

Дж.Л. Монаци¹, М. Вулридж²¹ Группа по обработке видео и изображений компании Филипс, Эйндховен, Нидерланды² Школа здравоохранения, университет Лидса, Великобритания

Анализ ультразвуковых видеоизображений для улучшения понимания механизма грудного вскармливания

Contacts:

Gianluca Monaci, Senior Research Scientist at Philips Research

Address: Philips Research High Tech Campus 34 5656 AE Eindhoven The Netherlands

Article received: 18.06.2012, Accepted for publication: 06.12.2012

Факт, что грудное вскармливание является оптимальным как для ребенка, так и для его матери, давно доказан, однако механизмы, с помощью которых молоко поступает от матери к ребенку, до сих пор полностью не изучены. Частично это связано с отсутствием технологий для автоматического и количественного анализа конфигурации ротовой полости младенца во время кормления. В настоящей статье обсуждается 2 метода анализа видеоизображений, полученных с помощью ультразвукового исследования, для автоматического распознавания таких основных процессов, как сосание и глотание молока, а также для выделения различных типов движения языка во время кормления. Предложенные алгоритмы впервые дают представление о количественных критериях типов движений, выполняемых ребенком во время грудного вскармливания, и обещают беспрецедентный успех в данной области.

Ключевые слова: грудное вскармливание, обработка ультразвукового изображения, анализ последовательности изображений.

(Вопросы современной педиатрии. 2012; 11 (6): 64–68)

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что грудное вскармливание является более здоровым, чем кормление смесями или из бутылочки, как для ребенка, так и для матери. В исследованиях доказано, что у детей, вскармливаемых грудью, реже развиваются инфекционные поражения уха, респираторного и желудочно-кишечного тракта [1]. Грудное вскармливание положительно воздействует на развитие ротовой полости ребенка [2], а кормящие женщины менее подвержены развитию рака груди [3]. К сожалению, женщины прекращают кормление грудью по многим причинам, в т.ч. из-за желания совмещать

вскармливание ребенка с работой как во время становления кормления, так и в более поздние периоды [4]. Понимание механизмов вскармливания даст основания для разработки его оптимальных вариантов, которые помогут таким матерям продлить период кормления грудью.

Не прекращаются споры о механизмах получения младенцами молока из груди матери. Принято считать, что молоко поступает к ребенку преимущественно путем вытягивания соска в рот и циклических волнообразных нажатий на него языком и губами, что известно как их перистальтическое движение [5]. В недавно про-

G. Monaci¹, M. Woolridge²¹ Video & Image Processing, Philips Research, Eindhoven, the Netherlands² School of Healthcare, University of Leeds, UK

Ultrasound video analysis for understanding infant breastfeeding

While it has been widely proved that breastfeeding is the healthiest feeding option for a baby and its mother, the mechanisms by which a baby removes milk from the breast are still not completely known. Partly this is due to the lack of tools to analyze images of the infant oral cavity during feeding automatically and quantitatively. In this paper we propose two methods for analyzing ultrasound videos to automatically detect relevant events such sucking and swallowing of milk and to discriminate different types of tongue action during milk removal. The proposed algorithms provide, for the first time, quantitative indications of the type of activities carried out during breastfeeding by the baby, promising unprecedented advancements in the field.

Key words: breastfeeding, ultrasonic image processing, image sequence.

(Voprosy sovremennoy pediatrii — Current Pediatrics. 2012; 11 (6): 64–68)

веденном исследовании [6] авторы подвергли этот факт сомнению, утверждая, что язык младенца не совершает перистальтических движений, а движется вверх и вниз, создавая вакуум в области неба и вызывая тем самым приток молока.

В имеющихся в настоящее время работах описаны только субъективные, качественные наблюдения за движением языка младенца. Это затрудняет объективную оценку значения перистальтического или вакуумного механизма при извлечении молока. Для изучения процессов грудного вскармливания требуются объективные технологии анализа движения языка, позволяющие получать количественные критерии оценки данных феноменов.

