

# “The pulse oximetry gap” или «ошибка пульсоксиметрии»: определение, причины, диагностика и клиническое значение

В. В. Гноевых<sup>1</sup>, А. Ю. Смирнова<sup>1</sup>, Ю. А. Шорохова<sup>1</sup>, Н. Г. Чернова<sup>1</sup>, М. В. Крестьянинов<sup>1</sup>, А. Б. Песков<sup>2</sup>, В. А. Разин<sup>3</sup>

ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, Россия

<sup>1</sup>Кафедра пропедевтики внутренних болезней

<sup>2</sup>Факультет последипломного медицинского и фармацевтического образования

<sup>3</sup>Кафедра факультетской терапии

## РЕЗЮМЕ:

В литературном обзоре рассмотрен феномен “the pulse oximetry gap”, включая определение, причины и клиническое значение. Представлены: история пульсоксиметрии, методы определения основных функциональных и дисфункциональных дериватов гемоглобина, физические и методологические принципы определения функционального и фракционного насыщений гемоглобина кислородом.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** пульсоксиметрические методы, функциональные и дисфункциональные дериваты гемоглобина, “the pulse oximetry gap”.

**КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

## “The pulse oximetry gap”: definition, reasons, diagnostics and clinical significance

V. V. Gnoevykh<sup>1</sup>, A. Yu. Smirnova<sup>1</sup>, Yu. A. Shorokhova<sup>1</sup>, M. V. Krestyaninov<sup>1</sup>, A. B. Peskov<sup>2</sup>, V. A. Razin<sup>3</sup>

Ulyanovsk State University, Ulyanovsk, Russia

<sup>1</sup>Propaedeutics of Internal Diseases Department

<sup>2</sup>Faculty of Postgraduate Medical and Pharmaceutical Education

<sup>3</sup>Faculty Therapy Department

## SUMMARY:

A literature review is presented the phenomenon of “the pulse oximetry gap”, including its definition, causes, and clinical significance. The history of pulse oximetry, methods for determining the main functional and dysfunctional derivatives of hemoglobin, physical and methodological principles for determining the functional and fractional saturation of hemoglobin with oxygen are considered in detail.

**KEYWORDS:** pulse oximetry methods, functional and dysfunctional derivatives of hemoglobin, “the pulse oximetry gap”.

**CONFLICT OF INTEREST.** The authors declare no conflict of interest.

## ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ:

Hb — восстановленный гемоглобин

HbO<sub>2</sub> — оксигемоглобин

SpO<sub>2</sub> — оксигемоглобин, определяемый неинвазивно (транскутанно)

SaO<sub>2</sub> — оксигемоглобин, определяемый лабораторными методами в артериальной крови (с помощью абсорбционной спектрофотометрии)

COHb — карбоксигемоглобин

MetHb — метгемоглобин

FeCO — окись углерода в выдыхаемом воздухе

## Транскутанная пульсоксиметрия. «Пульсирующая» и «постоянная» компоненты поглощения света

Транскутанной пульсоксиметрии принадлежит важнейшая роль в диагностическом скрининге дыхательной недостаточности (ДН). Её повсеместное применение, особенно в условиях недавней пандемии COVID-19, даёт возможность транскутанно, длительно и непрерывно мониторировать насыщение гемоглобина кислородом в артериальной (при наложении датчика на периферическую фалангу верхней конечности) крови — SpO<sub>2</sub>.

Согласно А. Г. Дембо, ДН — «...такое состояние организма, при котором нормальная функция аппарата внешнего дыхания недостаточна для того, чтобы обеспечить организм потребным количеством кислорода и вывести необходимое количество углекислоты» [1]. Отсюда понятно диагностическое значение пульсоксиметрии для скрининга ДН.

В 1873 г. К. Vierordt, а в 1900 г. С. G. Hüfner выявили спектральные различия в поглощении света окисленным и восстановленным гемоглобинами [2]. В 1940 г. Glenn Allan Millican сконструирован гемоксиметр для диагностики гипоксии у пилотов [3].

В 1942–1944 гг. советский учёный Крепс Е. М. и инженер-конструктор Шипалов М. С. разработали первый в СССР оксигеметр (прообраз оксигемографа с функцией автоматической записи насыщения гемоглобина кислородом). С 60-х годов XX века в СССР начался промышленный выпуск оксигемографа 036М Ленинградским ПО «Красногвардеец» [2].

В 1972 г. Такуо Аояги, инженер корпорации Nihon Kohden, пытаясь получить ушной зонд для мониторинга сердечного выброса, случайно обнаружил пульсирующий артериальный сигнал, мешавший измерениям. Но данный

«артефакт» содержал информацию о насыщении артериальной крови кислородом [4]. Это открытие позволило Такуо Аояги предложить принципы расчёта оксигенации артериальной крови по колебаниям абсорбции света при пульсации артериол, в результате чего корпорация Nihon Kohden в 1975 г. создала первый транскутанный пульсоксиметр, в котором использовались светофильтры [4].

В 1977 г. компания Minolta разработала принцип передачи светового потока к датчику по световолокну. Объединение принципа Такуо Аояги и полупроводниковых технологий позволило Scott Wilber создать прообраз современного пульсоксиметра с ушным датчиком и запатентованным алгоритмом расчета  $SpO_2$  [5].

Для неинвазивной оценки насыщения гемоглобина кислородом в артериальной крови повсеместно используют транскутанную двухволновую пульсоксиметрию. При этом восстановленный гемоглобин (Hb) более активно поглощает красный (660 нм), а оксигемоглобин ( $HbO_2$ ) — ближний инфракрасный (940 нм) свет.

Для адекватного измерения сатурации гемоглобина кислородом выделяют «пульсирующую» артериальную и исключают «постоянную» компоненту (зависит от оптических характеристик венозной и капиллярной крови и тканей исследуемого участка) [6]. Кроме «отсечения» «постоянного» компонента поглощения света, проводят калибровку пульсоксиметров, сравнивая одновременно измеренные (неинвазивно и инвазивно) уровни  $HbO_2$ .

