

ПУЛЬСОКСИМЕТРИЯ: МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ, ПОКАЗНИКИ, ЇХ КЛІНІЧНА ТРАКТОВКА ТА КРИТЕРІЇ ДІАГНОСТИКИ ЗАХВОРЮВАНЬ ОРГАНІВ ДИХАННЯ**Барська О.В.***к.мед.н., доцент кафедри внутрішньої медицини №3
Вінницького національного медичного університету імені М.І. Пирогова, Україна***Денесюк В.І.***д.мед.н., професор кафедри внутрішньої медицини №3
Вінницького національного медичного університету імені М.І. Пирогова, Україна***Музыка Н.О.***к.мед.н., доцент кафедри внутрішньої медицини №3
Вінницького національного медичного університету імені М.І. Пирогова, Україна**Scopus Author ID: 57982100900***Осядла Е.С.***к.мед.н., доцент кафедри внутрішньої медицини №3
Вінницького національного медичного університету імені М.І. Пирогова, Україна**ORCID: 0000-0003-4611-484X***PULSE OXIMETRY: METHOD, INDICATORS, THEIR CLINICAL INTERPRETATION AND CRITERIA FOR DIAGNOSING DISEASES OF THE RESPIRATORY ORGANS****Barska O.,***Associate Professor of the Department of Internal Medicine No. 3
National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya
Scopus Author ID: 57189603824***Denesyuk V.,***Professor of the Department of Internal Medicine No. 3
National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya***Muzyka N.,***Associate Professor of the Department of Internal Medicine No. 3
National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya
Scopus Author ID: 57982100900***Osiadla E.***Associate Professor of the Department of Internal Medicine No. 3
National Pirogov Memorial Medical University, Vinnytsya
ORCID: 0000-0003-4611-484X***Анотація**

Пульсоксиметрія є важливим неінвазивним інструментом для оцінки дихальної системи з моменту її впровадження приблизно 30-річної розробки. За цей період було досягнуто значного технологічного прогресу в комерційно доступних пульсоксиметрах, що дозволило краще діагностувати та контролювати ефективність лікування пацієнтів з різною патологією внутрішніх захворювань. Однак ще бракує точності, оскільки вона ще недостатньо точна і дає похибку в 3–4% при вимірюваннях, у важкохворих пацієнтів і недоношених новонароджених. В нормі SpO₂ становить 95–98% (у людей, старших за 70 років – 94–98%), а при кисневій терапії може досягати 99–100%. Пульсоксиметрія має ряд переваг у простоті застосування, доступності у порівнянні з аналізом газів крові, що значно покращує роботу лікаря в контролі за ефективністю проведеної терапії.

Abstract

Pulse oximetry has been an important non-invasive tool for the assessment of the respiratory system since its introduction in approximately 30 years of development. During this period, significant technological progress was achieved in commercially available pulse oximeters, which made it possible to better diagnose and monitor the effectiveness of treatment of patients with various pathologies of internal diseases. However, there is still a lack of accuracy, as it is not yet accurate enough and gives an error of 3–4% in measurements, in critically ill patients and premature newborns. SpO₂ is normally 95–98% (94–98% in people over 70 years old), and can reach 99–100% with oxygen therapy. Pulse oximetry has a number of advantages in terms of ease of use and availability compared to blood gas analysis, which significantly improves the work of the doctor in monitoring the effectiveness of the therapy.

Ключові слова: пульсоксиметрія, насичення венозної крові киснем, гіпоксія.**Keywords:** pulse oximetry, saturation of venous blood with oxygen, hypoxia.

Пульсоксиметрія — це неінвазивний метод черезшкірного моніторингу насичення (сатурації) гемоглобіну артеріальної крові киснем (SpO_2) і частоти пульсу. Для проведення цього дослідження використовують спеціальні прилади — пульсоксиметри. Принцип їх роботи полягає у трансмісійній спектрофотометрії, яка базується на використанні

різних оптичних властивостей окисленого і відновленого гемоглобіну. Прилади обладнані датчиками, які кріпляться на палець, вушну раковину, чоло або крила носа [2].