В настоящей статье описаны методы, предназначенные для анализа последовательных ультразвуковых видеоизображений средней линии ротовой полости под подбородочной областью, полученные в процессе грудного вскармливания. Исследования были проведены в Школе здравоохранения университета Лидса. Ультразвуковое исследование (УЗИ) широко используется для анализа грудного вскармливания младенцев, поскольку является безопасным и неинвазивным методом визуализации [6, 7]. Все представленные результаты основаны на предварительном анализе первичной последовательности ультразвуковых изображений, поскольку она демонстрирует все разнообразие основных типов грудного вскармливания. Данная последовательность, состоящая приблизительно из 1500 ультразвуковых изображений, была индивидуально категоризирована специалистом в этой области (М. Вулридж, Великобритания). На рис. 1 слева представлен один из кадров указанного ультразвукового видеоизображения. На рис. 1 справа схематично обозначены основные анатомические структуры ротовой полости ребенка. На полученных последовательностях видеоизображений ребенок, как правило, выполняет одно из трех следующих действий: 1) отсутствие какой-либо активности; 2) стимуляция материнского соска без глотания молока (сосание непитательного характера или просто сосание); 3) сосание и глотание (сосание питательного характера или глотание).

В настоящей работе авторы попытались разработать метод автоматического распознавания и оптимальной классификации механизмов сосания и глотания молока из женской груди при анализе существенно искаженных ультразвуковых изображений этих процессов (таких, как представлены на рис. 1).

Поставленной задаче достигали двумя способами.

- В разделе «Распознавание сосания питательного и непитательного характера» нами представлен алгоритм автоматического распознавания и классификации сосательных и глотательных движений. Это поможет произвести количественную оценку движений ребенка во время кормления грудью. Кроме того, предложенный метод может успешно использоваться для всех исследований в данной области, поскольку он делает более эффективным визуальное изучение ультразвукового видеоматериала, которое в противном случае отнимает много времени и усилий.
- В разделе «Классификация перистальтических и вакуумных движений» предложен новый метод дифференцирования перистальтических и вакуумных движений. Вторая проблема является гораздо более сложной,

Рис. 1. Изображение, полученное при ультразвуковом исследовании средней линии подбородочной области ротовой полости ребенка (слева), и анатомические структуры ротовой полости ребенка (справа): обозначены сосок, язык и небо

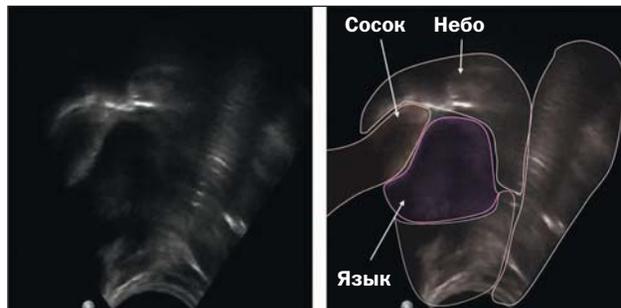
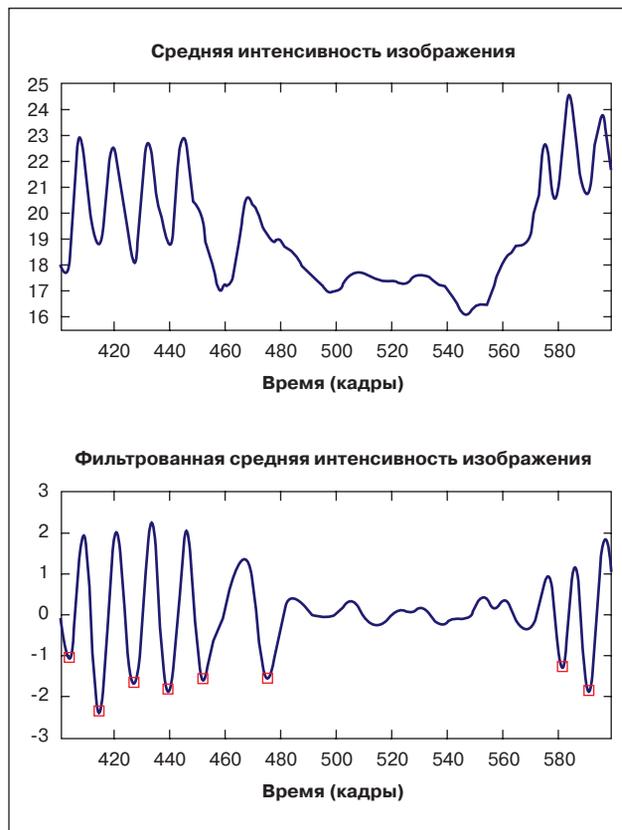