**Основные дериваты гемоглобина. Функциональная и фракционная сатурации гемоглобина кислородом. Представление о «the pulse oximetry gap» — «ошибке («разрыве») пульсоксиметрии».**

Артериальная кровь, кроме восстановленного (Hb) и окисленного ( $HbO_2$ ) гемоглобинов, содержит дисфункциональные дериваты гемоглобина, не принимающие участия в кислородотранспортной функции крови: карбоксигемоглобин (COHb), метгемоглобин (MetHb), гликированный гемоглобин (HbA1c), карбгемоглобин ( $CO_2Hb$ ), нитрозогемоглобин (NOHb), сульфгемоглобин (SHb) и цианметгемоглобин (CNMetHb).

В физиологических условиях у здоровых некурящих лиц доля этих дериватов незначительна, в частности, уровень MetHb составляет от 0,2 до 0,6%, а COHb — от 0,16 до 0,96% [7].

К основным дериватам гемоглобина относятся деоксигенированный гемоглобин,  $HbO_2$ , COHb и MetHb [7, 8]. Подробное описание дисфункциональных дериватов COHb и MetHb представлено ниже.

**Определение терминов «функциональная» и «фракционная» сатурации гемоглобина кислородом.** Транскутанная двухволновая пульсоксиметрия позволяет определить лишь функциональную сатурацию артериальной крови кислородом (**NB!** без учёта дисфункциональных дериватов гемоглобина) по формуле:

$$HbO_2\text{функц.} = 100\% \times \frac{HbO_2}{(HbO_2 + Hb)} \quad (1).$$

При транскутанном двухволновом измерении в артериальной крови  $HbO_2$  функц. обозначается аббревиатурой  $SpO_2$ .

В противоположность этому, инвазивное (в артериальной крови), многоволновое, оптическое определение оксигемоглобина подразумевает определение *фракционной сатурации артериальной крови* кислородом с учётом дисфункциональных дериватов гемоглобина по формуле:

$$HbO_2\text{фракц.} = 100\% \times \frac{HbO_2}{(HbO_2 + Hb + COHb + MetHb + \dots)} \quad (2).$$

При инвазивном измерении в артериальной крови  $HbO_2$  фракц. обозначается аббревиатурой  $SaO_2$ .

Разность [ $HbO_2$  функц. –  $HbO_2$  фракц.] между функциональным и фракционным уровнями  $HbO_2$  представляет собой «the pulse oximetry gap» — «ошибку» или «разрыв» пульсоксиметрии [10]. В узком понимании данная ошибка возникает из-за отсутствия учёта дисфункциональных дериватов гемоглобина, в первую очередь, COHb и MetHb.

Так, при исследовании воздействия CO (оксида углерода) на экспериментальных животных 90% уровень  $SpO_2$  был зарегистрирован в тот момент, когда уровень COHb составлял 70%, а инвазивное фракционное насыщение  $HbO_2$  не превышало 30% [11, 12].

Наиболее близки (почти идентичны) к уровню  $HbO_2$  фракц. значения  $SpO_2$  при неинвазивном применении *многоволновой пульсовой оптической CO-оксиметрии* (multiwave length pulse CO-oximetry) или *многоволновой пульсовой спектрометрии*, т.к. при этих способах измерения оксигемоглобина уровни дисфункциональных гемоглобинов уже учтены.

В более широком понимании выраженность «the pulse oximetry gap» зависит не только от учёта дисфункциональных дериватов Hb, но и от других, технических и/или методологических, причин.

К этим причинам относят: невозможность полной синхронизации инвазивного и неинвазивного измерения уровней оксигенации крови (особенно при транскутанном мониторинговании); применение 2-волновой пульсоксиметрии или многоволновой CO-оксиметрии. Имеют значение и технологические особенности тех или иных моделей многоволновых CO-оксиметров, а также разные диагностические возможности многоволновой CO-оксиметрии и более современной многоволновой пульсовой импульсной спектроскопии.

Ведущие мировые производители декларируют «погрешность измерения»  $SpO_2 \pm 2$ , возникающую в случае сопоставления  $SpO_2$  и  $SaO_2$ , при одновременном неинвазивном и инвазивном их измерении. Указанная погрешность наблюдается в 68% измерений, в 27% случаев погрешность составляет  $\pm 4\%$ , а в 5% погрешность измерения превышает 4%. Воспроизводимость пульсоксиметрии составляет около  $\pm 1\%$  [13, 14, 15].

Австралийскими и новозеландскими учёными была изучена степень соответствия между насыщением гемоглобина кислородом, измеренным с помощью транскутанной двухволновой пульсоксиметрии и с помощью инвазивной оксиметрии артериальной крови. Разница между измеренными значениями составила 1,2% с ДИ от 2,0 до 4,4% [16].

У 3,3% пациентов различия между  $SaO_2$  и  $SpO_2$  оказались более значительными. Уровень  $SpO_2$  был, как минимум,

на 4% ниже уровня  $\text{SaO}_2$  у 2,5%, и, на 4% выше у 0,8% пациентов. При этом ни у кого из участников исследования с  $\text{SpO}_2 \geq 92\%$  не была выявлена гипоксемия с уровнем  $\text{SaO}_2 < 90\%$  [16].

Известно, что показания  $\text{SpO}_2$  при уровне оксигенации крови  $< 70\%$  будут неточными [17].

**К современным методам количественного определения основных дериватов гемоглобина относятся:**

1. *Инвазивные методы многоволнового оптического анализа газов крови с помощью абсорбционной спектрофотометрии (methods of multiwave length optical blood gas analysis)* с раздельным определением в крови основных дериватов гемоглобина за счёт использования множества световых длин волн. Данные методы позволяют почти полностью исключить “the pulse oximetry gap”. Основные недостатки — инвазивность и невозможность мониторировать дериваты гемоглобина;
2. *Цианидный фотометрический метод выявления метгемоглобина.* Метод считается референсным [8]. Используют также *инвазивные СО-оксиметрические методы определения MetHb*;
3. *Методы многоволновой пульсовой оптической СО-оксиметрии (multiwave length pulse CO-oximetry) и многоволновой пульсовой импульсной спектроскопии.* Многоволновые пульсовые методы предназначены для раздельного определения дериватов Hb. Указанные методы обеспечивают точность измерения дериватов Hb, сопоставимую с результатами инвазивного многоволнового оптического анализа [11, 18–22].