Показання до проведення пульсоксиметрії представлені в табл.1.

Таблиця 1

Показання до проведення пульсоксиметрії

<ul style="list-style-type: none"> • Підозра на дихальну недостатність і моніторинг лікування дихальної недостатності • Моніторинг оксигенотерапії • Моніторинг стану тяжких хворих з серцево-легеневою недостатністю або емболією легеневої артерії • Загальна анестезія і період безпосередньо після неї • Синдром апное уві сні • Більш надійний, ніж ЕКГ, наприклад під час проведення діатермії* (показує ймовірніший вплив аритмії на гемодинаміку)
<p><i>Примітка *діатермія — це електрично викликане тепло або використання височастотних електромагнітних струмів як форма фізіотерапії.</i></p>

Перенесення кисню від легенів до клітин тканин здійснюється в основному молекулами гемоглобіну в еритроцитах. Загальний вміст кисню в крові включає зв'язаний з гемоглобіном кисень (97–98 % від загального вмісту кисню) і кисень, розчинений у плазмі. Рівень оксигенації артеріального гемоглобіну оцінюють за насиченням артеріальної крові киснем (SaO_2), яке є відношенням до концентрації насиченого киснем гемоглобіну $[HbO_2]$ до загальної концентрації гемоглобіну в крові ($[HbO_2 + Hb]$): $[SaO_2] = [HbO_2] / ([HbO_2] + [Hb])$ (1) [7].

Оптичні методи, розроблені для оцінки SaO_2 , базуються на різних спектрах поглинання світла для HbO_2 та Hb . Рисунок 2.1 показує коефіцієнти екстинкції — специфічні константи поглинання — HbO_2 та Hb як функцію довжини хвилі у видимому та ближньому інфрачервоному діапазоні регіони. Коефіцієнт екстинкції кожного типу гемоглобіну визначається як константа поглинання гемоглобіну в зразку, поділена на концентрацію гемоглобіну в зразку.

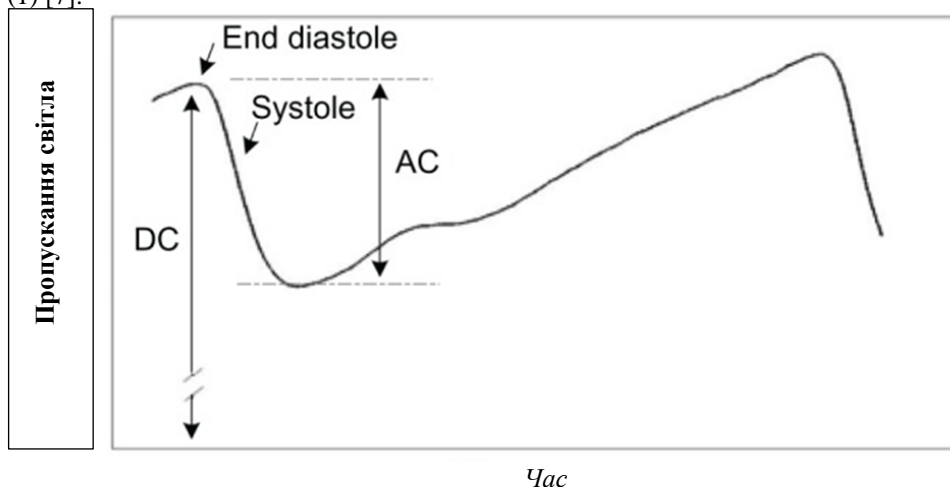


Рисунок 1. Сигнал фотоплетизмографії адаптовано за [7].
Примітка: DC позначає базову лінію пульсу, а AC — амплітуду пульсу.