Рис. 2. Средняя интенсивность ультразвукового изображения нанесена на диаграмму функция/время (верхний график) и ее фильтрованное по полосе пропускания значение (нижний график). Локальные минимальные значения отмечены красными квадратами

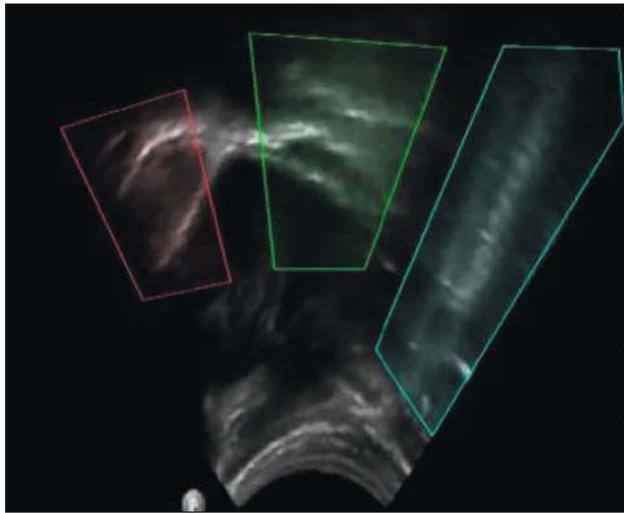


поскольку педиатры и эксперты в этой области пока еще не пришли к общему мнению относительно дифференцирования перистальтических и вакуумных движений. В нашей работе мы покажем, что результаты предложенного подхода являются весьма многообещающими.

РАСПОЗНАВАНИЕ СОСАТЕЛЬНЫХ ДВИЖЕНИЙ ПИТАТЕЛЬНОГО И НЕПИТАТЕЛЬНОГО ХАРАКТЕРА

Первое наблюдение, которое было сделано в ходе работы, заключается в том, что общая интенсивность ультразвуковых изображений изменяется с течением времени в прямой зависимости от сосательного ритма мла-

Рис. 3. Три области, использовавшиеся при проведении анализа. Сосок и передняя часть языка находятся в красной области (слева). Задняя часть языка и мягкое небо — в зеленой (посередине). Синяя область представляет собой обширный участок, в котором мы предполагаем зарегистрировать акт глотания



денца. На рис. 2 сверху показано изменение во времени средней интенсивности всего ультразвукового изображения, на котором видна часть последовательностей, представленных на рис. 1. Наиболее выраженные локальные минимальные значения данного необработанного сигнала четко соответствуют периодам активности ребенка на видеозаписи, т.е. сосанию непитательного и питательного характера.