Величина “the pulse oximetry gap” при использовании указанных методов минимальна, но зависит от применяемой техники и может зависеть от выраженности гипоксемии [3, 5, 20, 16 и мн. др.].

Например, в пульсовых СО-оксиметрах компании Masimo Corporation используется уже не 2 волны, а от 5 до 12 длин волн. Важная особенность технологии Masimo SET связана со значительным ограничением помех при движении пациентов и при недостаточной перфузии ко-

нечностей, а также с высокой способностью изолировать нужный для пульсоксиметрии пульсирующий артериальный компонент от ненужного постоянного [19, 20].

В 2013 г. Feiner J. R., Rollins M. D., Sall J. W. et al. [20] сопоставили уровни оксигемоглобина и COHb у некурящих здоровых лиц при одновременном проведении многоволновой СО-оксиметрии и многоволнового оптического анализа крови из лучевой артерии. При этом были использованы 2 разных датчика Masimo Rainbow, которые накладывали на указательный и безымянный пальцы обеих рук.

Для сопоставления неинвазивных и инвазивных величин анализируемых параметров у каждого из 12 обследованных волонтеров были взяты 25 проб крови и смоделированы 3 клинические ситуации: *нормоксемия с постепенным ступенчатым повышением COHb до 12%; гипоксемия со ступенчатым снижением  $\text{SaO}_2$  до 80%; гипоксемия в сочетании с карбоксигемоглобинемией* [20].

Многоволновая пульсовая СО-оксиметрия продемонстрировала приемлемую точность в диагностике гипоксемии, которая для  $\text{SpO}_2$  составила  $0,44 \pm 1,69\%$  при  $\text{COHb} < 4\%$  и  $-0,29 \pm 1,64\%$  при  $\text{COHb} \geq 4\%$ . В случае нормоксемии и умеренной гипоксемии точность многоволновой пульсовой СО-оксиметрии также оказалась приемлемой. Однако при  $\text{SaO}_2 < 85\%$  многоволновая пульсовая СО-оксиметрия не смогла точно измерить COHb из-за неудовлетворительного качества сигнала [20].

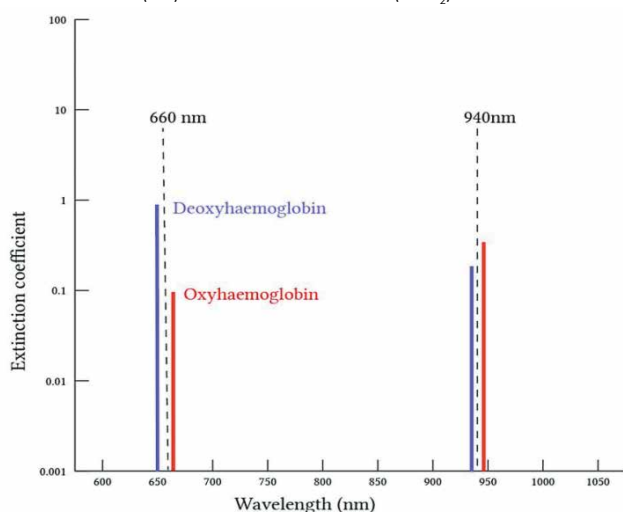
Относительно недавно был разработан один из самых современных вариантов многоволновой пульсоксиметрии с применением уже сотен длин волн видимого и инфракрасного спектров света (например, 350 длин волн в диапазоне от 500 до 850 нм в одном из приборов с подобной технологией). Данный метод был реализован в методике *многоволновой пульсовой импульсной спектроскопии* [21].

Разработчики для расчета дериватов гемоглобина применили 15 миллионов одиночных 12-битных импульсов, генерируемых в 1 секунду. Световые спектры предварительно калибровались по белому цвету, а затем переносились на 40 усредненных спектров поглощения света, приведённых к 1 секунде. Затем спектральное поглощение света использовалось для раздельного определения  $\text{SpO}_2$ , MetHb и COHb [21].

Результаты применения многоволновой пульсовой импульсной спектроскопии были опубликованы в 2016 г. Kulcke A., Feiner J., Menn I. et al. [21]. Целью исследования явилось сопоставление уровней оксигемоглобина, COHb и MetHb при одновременном проведении неинвазивной многоволновой импульсной спектроскопии (V-Spec™ Sensors) и инвазивного многоволнового оптического анализа крови, полученной с помощью катетеризации лучевой артерии (ABL90 FLEX; Radiometer Medical A/S) у 19 здоровых волонтеров во время моделированной гипоксемии, карбоксигемоглобинемии и метгемоглобинемии.

У волонтеров было взято до 250 проб артериальной крови и использованы до 888 показаний импульсной спектроскопии. Анализировали 3 клинические ситуации: *гипоксемию с  $\text{HbO}_2$  в диапазоне от 100 до 58,5%; нормоксемию с повышенными до 10% уровнями COHb и MetHb;*

Рисунок 1. Особенности абсорбции красного и ближнего инфракрасного спектров света восстановленным (деоксигенированным) гемоглобином (Hb) и оксигемоглобином ( $\text{HbO}_2$ )



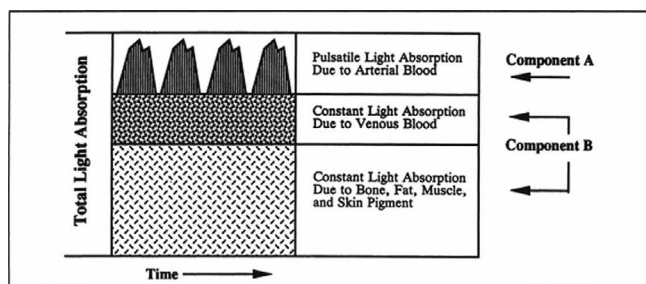


Рисунок 2. «Пульсирующий» (А) и «постоянный» (В) компоненты абсорбции света при проведении транскутанной пульсоксиметрии

гипоксемию со снижением  $\text{HbO}_2$  до 80% в сочетании с 10% уровнями  $\text{COHb}$  или  $\text{MetHb}$  [21].

