и определяется как отношение площади фигуры, ограниченной индивидуальной нормой пациента и кожной кривой пациента до лечения $S_{\text{пац}}$, к площади фигуры, ограниченной кожной и скелетной кривыми из БД $S_{\text{бд},j}$:

$$K_j = S_{\text{пац}} / S_{\text{бд},j}. \quad (3)$$

Если полученное значение оказывается меньшим единицы, то в качестве значения третьего критерия принимается обратная величина:

$$K_j = S_{\text{бд},j} / S_{\text{пац}}. \quad (4)$$

Четвертый критерий определяется как сумма квадратов расстояний между соответствующими вершинами скелетной кривой пациента и j -й кривой из БД:

$$D_j = \sum_{i=1}^n ((x_i - x_{i,j})^2 + (y_i - y_{i,j})^2). \quad (5)$$

3. Поиск ближайшего профиля из базы данных боковых ТРГ головы ортогнатических моделей к профилю лицевого скелета головы пациента. Выбор ближайшей кривой из БД решается как многокритериальная задача с помощью метода последовательных уступок [8]. Для этого вначале все частные критерии упорядочиваются в порядке их относительной важности. Затем многокритериальная задача сводится к поочередной оптимизации частных критериев и выбору величин уступок.

Поиск ближайшего профиля осуществляется в следующей последовательности:

1. Решается задача однокритериальной оптимизации по главному критерию. Для этого из БД выбирается та скелетная кривая, у которой площадь S_j между ней и скелетной кривой пациента является минимальной:

$$Y_1 = \min \{S_j \mid j = 1, \dots, N\}, \quad (6)$$

где N – число объектов в БД.

Назначается допустимая уступка Δ_1 по главному критерию. Данная уступка обычно выбирается в пределах от нескольких процентов до 20–30 % значения главного критерия. После решения этой задачи для последующего рассмотрения остаются только те объекты из БД, для которых площадь между скелетными кривыми оказывается меньше значения $Y_{1,\text{max}} = Y_1 \times (1 + \Delta_1)$. Пусть остается N_1 объектов, образующих множество J_1 объектов. В экспериментальных расчетах уступка Δ_1 по главному критерию была назначена в пределах 20 %.

2. Решается задача однокритериальной оптимизации по второму частному критерию и получается ее значение Y_2 . Им будет минимальное значение максимального расстояния d_{j_1} между соответствующими точками скелетных кривых:

$$Y_2 = \min d_{j_1}; \quad j_1 = 1, \dots, N_1; \quad j_1 \in J_1. \quad (7)$$

Дополнительным ограничением для решения второй оптимизационной задачи является то, что значение площади между скелетными кривыми не превышает $Y_{1,\max}$.

Назначается допустимая уступка Δ_2 по второму критерию и для последующего рассмотрения остаются только те объекты из ранее оставшихся, для которых значение второго критерия не превышает $Y_{2,\max} = Y_2 \times (1 + \Delta_2)$. Пусть остается N_2 объектов, образующих множество J_2 объектов. Значение второй уступки также назначается в пределах 20 %.

3. Решается задача однокритериальной оптимизации по третьему критерию и получается ее значение Y_3 . Им будет минимальное значение отношения K_{j_2} площадей мягких тканей лица пациента и объекта из БД:

$$Y_3 = \min K_{j_2}, \quad j_2 = 1, \dots, N_2; \quad j_2 \in J_2. \quad (8)$$

Назначается допустимая уступка Δ_3 по третьему критерию и для последующего рассмотрения остаются только те объекты из ранее оставшихся, для которых значение третьего критерия не превышает $Y_{3,\max} = Y_3 \times (1 + \Delta_3)$. Пусть остается N_3 объектов, образующих множество J_3 объектов. Значение третьей уступки назначается в пределах 25 %.

4. Решается последняя задача однокритериальной оптимизации по четвертому критерию и получается ее значение Y_4 . Им будет минимальное значение суммы квадратов расстояний D_{j_3} между соответствующими точками скелетной кривой пациента и скелетными кривыми из БД, оставшимися для рассмотрения:

$$Y_4 = \min D_{j_3}, \quad j_3 = 1, \dots, N_3; \quad j_3 \in J_3. \quad (9)$$

Назначается допустимая уступка Δ_4 по четвертому критерию. Из последующего рассмотрения исключаются те из оставшихся объектов, для которых сумма квадратов расстояний D_{j_3} между скелетной кривой пациента и скелетными кривыми из БД превышает $Y_{4,\max} = Y_4 \times (1 + \Delta_4)$. Значение последней уступки назначается в пределах 30 %.