Низкочастотные вариации интенсивности сигнала связаны главным образом с общими изменениями в изображении и отражают движение всей головы ребенка. Между тем высокочастотные колебания вызваны преимущественно артефактами. Таким образом, мы производили фильтрацию сигнала средней интенсивности по полосе пропускания (фильтр Баттерворта четвертого порядка с полосой от $0,08$ до $0,24 \times fN$, где fN — частота Найквиста). Видеосъемка производилась со скоростью 25 кадров в секунду, т.е. $fN = 12,5$ Гц. Обработанный с помощью этого фильтра средний сигнал интенсивности s нанесен на диаграмму (см. рис. 2 внизу). На рисунке локальные минимальные значения, показатели которых меньше порогового значения $T = -0,8 \times \text{std}(s) \approx -1$, отмечены красными квадратами ($\text{std}(\bullet)$ — стандартное отклонение сигнала). Эти точки строго соответствуют сигналам на видеоизображении, где ребенок выполняет сосательное или глотательное движение, хотя при анализе общего кадра эти 2 действия различить невозможно.

Для более тонкого анализа трудноразличимых феноменов, которые требовалось смоделировать, был разработан аналогичный подход, при котором изучали вариации интенсивности изображения в разных областях. Большая часть сосательных движений находится в верхней части изображения, и целью данного анализа является разграничить отдельные области, в которых происходят конкретные движения. Три области, на которых было сконцентрировано внимание, отмечены на рис. 3 красным (слева), зеленым (посередине) и синим (справа) цветом. В красном секторе находится сосок и передняя

часть языка. Зеленый сектор отображает область непосредственно под кончиком соска (на нем видна задняя часть языка и мягкое небо). Синий сектор — обширная, неспецифичная область, где мы пытаемся обнаружить движения, связанные с процессом глотания типичным образом.

В используемом методе эти 3 сектора, выбранные вручную для каждой последовательности, должны были оставаться неизменными по размеру и положению. Несмотря на то, что указанные области были фиксированы, отмечалось наличие множества шумовых сигналов, обусловленных движением головы младенца. Если в связи с этим движением отдельная анатомическая структура пересекала границу между соседними секторами, такое движение регистрировалось одновременно в обоих секторах, что искажало результаты анализа. Мы попытались исключить такую погрешность при помощи выделения промежутков между тремя секторами.

Среднюю интенсивность изображения рассчитывали для каждой области, и сигналы обрабатывали с помощью описанного выше полосового фильтра. На рис. 4 показаны необработанные и отфильтрованные сигналы средней интенсивности 3 областей, продемонстрированных на рис. 3. Сигналы фиксировали с тем же интервалом времени, что и на рис. 2.