Гемоглобін є основним джерелом поглинання світла в тканинах у червоній та ближній інфрачервоній областях, але інші хромофори, такі як меланін і міоглобін, також можуть поглинати світло в цих областях. Венозна кров з меншим вмістом кисню в гемоглобіні також поглинає світло в тій самій спектральній області, що й артеріальна кров. Необхідність виділити внесок гемоглобіну артеріальної крові в загальне поглинання призвела до розвитку пульсоксиметрії.

Пульсоксиметрія для оцінки SaO_2 базується на фотоплетизмографії (PPG), вимірюванні збіль-

шення поглинання світла через систолічне збільшення об'єму артеріальної крові [8, 9]. Відображається сигнал фотоплетизмографії на рис.1 [7]. Інтенсивність світла, що проходить, зменшується під час систоли, коли кров поступає з лівого шлуночка в судинну систему, збільшуючи тим самим об'єм периферичної артеріальної крові. Максимальне та мінімальне значення імпульсу фотоплетизмографії відображають світлове випромінювання, що проходить через тканину, коли об'єм крові тканини мінімальний або максимальний відповідно. Ам-

плітуда фотоплетизмографії пов'язана з поглинанням світла при збільшенні об'єму артеріальної крові під час систоли серця.

Точність пульсоксиметра оцінюється різницею між SpO_2 , значеннями насичення киснем, вимірними пульсоксиметром і SaO_2 , вимірний кооксиметрією в екстрагованій крові, що являється *золотим стандартом* [7]. Більшість виробників пульсоксиметрів заявляють про точність 2%, що є стандартним відхиленням (SD) різниці між SpO_2 та SaO_2 , отримане доступними комерційними пульсоксиметрами, є надійним параметром для виявлення значного погіршення функції дихання. Прийнято вважати, що значне зниження значення SpO_2 , включаючи більшість хворих пацієнтів, становить 80–100%, помилка 3–4% може мати велике значення. Незважаючи на таку низьку точність, пульсоксиметрія дозволяє виявити різке падіння SpO_2 .

Крім HbO_2 та Hb , кров дорослих може містити дисгемоглобін: похідні гемоглобіну, які не є функціональними, оскільки не здатні оборотно зв'язувати молекули кисню на фізіологічних рівнях PaO_2 в крові. Найважливішими дисгемоглобінами є метгемоглобін (MetHb) і карбоксигемоглобін (COHb), які зазвичай присутні в низьких концентраціях у здорових людей. Підвищена концентрація молекул дисгемоглобіну в крові (наприклад, при отруєнні чадним газом) може знизити ефективність оксигенації тканин. При низьких концентраціях

дисгемоглобінів різниця між цими двома параметрами є незначною через малу різницю між ними. Зміна концентрації карбоксигемоглобіну на 1% змінює показання пульсоксиметрії приблизно на 1% [3].

У трансмісійній пульсоксиметрії світло виявляється після того, як воно пройшло через орган, і тому обмежене кінчиками пальців і мочками вух. Потік крові до кінчиків пальців і мочок вух більший, ніж необхідний для метаболізму тканин, через їхню роль у теплопередачі, і за нормальних умов їхні імпульси фотоплетизмографії мають високе співвідношення сигнал/шум. Однак ці органи знаходяться під інтенсивним регулюванням вегетативної нервової системи, і у випадках низької температури навколишнього середовища або низького серцевого викиду їхні артерії звужуються, щоб зменшити розсіювання тепла або підтримувати достатнє кровопостачання найважливіших основних органів: серця, мозку і нирок. У таких випадках сигнал фотоплетизмографії зменшується, знижуючи точність пульсоксиметра. Рефлекторну пульсоксиметрію, у якій джерела світла та фотодетектор розташовані на одній поверхні шкіри, можна застосовувати на будь-якому доступному місці, і тому вона є перевагою в умовах низької периферичної перфузії [1, 4].

Джерела помилок при проведенні пульсоксиметрії приведені в зведені табл. 2 [10].