Многоволновая пульсовая импульсная спектроскопия продемонстрировала минимальное отклонение  $\text{SpO}_2$  от величины  $\text{HbO}_2$  при  $\text{HbO}_2$  от 60 до 100% ( $0,06 \pm 1,3\%$ ). При более низких значениях  $\text{HbO}_2$  отклонение  $\text{SpO}_2$  от  $\text{HbO}_2$  возрастало. Отклонения  $\text{COHb}$  и  $\text{MetHb}$  при умеренной гипоксемии оказались небольшими ( $0,45 \pm 1,63$  и  $0,36 \pm 0,80$ ). Точность выявления гипоксемии при повышенных уровнях  $\text{COHb}$  с помощью обсуждаемого метода оказалась достаточной. При повышенных ( $>10\%$ ) уровнях  $\text{MetHb}$  было выявлено существенное отрицательное отклонение (до  $-10,3\%$ )  $\text{SpO}_2$  от  $\text{HbO}_2$  [21].

К сожалению, стоимость оборудования для проведения многоволновой пульсовой оптической СО-оксиметрии и многоволновой импульсной спектроскопии очень высока по сравнению со стоимостью двухволновых пульсоксиметров, что ограничивает их массовое применение.

4. Транскутанная двухволновая пульсоксиметрия — самый распространённый в клинике неинвазивный метод оценки оксигенации крови. При этом казавшиеся «незыблемыми» классические принципы применения данного метода также модернизируются и трансформируются.

Например, появились транскутанные пульсоксиметры с двухинфракрасными датчиками, в которых применена абсорбция двух инфракрасных волн (761 и 820 нм), а не абсорбция 2 волн в красном и инфракрасном спектрах света [23].

Ограничение двухинфракрасного метода по сравнению с технологией 2-волновой пульсоксиметрии — меньший сигнал, который может привести к нежелательному уменьшению отношения сигнал/шум. Однако, при использовании двухинфракрасной технологии пульсоксиметрии указанный недостаток компенсируется «эффектом сокращения длины оптических путей» [23].

В 2023 г. Elron E., Bromiker R., Gleisner O. et al. опубликовали результаты сравнения точности транскутанной пульсоксиметрии в случае применения двух датчиков — классического 2-волнового (в красном и инфракрасном спектрах) датчика для новорожденных и экспериментального двухинфракрасного. В первом случае полученные сигналы поступали в пульсоксиметр Nellcor от классического 2-волнового датчика, а во втором случае — от двухинфракрасного с длинами волн в ближнем инфракрасном спектре (761 и 820 нм). Для минимизации «шума» были применены новые физические принципы [23].

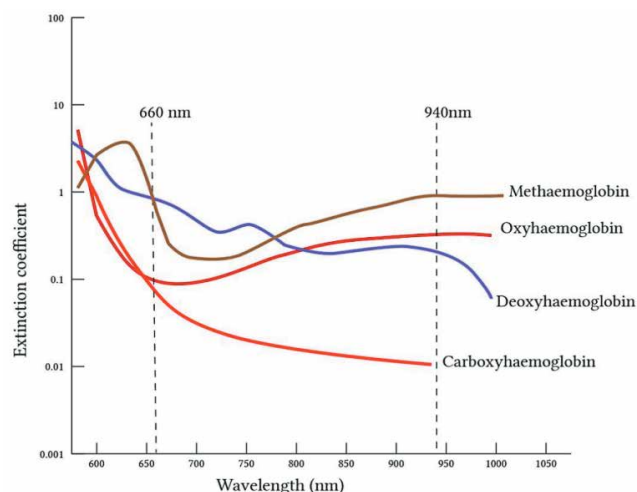
Были обследованы [23] 17 новорожденных с врождёнными пороками сердца и  $\text{SpO}_2 < 90\%$ . Для оценки фракционной оксигенации крови новорожденным было использовано взятие крови с помощью пупочных или периферических артериальных катетеров. Оба пульсоксиметрических датчика продемонстрировали завышение уровня оксигенации крови. При этом разница  $\text{SpO}_2 - \text{SaO}_2$  ожидаемо возросла при усилении инвазивно измеренной гипоксемии. Однако стандартное отклонение разницы  $\text{SpO}_2 - \text{SaO}_2$  за счёт «эффекта сокращения длины оптических путей» при использовании двухинфракрасного датчика было достоверно меньшим, чем при использовании классического 2-волнового пульсоксиметрического датчика ( $\text{SD} = 3,6$  против  $\text{SD} = 6,5$ ).

Ещё один современный вариант 2-волновой пульсоксиметрии — т.н. «компьютерная пульсоксиметрия» (в качестве более точного предлагаем термин «спектральная пульсоксиметрия» — **примеч. авторов**), позволяющая после компьютерной обработки анализировать спектры  $\text{SpO}_2$  в пределах 95–100%, 90–94%, 85–89% и др.), зарегистрированные в состоянии покоя или во время сна или при выполнении теста с 6-минутной ходьбой [24].

Однако, без учёта дисфункциональных дериватов гемоглобина, спектральные показатели оксигенации крови также будут искажены за счёт «the pulse oximetry gap» (особенно у курильщиков), т.к. абсорбция света  $\text{COHb}$  и  $\text{HbO}_2$  почти идентична и  $\text{COHb}$  воспринимается как оксигемоглобин [11, 25–30 и др.].