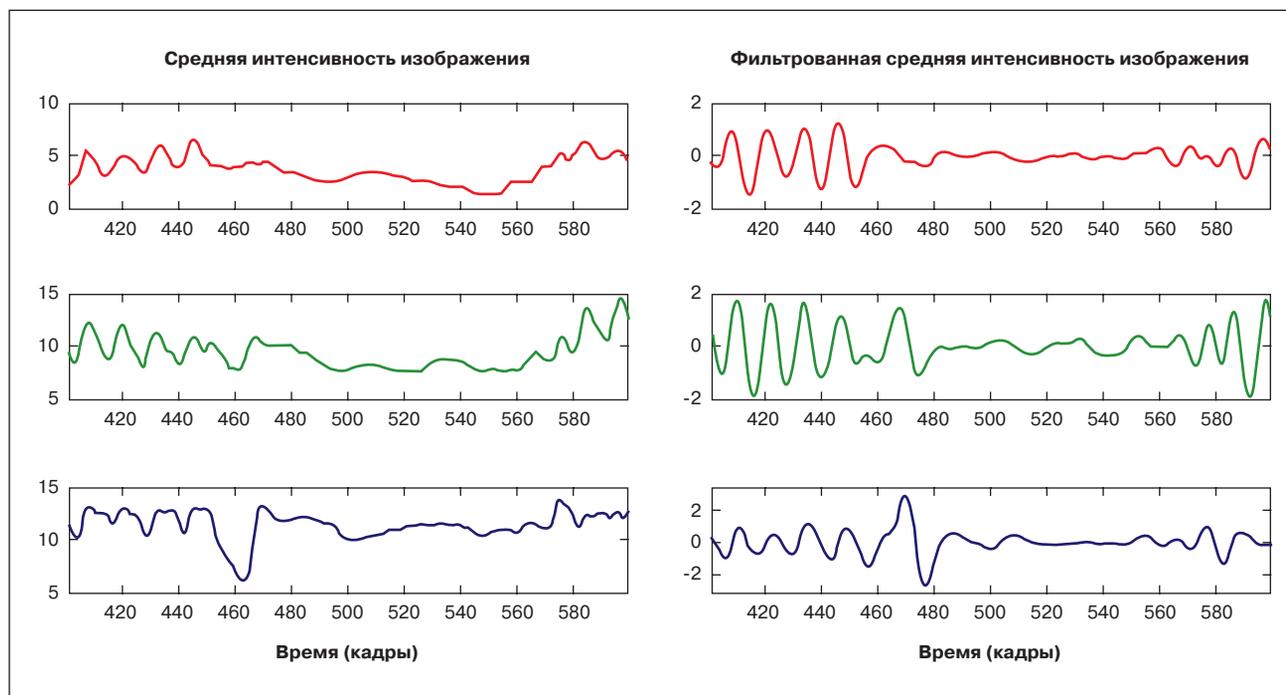
Как необработанные, так и отфильтрованные сигналы аналогичны таковым, демонстрирующим вариации интенсивности всего изображения (см. рис. 2). Так или иначе, такой анализ, основанный на выделении различных областей, позволил сделать несколько заключений. Во-первых, сигналы из красной и зеленой областей изменяются синхронно, локальные минимальные значения этих сигналов точно соответствуют сосательному движению ребенка. Средний сигнал из красной области кажется более четким, чем из зеленой, по всей последовательности (меньше ложных пиков) и более точно отражает реальную активность ребенка. Сосательные движения непитательного характера были зафиксированы по локальным минимальным значениям сигналов интенсивности, обработанным полосовым фильтром в красной области. Этот сигнал был обозначен символом r . Чтобы отфильтровать пики, связанные с артефактами, учитывали только локальные минимальные значения меньше порогового значения по формуле:

$$T_1 = -0,8 \times \text{std}(r) \approx -0,8.$$

Сигнал из синей области четко выделяет акт глотания. Интенсивность этого сигнала изменяется во времени аналогично сигналам из зеленой и красной областей, за одним явным исключением, как можно увидеть на рис. 4. Когда происходит сосательное движение питательного характера (глотание), сигнал интенсивности синей области резко падает, как и необработанный сигнал на рис. 4 (левый столбец, нижний график), приблизительно на 460-м кадре. Акт глотания характеризуется особо малыми минимальными значениями отфильтрованного сигнала средней интенсивности в синей области, обозначенного символом b . Распознаются только локальные минимальные значения меньше порогового значения по формуле:

$$T_2 = -1,5 \times \text{std}(b) \approx -2.$$

Рис. 4. Изменение средней интенсивности относительно времени (левый столбец) и отфильтрованная средняя интенсивность (правый столбец) красной (1-й график), зеленой (2-й график) и синей (3-й график) областей, продемонстрированных на рис. 3



