

УДК 612.216

**СООТВЕТСТВИЕ МЕЖДУ ИЗМЕРЕНИЕМ ЧАСТОТЫ ДЫХАНИЯ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОКАРДИОГРАФИЧЕСКОГО МЕТОДА
И ФОТОПЛЕТИЗМОГРАФИИ С ДАННЫМИ, ПОЛУЧЕННЫМИ С ПОМОЩЬЮ
ПНЕВМОГРАФИИ**

Димитриев Д.А., Индейкина О.С., Сушков И.А.

ФГБОУ ВО «Чувашский государственный педагогический университет

им. И. Я. Яковлева», г. Чебоксары, Российская Федерация

Аннотация. Частота дыхания (ЧД) – ключевой физиологический параметр, используемый при проведении физиологических и клинических исследований. Наряду с прямой записью дыхательных движений грудной клетки, ЧД можно оценить, извлекая респираторные сигналы из электрокардиограммы (ЭКГ) или фотоплетизмограммы (ФПГ). На точность оценки полученных респираторных сигналов может влиять ряд технических и физиологических факторов. Мы поставили себе целью провести тестирование согласованности оценок ЧД, полученных с помощью пневмографии с применением пьезоэлектрического датчика дыхательных движений (PZT), ЭКГ (ECG) и фотоплетизмографии (PPG) у 26 здоровых молодых людей. Качество оценки частоты дыхания на основе ECG и PPG было определено с посредством коэффициента корреляции Пирсона и t для связанных выборок, смещение и согласие оценивались с помощью анализа Бланда-Альтмана. Средние значения ЧД, полученные по PZT, ECG и PPG не отличались достоверно друг от друга ($p>0.05$), а корреляция между ними была высокой и достоверной (PZT_ECG: $r=0.91$, $p<0.001$; PZT_PPG: $r=0.83$, $p<0.001$). Анализ графиков Бланда-Альтмана выявил отсутствие выраженной статистически значимой систематической ошибки, поскольку линия идентичности в обеих парах переменных находится в границах 95% доверительного интервала для отклонения. Наиболее высокий уровень согласованности был отмечен для PZT и ECG: практически все точки на графике находились внутри доверительного интервала, коэффициент регрессии недостоверен. Согласованность между PZT и PPG была ниже, наклон регрессионной прямой был небольшим, но достоверным. Различия в согласованности ЧД, оцененной на основе кардиоваскулярных сигналов ЭКГ и ФПГ можно объяснить различием в механизмах респираторной модуляции ЧСС и периферического пульса.

Ключевые слова: частота дыхания, полученная с помощью электрокардиографии,

фотоплетизмография.

CORRESPONDENCE BETWEEN RESPIRATORY RATE MEASUREMENTS USING ELECTROCARDIOGRAPHY AND PHOTOPLETHYSMOGRAPHY WITH DATA OBTAINED USING PNEUMOGRAPHY

Dimitriev D.A., Indeykina O.S., Sushkov I.A.

Chuvash I. Yakovlev State Pedagogical University, Cheboksary, Russia

Abstract. Respiratory rate (RR) is a key physiological parameter used in physiological and clinical studies. Along with direct recording of chest respiratory movements, RR can be estimated by extracting respiratory signals from the electrocardiogram (ECG) or photoplethysmogram (PPG). The accuracy of the obtained respiratory signals can be influenced by a number of technical and physiological factors. We aimed to test the agreement of RR estimates obtained using piezoelectric respiratory motion sensor (PZT) pneumography, ECG, and photoplethysmography (PPG) in 26 healthy young adults. The quality of RR estimates based on ECG and PPG was determined using the Pearson correlation coefficient and t for related samples; bias and agreement were assessed using the Bland-Altman analysis. The mean values of RR obtained from PZT, ECG and PPG did not differ significantly from each other ($p>0.05$), and the correlation between them was high and reliable (PZT_ECG: $r=0.91$, $p<0.001$; PZT_PPG: $r=0.83$, $p<0.001$). Analysis of Bland-Altman plots revealed the absence of a pronounced statistically significant systematic error, since the identity line in both pairs of variables is within the 95% confidence interval for the deviation. The highest level of consistency was noted for PZT and ECG: almost all points on the graph were within the confidence interval, the regression coefficient was insignificant. The consistency between PZT and PPG was lower, the slope of the regression line was small, but significant. Differences in the consistency of respiratory rates estimated using ECG and PPG signals can be explained by differences in the mechanisms of respiratory modulation of heart rate and peripheral pulse.