В таблице представлены значения всех приведенных выше критериев для одного пациента и 27 объектов из БД.

Значения критериев для одного пациента

Площадь между скелетными кривыми S_j	Максимальное расстояние d_j	Отношение толщин K_j	Сумма квадратов расстояний D_j
1002,505	21,642	1,068 781	1256,573
958,642	20,855	1,096 564	1172,294
545,193	9,676	1,032 931	266,473
736,525	12,625	1,291 805	444,535
726,321	13,483	1,049 883	483,408
1605,011	19,682	1,256 068	1116,911
873,733	25,05	1,38 589	1607,09
1007,205	23,798	1,358 522	1214,599
428,858	15,015	1,006 286	546,411
365,42	6,721	1,061 035	211,832
415,202	20,408	1,056 051	687,433
416,465	18,297	1,13 687	962,511
553,415	15,107	1,138 043	571,674
903,687	18,536	1,087 324	1202,061
762,275	15,878	1,045 207	511,406
1001,965	14,786	1,537 603	633,654
1124,439	22,241	1,046 383	1464,742
983,494	13,926	1,212 628	588,067
825,625	21,214	1,020 796	1416,755
745,422	17,779	1,079 085	594,597

Окончание таблицы

Площадь между скелетными кривыми S_i	Максимальное расстояние d_i	Отношение толщин K_i	Сумма квадратов расстояний D_i
723,247	10,003	1,203 471	486,251
589,028	10,789	1,131 483	424,922
360,426	6,074	1,093 208	230,528
413,682	7,039	1,174 628	369,207
1042,225	22,336	1,100 846	1634,359
372,647	7,184	1,363 723	340,492
1260,348	19,353	1,530 603	1219,581

Оптимальной считается любая стратегия, которая будет получена после вычисления оптимального значения последнего частного критерия. Если, по мнению специалиста, результат является не вполне удовлетворительным, то он может изменить значения уступок и повторить вычисления методом уступок.

После нахождения в БД объекта, ближайшего к индивидуальной норме пациента, определяется кожный профиль лица (рис. 2).

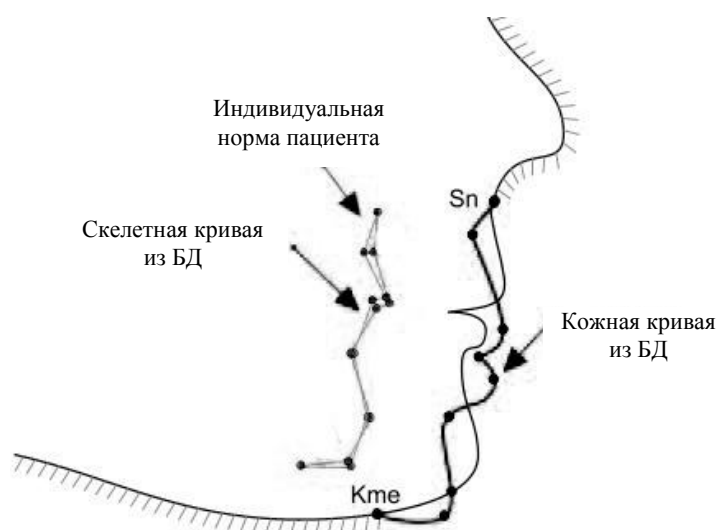


Рис. 2. Совмещение выбранных из БД кожной и скелетной кривых с индивидуальной нормой и кожным профилем пациента

Выбранный профиль подвергается преобразованиям в соответствии с преобразованиями, примененными к скелетной кривой объекта из БД. Преобразованный профиль принимается за предварительное положение кожного профиля лица пациента после планируемого лечения.

4. *Корректировка предварительного положения кожного профиля лица пациента.* Индивидуальная норма пациента отличается от выбранной скелетной кривой объекта из БД. Поэтому найденное положение мягких тканей лица пациента должно быть скорректировано в соответствии с его индивидуальной нормой.