На исследуемой последовательности были отмечены сосательные движения непитательного и питательного характера. В первой части последовательности изображений ребенок стимулирует сосок, совершая повторяющиеся сосательные движения. Однако актов глотания на данном участке зафиксировано очень мало. Затем ребенок переходит в период, в котором каждому сосательному движению соответствует акт глотания. В целом произошло 71 сосательное и 32 глотательных движения, которые и были зарегистрированы автоматическим методом. Из 71 сосательного движения, 65 распознаны правильно, а 6 были пропущены (ложноотрицательный результат) и еще 6 были расценены как сосательные, хотя в действительности акта сосания при этом не происходило (ложноположительный результат). Ложноотрицательные результаты связаны с тем, что локальные минимальные значения оказались выше порогового значения T_1 , а ложноположительные находились в первой части последовательности изображений, на которых ребенок двигался во время начала УЗИ. Из 32 глотательных движений, зарегистрированных на изображениях, 25 распознаны правильно, 7 пропущены (ложноотрицательный результат) в связи с тем, что локальные минимальные значения были выше порогового значения T_2 . Пять из этих 7 ошибок встретились на завершающих 150 кадрах последовательности, когда в начале исследования ребенок начинал двигаться, что привело к появлению на последовательности изображений большого числа артефактов. В этом случае ложноположительные распознавания отсутствовали.

Учитывая сложность распознавания и классифицирования сосательных движений питательного и непитательного характера без использования вспомогательных средств даже для экспертов, полученные результаты распознавания на исследуемых изображениях можно расценивать как многообещающие. Ключевыми параме-

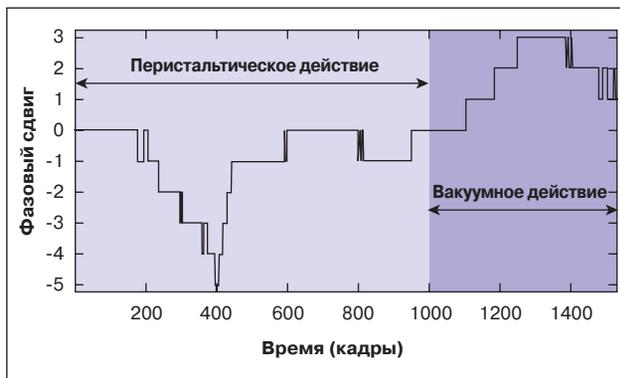
трами при этом являются пиковые пороговые значения распознавания, которые для упрощения привязывают к стандартному отклонению сигналов. Методы адаптивного определения пороговых значений для улучшения результатов распознавания [8] подлежат дальнейшему изучению.

КЛАССИФИКАЦИЯ ПЕРИСТАЛЬТИЧЕСКИХ И ВАКУУМНЫХ ДВИЖЕНИЙ

На изображениях первой фазы ребенок сосет сосок для стимуляции выделения молока. На этом этапе совершенно очевидно, что язык младенца движется аналогично характерному перистальтическому движению [5]. После этого ребенок переходит к фазе, в которой каждому сосательному соответствует глотательное движение. В это время более выражено вакуумное воздействие, и язык принимает совершенно другую форму [6]. Важно отметить, что кривые средней интенсивности в красной и зеленой областях существенно изменяются в момент перехода младенца от одной фазы к другой. Для различения перистальтического и вакуумного движений мы предлагаем анализировать фазовый сдвиг отфильтрованных средних значений интенсивности в красной и зеленой областях. Назовем их r и g , соответственно. Фазовый сдвиг между отфильтрованными сигналами интенсивности рассчитывается с помощью кросс-корреляции между сигналами с разными временными интервалами. В каждый момент времени (t) число выборок каждого сигнала (N равняется 200 или другому возможному показателю при $t < 200$) буферизуется. Для каждой задержки времени $m \in [-10, 10]$ кросс-корреляция между сигналами r и g длиной N может быть записана так:

$$R_{rg}(m) = \sum_{n=0}^{N-m-1} r(n)g(n+m).$$

Рис. 5. Фазовый сдвиг M -отфильтрованных сигналов средней интенсивности в красной и зеленой областях (см. рис. 3), нанесенных на диаграмму в виде функции времени. Во время перистальтического действия $M \leq 0$, а во время вакуумного — $M > 0$



Примечание. M — фазовый сдвиг.