Keywords: ECG-derived respiratory rate, photoplethysmography.

Введение. В современной физиологии одним из наиболее часто используемых методов исследования активности вегетативной нервной системы является запись и последующий анализ ритма сердца с целью определения респираторной синусовой аритмии (PCA) [1]. По мере развития этого метода стало ясно, что оценка PCA будет

более точной, если учитывать дыхательный паттерн, а наиболее релевантных данных можно достичь при определении кардиореспираторного взаимодействия посредством вычисления когерентности между двумя временными рядами – дыхательных движений и ритма сердца.

Оценка ритма дыхания в физиологии связана с изучением физиологических проявлений ментальной нагрузки [2] и эмоций [3]. Известно, что дыхательный паттерн формируется пейсмекерными нейронами, локализованными в нижней части ствола мозга, а активация дыхания связана не только с метаболическим запросом, но и с психическими процессами и поведением. Так, при когнитивной нагрузке и сильных эмоциях разной модальности происходит активация регионов мозга, лежащих ростральнее продолговатого мозга и моста [4], а также наблюдается выраженное влияние лимбической и паралимбической систем на активность стволовых дыхательных центров. В современной научной литературе исследование влияния психических процессов на дыхание осуществляется с использованием нескольких методов, с помощью которых можно получить оценку как частоты дыхания, так и показателей вариабельности дыхательного цикла: спирометрия, дыхательная индуктивная плетизмография, пояс с тензодатчиком, капнография, импедансная кардиография [5, 6]. Кроме того, в физиологии используется методика, которая позволяет определить дыхательные движения на основе ЭКГ (ECG-derived respiration (EDR)), которая продемонстрировала довольно высокую точность при использовании ее в клинических условиях [7].

Проблеме сопоставления результатов вычисления частоты дыхания с применением ЭКГ и методов непосредственной записи/фиксации дыхательных движений посвящено ряд исследований. Так Chand и соавторы [8] провели сравнительное изучение произведенных вручную (рассматривается как золотой стандарт) и с помощью компьютера они установили, что различие между результатами было статистически недостоверным. В другой работе было проведено сравнительное исследование ЧД у пациентов клиники скорой помощи с использованием пьезоэлектрического датчика на поясе (Piezo-Electric Respiration – PZT) и ЭКГ [9] и выявлена высокая степень корреляции между этими показателями.

В научной литературе также было уделено довольно большое внимание возможности оценки частоты дыхания с применением PPG [10]. В недавней работе был проведен анализ возможности применения PPG для оценки ЧД в клинических условиях – результаты указывают на большую ценность и клиническую значимость такого

метода определения ЧД [11]. Был разработан и апробирован алгоритм, который позволяет оценить частоту дыханий на основе этого сигнала [12] и получить клинически и научно значимые результаты. В частности, с его помощью была проведена дискриминация эмоционального стресса [13]. В другой работе было обнаружено, что анализ сигнала PPG, полученного с применением смартфона позволяет выявить ментальный стресс [14].

Цель настоящего исследования – провести тестирование согласованности оценок ЧД, полученных с применением пьезоэлектрического датчика (PZT), ЭКГ (ECG) и фотоплетизмографии (PPG) у здоровых молодых людей.

Материалы и методы исследования. В исследовании принимали участие 26 студентов ЧГПУ им. И. Яковleva (13 мужчин), средний возраст составил $21,15 \pm 2,18$ лет. Запись трех физиологических сигналов (PZT, ECG, ECG) осуществлялась одновременно в течение 5 минут в состоянии покоя сидя в кресле с подголовником. Вычисление частоты дыхания PZT проводилось посредством анализа сигнала с зафиксированного на ремне пьезоэлектрического датчика с применением алгоритма и кода Matlab, разработанного MacIntyre и Werner [15].