В случае повышенных значений  $\text{MetHb}$  ситуация более сложная. Это связано с особенностями абсорбции света  $\text{HbO}_2$  и  $\text{MetHb}$  в красном и ближнем инфракрасном спектрах. При уровне  $\text{MetHb}$  в 35% и фракционном насыщении  $\text{Hb}$  кислородом  $>85\%$ , 2-волновой пульсоксиметр «занизит» значение оксигемоглобина примерно до 85%. Если же фракционное насыщение  $\text{Hb}$  кислородом  $<85\%$ , то 2-волновой пульсоксиметр его «завысит» до указанного уровня ( $\approx 85\%$ ). При дальнейшем увеличении  $\text{MetHb}$  зна-

Рисунок 3. Кривые поглощения света дериватами гемоглобина



**Примечание:** коэффициенты поглощения четырех основных дериватов гемоглобина представлены в зависимости от длины волны света.  $\text{COHb}$  и  $\text{HbO}_2$  одинаково поглощают красный свет. Поглощение красного света  $\text{MetHb}$  и  $\text{Hb}$  также идентично [9].

чение  $\text{SpO}_2$  существенно не изменится и останется на достигнутом «плато» [31].

MetHb образуется при окислении циркулирующего Hb, который при этом теряет способность переносить  $\text{O}_2$ . Противостоит данной реакции метгемоглобинредуктаза [31]. Метгемоглобинемия возникает, в частности, под воздействием нитритов и нитратов, ароматических аминов, хлорбензола, некоторых местных анестетиков, хлорохина, нитропрусида, нитроглицерина и других веществ [32, 33]. Известно, что вдыхание дыма во время пожаров и отравление выхлопными газами автомобилей могут привести к повышению MetHb, а не только COHb. При метгемоглобинемии кислородотерапия неэффективна [32–34].

COHb образуется при химической реакции CO с Hb, что неизбежно приводит к вытеснению кислорода. Период полураспада COHb составляет >5 часов [8, 14, 25, 35–37].

В клетках ретикулоэндотелиальной системы эритроциты распадаются с образованием CO. За счёт этого механизма образуется около 79% эндогенной CO. Распад миоглобина, цитохромов, металлосодержащих ферментов, перекисное окисление липидов, итог жизненного цикла некоторых бактерий, воздействие ксенобиотиков приводят к образованию ещё 21% эндогенной CO [14, 25, 38, 39]. Выхлопы автомобилей, дым при сгорании топлива, природный газ, табачный дым, воздействие некоторых аэрозольных красок — основные экзогенные источники CO.

Под воздействием CO возникают все известные виды гипоксии: гемическая, гипоксическая и циркуляторная. Избыточный уровень COHb приводит к смещению кривой диссоциации  $\text{HbO}_2$  влево с развитием кислородного «обкрадывания» тканей, т.к. отдача  $\text{O}_2$  из крови в ткани и жизненно важные органы при этом уменьшается [8, 40].

Сродство CO к сердечному миоглобину в 3 раза выше, чем к скелетному. Поэтому возможны «отсроченные» симптомы воздействия окиси углерода, обусловленные медленным высвобождением CO из карбоксимиоглобина (MbCO) с образованием COHb. Нельзя не вспомнить о табакокурении, которое является хронической формой «отравления» CO с нерезко, но длительно (годами и десятилетиями), повышенным уровнем COHb [8, 25].

Отравление CO может проявиться неспецифическими симптомами (головные боли), имитирующими другие расстройства (пищевое отравление, алкогольная интоксикация, острая психическая декомпенсация, «гриппоподобные симптомы») или истинными расстройствами, которые провоцируются CO (стенокардия, обмороки). Диагноз отравления угарным газом часто затруднён. CO нарушает функции миоглобина и митохондрий, активирует гуанилатциклазу с вазодилатацией и гипотензией, усиливает перекисное окисление липидов с микрососудистыми нарушениями и реперфузионными повреждениями.

При повышении COHb значения  $\text{SpO}_2$  (при 2-волновой пульсоксиметрии) всегда завышены, что не позволяет своевременно диагностировать ДН, например, у курильщиков, особенно с хронической обструктивной болезнью лёгких или бронхиальной астмой (БА). Выявлено ошибочное завышение уровня оксигенации крови при пульсоксиметрии

примерно на 1% в случае прироста на такую же величину уровня COHb [21, 25, 41].

В материалах GINA 2007 года [42] было обращено внимание на результаты исследований Horvath I. и Barnes P. J. [42, 43], которые у некурящих (!) здоровых лиц с признаками атопии выявили в выдыхаемом воздухе достоверное повышение CO по сравнению с некурящими здоровыми лицами без атопии. Поэтому эксперты GINA предложили в качестве неинвазивного маркера воспаления дыхательных путей у некурящих больных БА не только повышенный уровень NO (FeNO), но и повышенный уровень CO (FeCO) в выдыхаемом воздухе.

Мы также выявили достоверно более высокий уровень FeCO, в т.ч. и у некурящих пациентов [44]. В частности, уровень CO в выдыхаемом воздухе был достоверно выше у молодых некурящих больных БА по сравнению с молодыми здоровыми некурящими лицами без атопии. При этом уровни COHb также аналогично и достоверно отличались.

“The pulse oximetry gap” (ошибка пульсоксиметрии), зарегистрированная нами после коррекции  $\text{SpO}_2$  на COHb, у здоровых некурящих лиц составила в среднем +0,3%, а у некурящих пациентов с аллергической БА составила уже +0,5% ( $p < 0,001$ ). Разумеется, данный способ определения “the pulse oximetry gap” нельзя назвать классическим, но теоретически он допустим, т.к. коррекция  $\text{SpO}_2$  на COHb приближает функциональное насыщение гемоглобина кислородом к фракционному, хотя и без учёта (в нашем случае) метгемоглобина [44].

Возможность клинически значимого повышения уровня COHb и MetHb была выявлена и у больных COVID-19 (в т.ч. у некурящих), особенно при тяжёлом течении заболевания [45–47].

В 2020 г. Scholkmann F., Restin T., Ferrari M., Quaresima V. [45] опубликовали обзор по результатам 7 публикаций по метгемоглобинемии и 3 публикаций по карбоксигемоглобинемии у ковидных больных. Отмечалось, что увеличение MetHb и COHb может произойти у пациентов с COVID-19, особенно у тяжелобольных, иногда до опасно высоких уровней.