Фазовый сдвиг M между r и g после этого оценивали как временной сдвиг, при котором корреляция между двумя сигналами является максимальной:

$$M = \arg \max_m \epsilon [-10, 10] R_{rg}(m).$$

На рис. 5 расчетный фазовый сдвиг M для исследуемой последовательности представлен как функция времени. Один из авторов (М. Вулридж) прокомментировал последовательность, изображенную на рис. 5, следующим образом: «На первых 1000 кадрах доминантным действием ребенка является перистальтическое, а на остальных 500 доминантное действие ближе к вакуумному. Во время первой фазы пики интенсивности в красной области происходят раньше или одновременно с таковыми в зеленой области, как видно по фазовому сдвигу M между r и g , которые равны нулю или имеют отрицательное значение. При переходе к вакуумным движениям, связанным с более интенсивными

глотательными актами, пики интенсивности в зеленой области обычно предшествуют пикам в красной области, и $M > 0$. Фазовый сдвиг между двумя сигналами, по всей видимости, отражает действие, производимое ребенком во время кормления грудью. Вероятно, фазовый сдвиг связан с изменением конфигурации языка во время 2 фаз: при перистальтическом воздействии язык принимает дугообразную форму и движется слева направо [5], тогда как во время вакуумного действия язык движется вверх–вниз, принимая при этом более плоскую форму» [6].

Предложенный метод позволяет определить число перистальтических и вакуумных движений во время кормления простым измерением фазового сдвига между сигналами r и g .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей статье описано 2 метода анализа ультразвуковых видеоизображений для объяснения механизмов, лежащих в основе грудного вскармливания. Впервые предложен также алгоритм автоматического распознавания глотательных и сосательных движений с помощью анализа интенсивности изображений в отдельных областях. Также представлены способы отличия перистальтических и вакуумных движений на основании анализа фазового сдвига между сигналом средней интенсивности изображения, который возникает при движении передней или задней части языка младенца. Результаты анализа маркированных последовательностей более чем 1500 ультразвуковых изображений являются весьма информативными: предложенные методы впервые дают возможность количественно отобразить типы движений, производимых ребенком во время сосания. С учетом представленных данных вся текущая и последующая работа должна концентрироваться на проверке этих результатов. Это может быть достигнуто путем использования описанных методов на более обширной базе ультразвуковых видеоизображений, собранных в Школе здравоохранения университета Лидса.

REFERENCES

1. Hanson L. Breastfeeding provides passive and likely longlasting active immunity. *Ann. All. Asthma Immunol.* 1998; 81 (6): 523–533.
2. Palmer B. The influence of breastfeeding on the development of the oral cavity: a commentary. *J Hum. Lact.* 1998; 14 (2): 93–98.
3. Collaborative Group on Hormonal Factors in Breast Cancer, Breast cancer and breastfeeding: collaborative reanalysis of individual data from 47 epidemiological studies in 30 countries, including 50302 women with breast cancer and 96973 women without the disease. *Lancet.* 2002; 360 (9328): 187–195.
4. Ahluwalia I.B., Morrow B., Hsia J. Why do women stop breastfeeding? Findings from the pregnancy risk assessment and monitoring system. *Pediatrics.* 2005; 116 (6): 1408–1412.
5. Woolridge M.W. The anatomy of infant sucking. *Midwifery.* 1986; 2 (4): 164–171.
6. Geddes D.T., Kent J.C., Mitoulas L.R., Hartmann P.E. Tongue movement and intra-oral vacuum in breastfeeding infants. *Early Human Development.* 2008; 84 (7): 471–477.
7. Jacobs L.A., Dickinson J.E., Hart P.D., Doherty D.A., Faulkner S.J. Normal nipple position in term infants measured on breastfeeding ultrasound. *J. Hum. Lact.* 2007; 23 (1): 52–59.
8. Sik Shin H., Lee C., Lee M. Adaptive threshold method for the peak detection of photoplethysmographic waveform. *Computers in Biology and Medicine.* 2009; 39 (12): 1145–1152.