Определение ЧД на основе кардиографических сигналов ECG и PPG осуществлялась с использованием Kubios HRV Premium [16].

Соответствие эмпирического распределения данных нормальному проверялось с помощью теста Шапиро-Уилка и визуального осмотра гистограмм данных. Описательный статистический анализ проводился для тестируемых переменных с использованием статистического пакета STATISTICA 10.0 для расчета средних значений и стандартных ошибок средних (SE). Согласованность значений ЧД оценивалась с помощью линейной регрессии, коэффициента корреляции Пирсона r , коэффициента детерминации (R^2), стандартной ошибки оценки (SE) и графиков Бланда-Альтмана с пределами согласия (LoA) [17]. Величина корреляций Пирсона r оценивалась следующим образом: $0,3 \leq r < 0,5$ низкая, $0,6 \leq r < 0,8$ умеренная и $r \geq 0,8$ высокая [18]. Согласие между значениями ЧД, определенным на основе разных сигналов, оценивалось с помощью анализа графика Бланда-Альтмана, а также проводился регрессионный анализ [19]. Для всех тестов статистическая значимость принималась как $p \leq 0,05$.

Результаты исследования. Проверка распределения на нормальность с применением критерия Шапиро-Уилка показало, что значения всех трех сигналов распределены нормально (PZT Shapiro-Wilk $W=0,92$, $p=0,051$; ECG Shapiro-Wilk $W=0,97$, $p=0,54$; PPG

Shapiro-Wilk $W=0,97$, $p=0,74$), что позволило нам применить для дальнейшего анализа показатели параметрической статистики.

Примеры сигналов PZT, PPG и ECG представлены на рисунке 1.

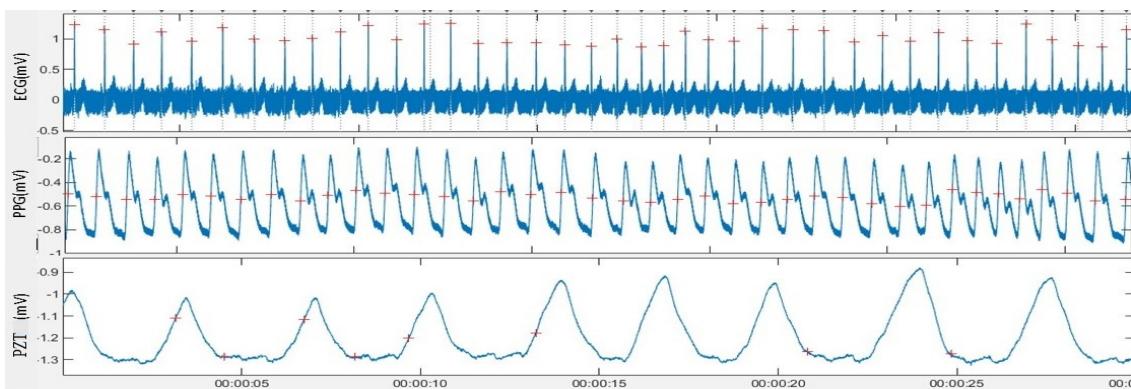


Рисунок 1 – Пример одновременной записи трех анализируемых сигналов.

Figure 1 – Example of simultaneous recording of three analyzed signals.

Средние значения ЧД (Гц), полученные из PZT, ECG и PPG не отличались друг от друга, как показали результаты вычисления t для связанных выборок (табл. 1).