Лекарства (гидроксихлорохин), назначаемые пациенту, и статус глюкозо-6-фосфатдегидрогеназы пациента влияют на выраженность метгемоглобинемии и карбоксигемоглобинемии. По мнению авторов «тяжёлым» больным с COVID-19 рекомендован регулярный контроль уровней MetHb и COHb. При этом, по известным причинам (появление “the pulse oximetry gap”, **примеч. авторов**), была отмечена возможность неправильной интерпретации показаний пульсоксиметрии при карбокси- и метгемоглобинемии [45].

Точность пульсоксиметрии при COVID-19 важна, т.к. согласно федеральным рекомендациям по COVID-19, пульсоксиметрия у ковидных больных назначается для «выявления ДН и оценки выраженности гипоксемии» [48]. Для объективной оценки тяжести ковидных больных выделяют 3 пограничных значения  $\text{SpO}_2$  — <95% (характерно для среднетяжёлого течения заболевания), ≤92% (показание к госпитализации в реанимационное отделение) и <91% (высокая вероятность неблагоприятного

ного исхода) [13, 48–50]. По некоторым данным уровень  $\text{SpO}_2 < 90,5\%$  у ковидных пациентов ассоциирован с низкой выживаемостью [50].

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При диагностике ДН необходимо учитывать погрешность  $\text{SpO}_2$ . Одна из распространённых причин такой погрешности — феномен “the pulse oximetry gap”.

Минимизация «ошибки пульсоксиметрии» позволяет улучшить скрининг дыхательной недостаточности. Для этого с успехом могут быть применены *многоволновая пульсовая оптическая СО-оксиметрия и/или многоволновая пульсовая импульсная спектроскопия*, технология которых предусматривает отдельный учёт уровней основных функциональных и дисфункциональных гемоглобинов.

Применение транскутанной 2-волновой пульсоксиметрии для скрининга ДН ассоциировано с большей величиной “the pulse oximetry gap” (особенно у курильщиков), и, следовательно, с большей погрешностью  $\text{SpO}_2$ . Для минимизации возникающей «ошибки пульсоксиметрии» целесообразно корректировать  $\text{SpO}_2$  на уровень дисфункциональных дериватов гемоглобина, особенно на уровни  $\text{CONH}$  и  $\text{MetHb}$  [51–52].

Возможные преимущества двухинфракрасных датчиков перед традиционными красно-инфракрасными датчиками при проведении двухволновой пульсоксиметрии требуют дальнейшего изучения и дополнительного клинического подтверждения.

Уровень основных дисфункциональных гемоглобинов у некоторых (в том числе, у некурящих) пациентов в представленных выше клинических ситуациях может повышаться, приводя к дополнительному нарушению транспорта кислорода.