Таблиця 2

Джерела помилок при проведенні пульсоксиметрії

<p><i>Зниження периферійного кровообігу:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • холодна погода або низька температура тіла; • гіпотензія, вазоконстрикція (біль, ліки); <p><i>Периферичний кровообіг може бути покращено шляхом:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • зігрівання; • масажу; • використання місцевих вазодилітаторів (наприклад, невелика кількість нітрогліцеринової мазі); • зняття тісного одягу і манжети для вимірювання кров'яного тиску.
<p><i>Помилка, пов'язана з рухом:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • тремором; • розмахуванням руками і вібраціями в машині швидкої допомоги.
<p><i>Венозна пульсація:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • серцева недостатність; • недостатність тристулкового клапана.
<p><i>Дисгемоглобінемія:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • карбоксигемоглобін (отруєння чадним газом); • реєструється хибно висока сатурація (інструмент інтерпретує карбоксигемоглобін як оксигемоглобін); • метгемоглобінемія.
<p><i>Проблеми з освітленням:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • датчик розміщений неправильно; • світло не повинно потрапляти на датчик; • ксенон і інфрачервоне світло; • яскраве денне світло, флуоресцентно-індуковане світло.
<p><i>Фактори, що перешкоджають поглинанню:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> • неприродні пігменти, такі як лак для нігтів (найчастіше блакитні відтінки), татування та зміни кольору шкіри, викликані курінням або роботою, перешкоджають нормальній роботі пристрою; • природний пігмент шкіри не перешкоджає експлуатації, а пристрій працює в нормальному режимі також у темношкірих осіб.

Насичення венозної крові киснем (SvO₂) має фізіологічне та клінічне діагностичне значення, оскільки низький SvO₂ в певній тканині в поєднанні з нормальним значенням SaO₂ вказує на зниження кровотоку до цієї тканини, і артеріовенозна різниця насичення киснем (SaO₂–SvO₂) пов'язані з балансом надходження та потребою кисню в тканинах [7].

Подібно до вимірювання SaO₂, пульсоксиметрію також можна використовувати для вимірювання SvO₂, використовуючи різницю в спектрах поглинання світла для HbO₂ та Hb. Ізоляція поглинання світла у венозній крові може бути досягнута шляхом вимірювання зміни поглинання світла (на двох довжинах хвилі) після зміни об'єму венозної

крові, викликаній спонтанно або вручну. Однак у венозній пульсоксиметрії ефект розсіювання не можна впоратися за допомогою калібрування *in vitro*, як у артеріальній пульсоксиметрії. У той час як калібрування *in vitro* може бути виконано у вилученій артеріальній крові, оскільки насичення киснем має однакове значення в усій артеріальній системі, калібрування за вилученою венозною кров'ю не можна застосувати до SvO₂, оскільки кров, взята з конкретної великої вени, не обов'язково має таке ж значення насичення киснем, як у малих венах у ділянці тканини, де виконується оксиметричне вимірювання [5, 6].

Переваги пульсоксиметрії у порівнянні з аналізом газів крові представлені в табл.3.

Таблиця 3

Переваги пульсоксиметрії у порівнянні з аналізом газів крові

• Безперервний неінвазивний моніторинг
• Простий у використанні та надійний інструмент
• Менше джерел для помилок
• Біль і нервування під час забору проб артеріальної крові викликають гіпервентиляцію, що збільшує показник насиченості киснем. Аналіз газів крові може призвести до переоцінки оксигенації.

Доведено, що зниження сатурації кисню до рівня нижче 90% (зміщення в бік різко нахиленої частини кривої дисоціації оксигемоглобіну) є показником значного зниження парціального тиску кисню. Однак вищі значення сатурації не надійно відображають парціальний тиск кисню [10].

В клінічних умовах лихоманка, фізична активність, ацидоз та висока концентрація вуглекислого газу в артеріальній крові зміщують криву дисоціації оксигемоглобіну вправо, що призводить до посилення дисоціації кисню з гемоглобіном, тобто оксигенація тканин стає більш ефективною [10]. Із вище вказаної інформації виділяємо заходи, які слід проводити при гіпоксемії в залежності від ступеня вентиляційної недостатності, приведено в табл.4.