Таблица 1

Результаты сравнительного анализа средних значений PZT, ECG, PPG

	PZT (Гц)	ECG (Гц)	PPG (Гц)
PZT (Гц)	$0,28 \pm 0,01$		
ECG (Гц)	$0,27 \pm 0,01$	$t = 0,29 ; p = 0,77$	
PPG (Гц)	$0,27 \pm 0,01$	$t = 0,38 ; p = 0,71$	$t = 0,15 ; p = 0,87$

Table 1

Results of a comparative analysis of the average values of PZT, ECG, and PPG

	PZT (Гц)	ECG (Гц)	PPG (Гц)
PZT (Гц)	$0,28 \pm 0,01$		
ECG (Гц)	$0,27 \pm 0,01$	$t = 0,29 ; p = 0,77$	
PPG (Гц)	$0,27 \pm 0,01$	$t = 0,38 ; p = 0,71$	$t = 0,15 ; p = 0,87$

Результаты анализа по Бланду-Альтману представлены в таблице 2, диаграммы рассеяния и графики Бланда-Альтмана на рисунке 2.

Таблица 2

Средние значения различий и доверительные интервалы согласия для сравнения частоты дыхания, записанного с помощью пьезоэлектрического датчика, с EDR на основе ЭКГ (ECG) и фотоплетизмографии (PPG)

Сигнал	Отклонение (Гц)	95% границы отклонения		95% границы согласия		Регрессионный анализ (значение p)
		Нижняя	Верхняя	Нижняя	Верхняя	
ECG	-0,0016	-0,0074	0,0042	-0,029	0,026	0,1
PPG	0,0028	-0,011	0,017	-0,064	0,069	0,043

Table 2

Mean differences and confidence intervals for the comparison of respiratory rate recorded with a piezoelectric sensor with EDR based on ECG and photoplethysmography (PPG)

Signal	Deviation (Hz)	95% deviation limit		95% agreement threshold		Regression analysis (p-value)
		Lower	Upper	Lower	Upper	
ECG	-0,0016	-0,0074	0,0042	-0,029	0,026	0,1
PPG	0,0028	-0,011	0,017	-0,064	0,069	0,043

Результаты вычисления статистической связи внутри двух пар сигналов (рис. 2, А) показал выраженную корреляцию между PZT и ECG, PZT и PPG, и высокий коэффициент детерминации.

Как следует из данных таблицы 2, линия идентичности в обеих парах переменных находится внутри 95% доверительного интервала для отклонения, что указывает на отсутствие статистически значимой систематической ошибки.