# Список литературы / References:

- Дембо А. Г. Недостаточность функции внешнего дыхания. Л.: Медгиз, 1957;
- Оксигеметрия. Большая Медицинская Энциклопедия (БМЭ), под редакцией Петровского Б. В., 3-е издание. [Электронный ресурс] // URL: <https://xn-90aw5c.xn--c1avg/index.php/%D0%9E%D0%9A%D0%A1%D0%98%D0%93%D0%95%D0%9C%D0%9E%D0%9C%D0%95%D0%A2%D0%A0%D0%98%D0%AF?ysclid=lnwfyoda496962637>; (Дата обращения 29.07.2023);
- Touger M., Birnbaum A., Wang J., Chou K. et al. Performance of the RAD-57 pulse CO-oximeter compared with standard laboratory carboxyhemoglobin measurement. Ann. Emerg. Med. 2010; 56 (4): 382–388. DOI: 10.1016/j.annemergmed;
- Severinghaus J. W. Takuo Aoyagi: discovery of pulse oximetry. Anesthesia and analgesia. 2007; 105(6):1–4. DOI: 10.1213/01.ane.0000269514.31660.09;
- Шурыгин И. А. Мониторинг дыхания: пульсоксиметрия, капнография, оксиметрия: СПб.: Невский Диалект, 2000:301 С.;
- Федотов А. А., Акулов С. А., Конохов В. Н. Технические методы диагностических исследований и лечебных воздействий: Комплекс метод. указаний. Самар. нац. исслед. ун-т.: Самара, 2016: 56 С.;
- Кушаковский М. С. Клинические формы повреждения гемоглобина (этиология, патогенез, спектрофотометрические и биохимические методы исследования, диагностика, лечение). Л.: Медицина. 1968: 18–21;
- Фаткулин К. В., Гильманов А. Ж., Костюков Д. В. Клиническое значение и современные методологические аспекты определения уровня карбокси- и метгемоглобина в крови. Информационный сайт в области медицины «Медицинская практика». 2014. [Электронный ресурс] // URL: <https://mfvt.ru/klinicheskoe-znachenie-i-sovremennye-metodologicheskie-aspekty-opredeleniya-urovnya-karboksi-i-metgemoglobina-v-krovi/> (Дата обращения: 24.01.2022);
- Edward D. Chan, Michael M. Chan, Mallory M. Chan. Pulse oximetry: Understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations, Respiratory Medicine. 2013; Vol. 107(Issue 6):789–799. DOI: 10.1016/j.rmed.2013.02.004;
- Bozeman W. P., Myers R. A. M., Barish R. A. Confirmation of the pulse oximetry gap in carbon monoxide poisoning. Ann Emerg Med. 1997; (30):608–611;
- Barker S. J., Tremper K. K. The effect of carbon monoxide inhalation on pulse oximeter signal detection. Anesthesiology. 1987; (67):599–603;
- Barker S. J., Tremper K. K. The effect of carbon monoxide inhalation on pulse oximetry and transcutaneous PO<sub>2</sub>. Anesthesiology 1987; 66:677–9;
- Гришин О. В., Гришин В. Г. Клиническое значение пульсоксиметрии у взрослых. Медицинский алфавит. 2020;(25):13–21. DOI: 10.33667/2078–5631–2020–25–13–21;
- Omaye S. T. Metabolic modulation of carbon monoxide toxicity. Toxicology. 2002; (180):139–150;
- Tamura T. Current Progress of Photoplethysmography and SPO<sub>2</sub> for Health Monitoring. Biomed Eng Lett. 2019; Feb; 18;9(1):21–36. DOI: 10.1007/s13534–019–00097-w;
- Pilcher J., Ploen L., McKinstry S. et al A multicentre prospective observational study comparing arterial blood gas values to those obtained by pulse oximeters used in adult patients attending Australian and New Zealand hospitals. BMC Pulm Med. 2020; Jan 9;20(1):7. DOI: 10.1186/s12890–019–1007–3;
- Torp K. D., Modi P., Simon L. V. Pulse Oxymetry In: Stat Pearls [Internet]. Treasure Island (FL): Stat Pearls Publishing; 2023 Jan. 2022 Aug 10. [Электронный ресурс] настр.: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/29262014/> (Дата обращения 31.07.2023)
- Annabi E. H., Barker S. J. Severe methemoglobinemia detected by pulse oximetry. Anesth Analg. 2009; 108(3): 898–899. DOI: 10.1213/ane.0b013e318172af73;
- Barker S. J., Curry J., Redford D., Morgan S. Measurement of carboxyhemoglobin and methemoglobin by pulse oximetry: a human volunteer study. Anesthesiology. 2006; 105(5): 892–897. DOI: 10.1097/0000542–200611000–00008;
- Feiner J. R., Rollins M. D., Sall J. W. et al. Accuracy of carboxyhemoglobin detection by pulse CO-oximetry during hypoxemia. Anesth Analg. 2013; Oct; 117(4):847–858. DOI: 10.1213/ANE.0b013e31828610a0;
- Kulcke A., Weiner J., Menn I. et al. The Accuracy of Pulse Spectroscopy for Detecting Hypoxemia and Coexisting Methemoglobin or Carboxyhemoglobin. Anesth Analg. 2016; Jun;122(6):1856–65. DOI: 10.1213/ANE.0000000000001219;
- Fouzas S., Piffitts K. N., Anthracopoulos M. B. Pulse oximetry in pediatric practice. Pediatrics. 2011 Oct; 128(4):740–52. DOI: 10.1542/peds.2011–0271;
- Elron E., Bromiker R., Gleisner O. Overestimation of Oxygen Saturation Measured by Pulse Oximetry in Hypoxemia. Part 1: Effect of Optical Pathlengths-Ratio Increase. Sensors (Basel). 2023; Jan 28;23(3): 1434. Published on line 2023 Jan 28. DOI: 10.3390/s23031434;
- Бузунов Р. В., Иванова И. А., Кононов Ю. А. и др. Компьютерная пульсоксиметрия в диагностике нарушений дыхания во сне: Ижевск, 2013. — 40 стр.;
- Гноевых В. В., Шорохова Ю. А., Смирнова А. Ю. Устранение диагностической неточности двухволновой пульсоксиметрии в оценке оксигенации крови у курильщиков. «Медицинский алфавит». Кардиология. Неотложная медицина. Современная функциональная диагностика (1). 2022; № 9: 46–49. DOI: 10.33667/2078–5631–2022–9–46–49;
- Руководство ВОЗ по пульсоксиметрии, 2009. [Электронный ресурс] // URL: <https://mayak.help/wp-content/uploads/2016/05/WHO-Pulse-Oximetry-Training-Manual-Final-Russian.pdf> (Дата обращения: 24.01.2022);
- Amal Jubran. Pulse Oximetry. Crit Care. 1999; (3): 11–17;
- Buckley R. G., Aks S. E., Eshom J. L. et al. The pulse oximeter gap in carbon monoxide intoxication. Ann Emerg Med. 1994; (24):252–255;
- Guzman G. A. Carbon Monoxide Poisoning. Critical Care Clinics. 2012; 28(4):537–548. DOI: 10.1016/j.ccc.2012.07.007;
- Wilson Iain. Pulse oximetry — Part 1/I. Wilson. Anaesthesia Tutorial Of The Week 123, 2nd March. 2009:1–7.
- Mokhlesi B., Kamp R. C. Critical Care Nephrology (Second Edition) 2009. [Электронный ресурс] настр.: <https://www.sciencedirect.com/topics/medicine-and-dentistry/methemoglobin> (Дата обращения 30.07.2023);