Корректировка осуществляется в два этапа. На первом этапе вычисляются векторы между соответствующими точками на скелетной кривой объекта из БД и индивидуальной нормой пациента. Затем определяется соответствующая им точка на кожной кривой из БД и смещается на тот же вектор. Таким образом получается прогнозируемое положение точек на кожной кривой пациента после лечения.

На втором этапе смещаются промежуточные точки на кожном профиле лица пациента до лечения, расположенные между соответствующими точками на кожной кривой (рис. 3). Величина смещения определяется величиной вектора, рассчитанной по формуле

$$\bar{V}_i = \bar{V}_1 + \frac{i-1}{n_1-1}(\bar{V}_2 - \bar{V}_1), \quad 1 \leq i \leq n_1, \quad (10)$$

$$\bar{V}_j = \bar{V}_i,$$

где \bar{V}_i – вектор, на который смещается i -я промежуточная точка на скелетном профиле из БД для получения соответствующей промежуточной точки индивидуальной нормы пациента. На этот же вектор следует сместить соответствующую промежуточную точку профиля лица из БД (рис. 3, вектор \bar{V}_j).

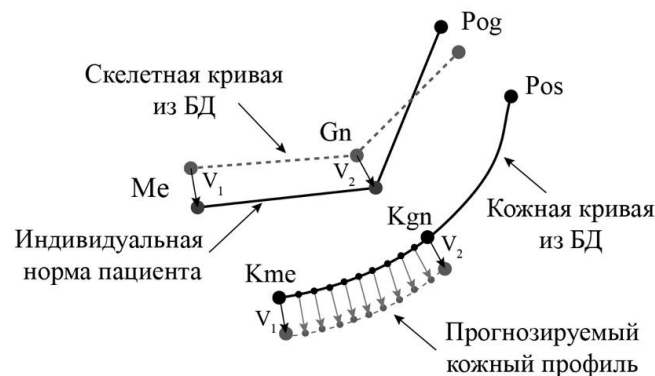


Рис. 3. Корректировка положения кожной кривой из БД

Найденный лицевой профиль считается прогнозируемым профилем мягких тканей лица пациента после планируемого лечения.

3. Результаты экспериментальных исследований

Экспериментальные исследования проводились на кафедре стоматологии Белорусского государственного медицинского университета. Были рассмотрены десять пациентов, которые уже прошли лечение и после лечения имели гармоничный профиль лица. Оценка проводилась путем наложения прогнозируемого профиля лица, полученного в результате моделирования, на профиль реального лица после лечения (рис. 4). Таким образом была проверена результативность методики прогнозирования на боковой ТРГ головы. Проведенные исследования показали достаточно высокую степень совпадения результатов моделирования с результатами лечения.

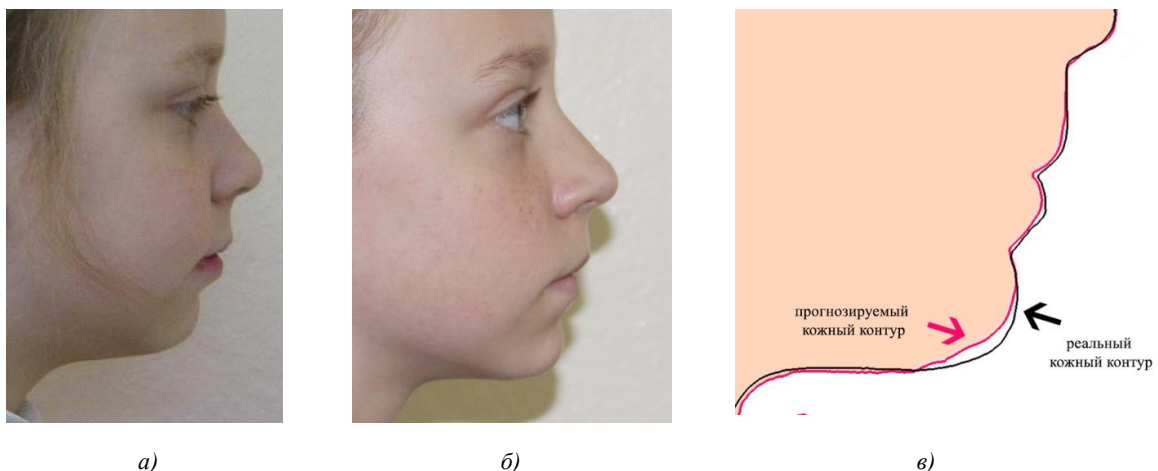


Рис. 4. Визуальная оценка соответствия прогнозируемого положения мягких тканей на примере одного пациента: а) до лечения; б) после лечения; в) сравнение результатов