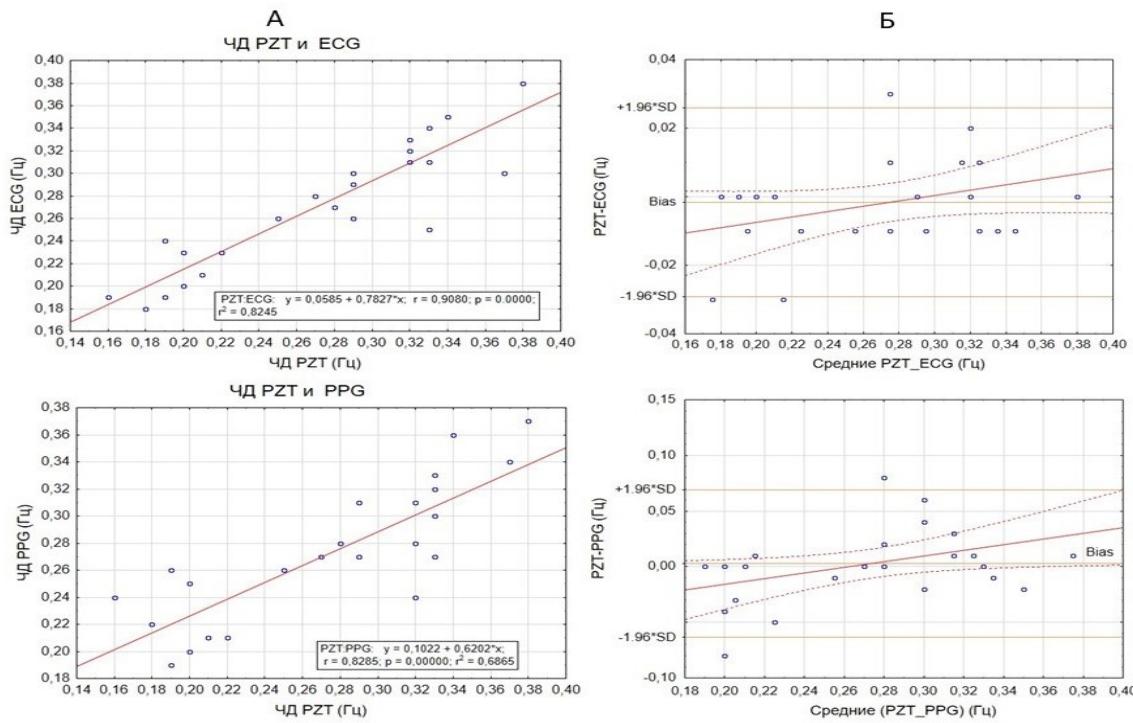


Рисунок 2 – Диаграммы рассеяния (А) и графики Бланда-Альтмана (Б). Одна точка может соответствовать двум и более парам значений.

Figure 2 – Scatterplots (A) and Bland-Altman plots (B). One point can correspond to two or more pairs of values.

Как следует из анализа диаграмм Бланда-Альтмана (рис. 2) и данных таблицы 1, частота дыхания в среднем составляла 16,8 дых/мин. Анализ согласованности результатов оценки ЧД с на основе PZT и ECG показал следующее. Регрессионная зависимость была недостоверной ($P>0,05$), только одна точка вышла за пределы зоны достоверности на небольшое расстояние, что указывает о достаточной согласованности оценки частоты дыхания посредством быстрого преобразования Фурье сигнала ЭКГ (EDR ECG) и записи движения грудной клетки (PZT).

Анализ соответствия между PZT и PPG выявил некоторые отличия от предыдущей пары: коэффициент корреляции между ЧД PZT и PPG ниже, на графике Бланда-Альтмана видны значения, выходящие за пределы линий, обозначающих границы достоверности, а наклон регрессионной прямой не равен 0 ($P<0,05$).

Обсуждение результатов исследования. Нами было поведено исследование соответствия между оценками частоты дыхания разными методами, при этом нас особенно интересовало то, насколько соответствуют уровни ЧД, полученные с использованием пьезодатчика, ЭКГ и фотоплетизмографии. Оба кардиоваскулярные

сигнала модулируются дыханием, что и обеспечивает возможность оценки ЧД на их основе. Имеется три типа модуляции: дрейф базовой линии амплитудная модуляция и частотная модуляция [20, 21]. Полученные нами результаты показали достаточно высокий уровень согласованности результатов вычисления ЧД разными методами, что согласуется с литературными данными [22]. При этом отмечается, что использованный алгоритм определения уровня ЧД лучше работает при использовании ECG, чем PPG. Это может быть обусловлено различиями в физиологических механизмах, обуславливающих респираторную модуляцию каждого из этих сигналов. Частотная модуляция и дрейф базовой линии ЭКГ обусловлены изменениями ориентации электрической оси сердца относительно электродов и изменением импеданса грудной клетки [20]. В PPG эти модуляции обусловлены изменениями венозного возврата, ударного объема и артериального давления [21].

Заключение. Проведенное нами исследование показало, что оценка частоты дыхания с использованием пояса с пьезодатчиком, фотоплетизмографии пульсовой волны и ЭКГ дают согласующиеся, результаты с высокой степенью корреляции. Анализ с использованием графика и статистики Бланда-Альтмана продемонстрировал более точное соответствие между значениями ЧД, полученными с пояса с пьезодатчиком и ЭКГ, чем для пояса и фотоплетизмографии, что отражает разные физиологические механизмы модуляции ритма сердца и периферического пульса дыханием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- [1]. Gevirtz R.N., Schwartz M.S. The respiratory system in applied psychophysiology // Biofeedback: A practitioner's guide. 2003. С. 212-244.
- [2]. Javorka M. et al. Role of respiration in the cardiovascular response to orthostatic and mental stress // American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology. 2018. Т. 314. №. 6. С. R761-R769.
- [3]. Hirabayashi S., Iwamoto M. Emotion, respiration, and heart rate variability: a mathematical model and simulation analyses // Applied Sciences. 2019. Т. 9. №. 23. С. 5008.
- [4]. Horn E.M., Waldrop T.G. Suprapontine control of respiration // Respiration physiology. 1998. Т. 114. №. 3. С. 201-211.
- [5]. Гаранин А.А. и др. Контактные способы регистрации частоты дыхания: возможности и перспективы // Бюллетень физиологии и патологии дыхания. 2023. №. 89. С. 159-173.