Таблиця 4

Заходи, які слід проводити при гіпоксемії [10]

<i>Сатурація оксигемоглобіном (%) та ступені вентиляційної недостатності</i>	<i>Тактика лікаря</i>
90–95 помірна	Визначайте сатурацію кисню регулярно, особливо вночі. Якщо результат є несподіваним, виключіть джерела помилок. З'ясуйте причину гіпоксії.
80–90 значна	Врахуйте зазначене вище + призначити кисень до тих пір, поки сатурація не перевищить 90%. Розглянути CPAP терапію, якщо не вдається досягнути мети.
< 80 критична	Слід врахувати вищесказане + розпочніть безперервний моніторинг сатурації кисню. Розглянути допоміжну вентиляцію
<i>У будь-якому випадку дійте відповідно до рекомендацій, узгоджених на вашому робочому місці для надання екстреної медичної допомоги. CPAP (Continuous Positive Airway Pressure)- сталий додатковий тиск повітря або постійний позитивний тиск у дихальних шляхах.</i>	

Висновки

Пульсоксиметрія є важливим неінвазивним інструментом для оцінки дихальної системи. Однак ще бракує точності, оскільки вона ще недостатньо точна і дає похибку в 3–4% при вимірюваннях, у важкохворих пацієнтів і недоношених новонароджених. В нормі SpO₂ становить 95–98 % (у людей, старших за 70 років – 94–98 %), а при кисневій терапії може досягати 99–100 %. Пульсоксиметрія має ряд переваг у простоті застосування, доступності у порівнянні з аналізом газів крові, що значно покращує роботу лікаря в контролі за ефективністю проведеної терапії.

Список літератури

1. Agashe GS, Coakley J, Mannheimer PD. Forehead pulse oximetry headband use helps alleviate false low readings likely related to venous pulsation artifact. *Anesthesiology*. 2006;105(6):1111–1116. - PubMed
2. Empendium Посібник Компендіум Внутрішні хвороби Дослідження Функціональні дослідження Пульсоксиметрія <https://empendium.com/ua/chapter/B27.V.25.3>.

3. Fouzas S, Priftis KN, Anthropoulos MB. Pulse oximetry in pediatric practice. *Pediatrics*. 2011;128(4):740–752. - PubMed
4. Mendelson Y, Ochs BD. Noninvasive pulse oximetry utilizing skin reflectance photoplethysmography. *IEEE Trans Biomed Eng*. 1988;35(10):798–805. - PubMed
5. Nitzan M, Babchenko A, Khanokh B, Taitelbaum H. The measurement of oxygen saturation in venous blood by dynamic near infrared spectroscopy. *J Biomed Optics*. 2000;5(2):155–162. - PubMed
6. Nitzan M, Engelberg S. Three-wavelength technique for the measurement of oxygen saturation in arterial blood and in venous blood. *J Biomed Opt*. 2009;14(2):024046. - PubMed
7. Nitzan M, Romem A, Koppel R. Pulse oximetry: fundamentals and technology update. *Med Devices (Auckl)*. 2014 Jul 8;7:231-9. doi: 10.2147/MDER.S47319. PMID: 25031547; PMCID: PMC4099100. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/25031547/>
8. Wieben O. Light absorbance in pulse oximetry. In: Webster JG, editor. *Design of Pulse Oximeters*. Bristol: Institute of Physics; 1997. pp. 40–55.
9. Yoshiya I, Shimady Y, Tanake K. Spectrophotometric monitoring of arterial oxygen saturation on the fingertip. *Med Biol Eng Comput*. 1980;18(1):27–32. - PubMed
10. МОЗ України. Пульсоксиметрія 2017. Настанова 0034. Published by arrangement with Duodecim Medical Publications Ltd., an imprint of Duodecim Medical Publications Ltd., Kaivokatu 10A, 00100 Helsinki, Finland. <https://guidelines.moz.gov.ua/documents/3224>