Заключение

В работе предлагается метод поиска профиля из БД ортогнатических моделей, ближайшего к профилю лица пациента после планируемого лечения. Для этого анализируется индивидуальная норма пациента и кожные и скелетные кривые из БД. БД состоит из боковых ТРГ головы и соответствующего им набора скелетных и кожных точечных моделей. Поиск ближайшего профиля выполняется с помощью метода последовательных уступок с многократным применением следующих критериев: площади между скелетными кривыми; максимального расстояния между соответствующими точками скелетных кривых; суммы квадратов расстояний между соответствующими точками скелетных кривых; отношения площадей фигур, образованных скелетными и кожными кривыми пациента и объекта из БД.

Разработан также метод прогнозирования положения мягких тканей лица пациента на основе боковой ТРГ головы. Найденный в БД ближайший профиль накладывается на лицо пациента с дополнительными корректировками для индивидуализации формы, что позволяет специалисту на стадии диагностики показать пациенту его будущую внешность. Методы ориентированы на пациентов, при лечении которых используются аппаратные методы без хирургического вмешательства.

Список литературы

1. Методы лечения зубочелюстных аномалий / Стоматологический информационный портал [Электронный ресурс]. – 2009. – Режим доступа : <http://stomfak.ru/ortodontiya/metody-lecheniya-zubochelyustnyh-anomalij.html?ite mid=76>. – Дата доступа : 25.04.2013.
2. Талалаева, Е.В. Оценка эстетики лица у лиц с физиологической окклюзией зубных рядов при помощи 3D-сканер-системы : автореф. дис. ... канд. мед. наук : 14.01.14 / Е.В. Талалаева; Московский гос. медико-стоматол. ун-т. – М., 2012. – 22 с.
3. Палов, Н.А. Рентгенодиагностика / Н.А. Палов, А.З. Гингольд, К.А. Москачева. – М. : МЕД пресс-информ, 1999. – 556 с.
4. Трезубов, В.Н. Планирование и прогнозирование лечения больных с зубочелюстными аномалиями / В.Н. Трезубов, Р.А. Фадеев – М. : МЕД пресс-информ, 2005. – 224 с.
5. Computer aided planning for orthognatic surgery / M. Chabanas [et al.] // Proc. of the 16th Intern. congress and exhibition «Computer Assisted Radiology and Surgery». – Italy, 2002. – P. 12–14.
6. Anatomy-based facial tissue modeling using the finite element method / E. Keeve [et al.] // Proc. of the 7th conf. on visualization '96. – USA, 1996. – P. 21–28.
7. Автоматизированная диагностика и планирование лечения зубочелюстных аномалий / Л.Н. Ламбин [и др.]. – Минск : Ин-т техн. кибернетики АН Беларуси, Минск. гос. мед. ин-т, 1996. – 241 с.
8. Метод последовательных уступок [Электронный ресурс]. – 2006. – Режим доступа : <http://ref.by/refs/49/32807/1.html>. – Дата доступа : 15.01.2014.

Поступила 28.07.2015

*Институт современных знаний
им. А.М. Широкова,
Минск, ул. Филимонова, 69
e-mail: vyud@tut.by*

Y.D. Vasilyeva

**PATIENT'S FACE COMPUTER-ASSISTED SIMULATION ON THE BASIS
OF LATERAL-VIEW ORTHOGNATHIC MODELS**

Methods of predicting patient's facial profile after malocclusion treatment are considered. Methods are based on the orthognathic models data base search for the profile, demonstrating the best patient's face after the planned treatment. Practical application of these methods provides an opportunity to demonstrate the face after the planned treatment to the patient at the stage of preliminary diagnosis and can be useful for orthodontists in treatment planning and correction.