- [6]. Grassmann M. et al. Respiratory changes in response to cognitive load: A systematic review // *Neural plasticity*. 2016. T. 2016. №. 1. C. 8146809.
- [7]. Fan J. et al. A high accuracy & ultra-low power ECG-derived respiration estimation processor for wearable respiration monitoring Sensor // *Biosensors*. 2022. T. 12. №. 8. C. 665.
- [8]. Meenakshi S.C. et al. Comparison on difference in manual and electronic recording of vital signs in patients admitted in CTVS-ICU and CCU // *Nursing & Midwifery Research Journal*. 2014. T. 10. №. 4. C. 157-165.
- [9]. Kellett J. et al. Comparison of the heart and breathing rate of acutely ill medical patients recorded by nursing staff with those measured over 5 min by a piezoelectric belt and ECG monitor at the time of admission to hospital // *Resuscitation*. 2011. T. 82. №. 11. C. 1381-1386.
- [10]. Charlton P.H. et al. Breathing rate estimation from the electrocardiogram and photoplethysmogram: A review // *IEEE reviews in biomedical engineering*. 2017. T. 11. C. 2-20.
- [11]. Eisenkraft A. et al. Clinical validation of a wearable respiratory rate device: a brief report // *Chronic Respiratory Disease*. 2023. T. 20. C. 14799731231198865.
- [12]. Wang Z.H., Wu Y.C. A novel rapid assessment of mental stress by using PPG signals based on deep learning // *IEEE Sensors Journal*. 2022. T. 22. №. 21. C. 21232-21239.
- [13]. Sim H., Lee W.H., Kim J.Y. A study on emotion classification utilizing bio-signal (PPG, GSR, RESP) // *Adv. Sci. Technol. Lett.* 2015. T. 87. C. 73-77.
- [14]. Cho Y., Julier S.J., Bianchi-Berthouze N. Instant stress: detection of perceived mental stress through smartphone photoplethysmography and thermal imaging // *JMIR mental health*. 2019. T. 6. №. 4. C. e10140.
- [15]. Macintyre A.D., Werner R. An Automatic Method for Speech Breathing Annotation // Konferenz Elektronische Sprachsignalverarbeitung. – TUDpress, Dresden, 2023. C. 103-110.
- [16]. Rogers B., Schaffarczyk M., Gronwald T. Estimation of respiratory frequency in women and men by Kubios HRV software using the polar H10 or movesense medical ECG sensor during an exercise ramp // *Sensors*. 2022. T. 22. №. 19. C. 7156.
- [17]. Bland J.M., Altman D.G. Measuring agreement in method comparison studies // *Statistical methods in medical research*. 1999. T. 8. №. 2. C. 135-160.
- [18]. Chan Y.H. Biostatistics 104: correlational analysis // *Singapore Med J*. 2003. T. 44. №. 12. C. 614-619.

- [19]. Ludbrook J. Confidence in Altman–Bland plots: a critical review of the method of differences // Clinical and Experimental Pharmacology and Physiology. 2010. T. 37. №. 2. C. 143-149.
- [20]. Bailón R. et al. ECG-derived respiratory frequency estimation // Advanced methods and tools for ECG data analysis. 2006. T. 1. C. 215-244.
- [21]. Meredith D.J. et al. Photoplethysmographic derivation of respiratory rate: a review of relevant physiology // Journal of medical engineering & technology. 2012. T. 36. №. 1. C. 1-7.
- [22]. Charlton P.H. et al. An assessment of algorithms to estimate respiratory rate from the electrocardiogram and photoplethysmogram // Physiological measurement. 2016. T. 37. №. 4. C. 610.