32. Responding to Terrorism. Chapter 5 — Chemical Agents. A Medical Handbook, 2010:233–344 [Электронный ресурс] на стр.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780080450438000052> (Дата обращения 30.07.2023);
33. Rohrig T.P. Postmortem Clinical Chemistry [Электронный ресурс] на стр.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128151631000113> (Дата обращения 30.07.2023);
34. Cooling L. The RBC as a Physiological Object. [Электронный ресурс] на стр.: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B978012386456706202X> (Дата обращения 30.07.2023);
35. Крамаренко В. Ф. Токсикологическая химия (учебник). Киев: Выща школа, Головное изд-во. 1989: 415–419;
36. Мосур Е. Ю. Спектрофотометрический метод определения содержания основных производных гемоглобина: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. — Омск. 2007;
37. Румянцев Е. В., Антипа Е. В., Чистяков Ю. В. Химические основы жизни. М.: Химия. Колос. 2007: 176–179;
38. Коржов В. И., Видмаченко А. В., Коржов М. В. Монооксид углерода (обзор литературы). Журн. АМН Украины. 2010; 16 (1): 23–37;
39. Шулагин Ю. А. Мониторинг эндогенной моноокиси углерода у человека и животных методами лазерного спектрального анализа: автореф. дис. канд. биол. наук. — М., 2005;
40. West J.B. Respiratory Physiology: The Essentials (eighth edition) Wes: England. 2013;
41. Nitzan M., Romem A., Koppel R. Pulse oximetry: fundamentals and technology update. Med Devices (Auckl). 2014; Jul; 8; 7:231–240. DOI: 10.2147/MDER.S47319;
42. Global Initiative for Asthma, GINA, 2007. [Электронный ресурс] // URL: [https://www.bronho.ru/GINARepor2006\\_Russian.pdf](https://www.bronho.ru/GINARepor2006_Russian.pdf) (Дата обращения: 24.01.2022);
43. Horvath I., Barnes P. J. Exhaled monoxides in asymptomatic atopic subjects. Clin. Exp. Allergy. 1999; 29(9):1276–1280;
44. Смирнова А. Ю., Гноевых В. В., Шалашова Е. А. и др. Клиническое значение дисфункций пульмокардиальной системы у курильщиков с персистирующей бронхиальной астмой. Российский медицинский журнал. 2011; (4):68–73;
45. Scholkmann F., Restin T., Ferrari M. et al. The Role of Methemoglobin and Carboxyhemoglobin in COVID-19: A Review. J Clin Med. 2020 Dec 25; 10(1). pii: E50. DOI: 10.3390/jcm10010050;
46. Faisal H., Ali S. T., Xu J. et al. Carboxyhemoglobinemia in Critically ill Coronavirus Disease 2019 Patients. J Clin Med. 2021 Jun 21; 10(12). pii: 2731. DOI: 10.3390/jcm10122731;
47. Goravey W, Ali GA. DOI: 10.1016/j.idcr.2023.e01705. Epub 2023 Feb 2. [Электронный ресурс] //URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36747910/> (Дата обращения: 30.07.2023)
48. Профилактика, диагностика и лечение новой коронавирусной инфекции (2019-nCoV). Временные методические рекомендации МЗ РФ. Версия 7. — 2020. — С. 122;
49. Лекция профессора С. Н. Авдеева: [Электронный ресурс] <https://1med.tv/archive/koronavirus-2020/covid19-podkhody-k-diagnostike-i-terapii-avdeev.html> (Дата обращения: 30.05.2020);
50. Xie J., Covassin N., Fan Z., et al. Association Between Hypoxemia and Mortality in Patients With COVID-19. Mayo Clin Proc. 2020 Apr. — 11; S0025-6196(20)30367-0. DOI: 10.1016/j.mayocp.2020.04.006;
51. Гноевых В. В., Шляпин В. А., Шорохова Ю. А., Смирнова А. Ю., Чернова Н. Г. Программа ЭВМ для коррекции по уровню карбоксигемоглобина результатов мониторингирования оксигенации крови при проведении транскутанной двухволновой пульсоксиметрии. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2020618117; дата государственной регистрации 17.07.2020 г.;
52. Гноевых В. В., Шорохова Ю. А., Смирнова А. Ю., Ефремова Е. В. Диагностика и клиническое значение «скрытых» спектральных нарушений оксигенации крови у курильщиков с обострением бронхиальной астмы. «Архив внутренней медицины». 2023; 13(1): 75–80. DOI: 10.20514/2226-6704-2023-13-1-75-80.

#### Сведения об авторах

**Гноевых Валерий Викторович** — д.м.н., профессор, заведующий кафедрой пропедевтики внутренних болезней. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8009-0557>;

**Смирнова Анна Юрьевна** — к.м.н., доцент кафедры пропедевтики внутренних болезней. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8175-5867>;

**Шорохова Юлия Анатольевна** — к.м.н., доцент кафедры пропедевтики внутренних болезней. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3991-0813>;

**Чернова Надежда Георгиевна** — старший преподаватель кафедры пропедевтики внутренних болезней. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1781-6968>;

**Крестьянинов Максим Вячеславович** — к.м.н., старший преподаватель кафедры пропедевтики внутренних болезней. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3616-7246>;

**Песков Андрей Борисович** — д.м.н., профессор, декан факультета последипломного, медицинского и фармацевтического образования. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7323-9934>;

**Разин Владимир Александрович** — д.м.н., профессор кафедры факультетской терапии. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8557-1296>.

<sup>1</sup> ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный университет», г. Ульяновск, Россия

#### Автор для переписки:

Гноевых Валерий Викторович. E-mail: [valvik@inbox.ru](mailto:valvik@inbox.ru)

#### About authors

**Gnoevykh Valery Viktorovich** — MD, Professor, Head of the Department of Internal Medicine Propaedeutics. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8009-0557>;

**Smirnova Anna Yurievna** — Candidate of Medical Sciences, Associate Professor, Department of Propaedeutics of Internal Diseases. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-8175-5867>;

**Shorokhova Yulia Anatolievna** — Candidate of medical sciences, associate professor of the department of propaedeutics of internal diseases. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-3991-0813>;

**Chernova Nadezhda Georgievna** — Senior Lecturer, Department of Propaedeutics of Internal Medicine. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-1781-6968>;

**Krestyaninov Maxim Vyacheslavovich** — Candidate of Medical Sciences, Senior Lecturer of the Department of Internal Medicine Propaedeutics. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3616-7246>;

**Andrey Borisovich Peskov** — Doctor of Medical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Postgraduate, Medical and Pharmaceutical Education. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7323-9934>;

**Razin Vladimir Aleksandrovich** — Doctor of medical sciences, professor, professor of the department of faculty therapy. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-8557-1296>.

<sup>1</sup> FGBOU VO "Ulyanovsk State University", Ulyanovsk, Russia

#### Corresponding author:

Gnoevykh Valery Viktorovich. E-mail: [valvik@inbox.ru](mailto:valvik@inbox.ru)

Статья поступила / Received 18.10.2023  
Получена после рецензирования / Revised 20.10.2023  
Принята в печать / Accepted 20.11.2023

**Для цитирования:** Гноевых В. В., Смирнова А. Ю., Шорохова Ю. А., Чернова Н. Г., Крестьянинов М. В., Песков А. Б., Разин В. А. "The pulse oximetry gap" или «ошибка пульсоксиметрии»: определение, причины, диагностика и клиническое значение. Медицинский алфавит. 2023;(32):20–26. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2023-32-20-26>

**For citation:** Gnoevykh V. V., Smirnova A. Yu., Shorokhova Yu. A., Krestyaninov M. V., Peskov A. B., Razin V. A. "The pulse oximetry gap": definition, reasons, diagnostics and clinical significance. Medical alphabet. 2023;(32):20–26. <https://doi.org/10.33667/2078-5631-2023-32-20-26>

