



Методы пульсоксиметрии: возможности и ограничения

Гаранин А. А., Дьячков В. А., Рубаненко А. О., Репринцева О. А., Дупляков Д. В.

Целью описательного обзора явилась оценка современных литературных данных, посвященных различным методам пульсоксиметрии, их преимуществам и недостаткам. Современные методы определения сатурации с помощью пульсоксиметрии в целом хорошо соотносятся с инвазивными методами оценки данного показателя, что позволяет широко использовать ее в реальной клинической практике. В то же время для повышения точности измерения сатурации необходимо учитывать имеющиеся ограничения различных методик пульсоксиметрии. Появление и внедрение в клиническую практику методики рефракционной пульсоксиметрии позволяет в значительной мере компенсировать ограничения традиционной трансмиссионной пульсоксиметрии, касающиеся периферической гипоперфузии, невысокого времени отклика, ограничений, связанных с особенностью ногтей пациента. В случае возникновения особых ситуаций, при которых измерение сатурации кислорода с помощью пульсоксиметрии может оказаться недостаточно точным (отравление угарным газом, метгемоглобинемия, выраженная анемия, выраженная трикуспидальная недостаточность и т.д.), рекомендуется тщательная клиническая оценка пациента, а также контроль данных пульсоксиметрии с помощью инвазивных методик.

Ключевые слова: пульсоксиметрия, трансмиссионная пульсоксиметрия, рефракционная пульсоксиметрия, сатурация.

Отношения и деятельность: нет.

ФГБОУ ВО Самарский государственный медицинский университет Минздрава России, Самара, Россия.

Гаранин А. А.* — к.м.н., директор НПЦ дистанционной медицины, ORCID: 0000-0001-6665-1533, Дьячков В. А. — к.м.н., доцент кафедры пропедевтической терапии, ORCID: 0000-0001-8891-6088, Рубаненко А. О. — к.м.н., доцент кафедры пропедевтической терапии, ORCID: 0000-0002-3996-4689, Репринцева О. А. — врач по медицинской профилактике, ORCID: 0009-0004-8167-5655, Дупляков Д. В. — д.м.н., профессор, зав. кафедрой пропедевтической терапии, ORCID: 0000-0003-2773-1682.

*Автор, ответственный за переписку (Corresponding author):

sameagle@yandex.ru

ДИ — доверительный интервал.

Рукопись получена 18.05.2023

Рецензия получена 15.06.2023

Принята к публикации 02.08.2023



Для цитирования: Гаранин А. А., Дьячков В. А., Рубаненко А. О., Репринцева О. А., Дупляков Д. В. Методы пульсоксиметрии: возможности и ограничения. *Российский кардиологический журнал*. 2023;28(3S):5467. doi:10.15829/1560-4071-2023-5467. EDN LWXJYA

Pulse oximetry methods: opportunities and limitations

Garanin A. A., Dyachkov V. A., Rubanenko A. O., Reprintseva O. A., Duplyakov D. V.

The aim of this review was to evaluate the current literature on various methods of pulse oximetry, their advantages and disadvantages. Modern pulse oximetry methods generally correlate well with invasive saturation monitoring, which makes it possible to be widely used in clinical practice. At the same time, in order to improve the accuracy of saturation measurements, existing limitations of various pulse oximetry methods should be taken into account. The emergence and introduction into clinical practice of reflectance pulse oximetry can largely compensate for the limitations of traditional transmission pulse oximetry regarding peripheral hypoperfusion, low response time, and features of patient's nails. In the event of special situations when pulse oximetry may not be accurate enough (carbon monoxide poisoning, methemoglobinemia, severe anemia, severe tricuspid insufficiency, etc.), a thorough clinical assessment of the patient is recommended, as well as invasive saturation monitoring.

Keywords: pulse oximetry, transmission pulse oximetry, reflectance pulse oximetry, saturation.

Relationships and Activities: none.

Samara State Medical University, Samara, Russia.

Garanin A. A.* ORCID: 0000-0001-6665-1533, Dyachkov V. A. ORCID: 0000-0001-8891-6088, Rubanenko A. O. ORCID: 0000-0002-3996-4689, Reprintseva O. A. ORCID: 0009-0004-8167-5655, Duplyakov D. V. ORCID: 0000-0003-2773-1682.

*Corresponding author: sameagle@yandex.ru

Received: 18.05.2023 **Revision Received:** 15.06.2023 **Accepted:** 02.08.2023

For citation: Garanin A. A., Dyachkov V. A., Rubanenko A. O., Reprintseva O. A., Duplyakov D. V. Pulse oximetry methods: opportunities and limitations. *Russian Journal of Cardiology*. 2023;28(3S):5467. doi:10.15829/1560-4071-2023-5467. EDN LWXJYA

В настоящее время "золотым" стандартом определения газообменной функции легких является оценка газового состава крови с измерением парциального давления кислорода и углекислого газа, выполняющаяся инвазивно (исследование артериальной или венозной крови) с использованием газоанализаторов [1, 2]. В то же время в некоторых исследованиях в качестве референсного метода использовались СО ок-

симетры, представляющие собой приборы для инвазивного измерения показателей переноса кислорода гемоглобином в образце крови [3]. Инвазивные методы оценки вышеуказанных показателей используются, как правило, в отделениях реанимации и интенсивной терапии и малоприменимы в амбулаторных условиях. В связи с этим в клиническую практику в настоящее время широко внедрен неинвазивный

метод оценки насыщения крови кислородом, получивший название пульсоксиметрия [4-6].

Существующие портативные модели для неинвазивной пульсоксиметрии не лишены недостатков, некоторые из которых являются критическими и будут рассмотрены ниже. Авторы полагают, что актуализация обозначенной темы может быть полезной для ученых и клиницистов, чьи усилия направлены на реализацию научно-практических проектов по разработке и внедрению в практику новых приборов для определения уровня сатурации. Практический интерес к данной теме может быть обусловлен необходимостью импортозамещения и стимулированием технологического суверенитета нашей страны, в т.ч. в части разработки отечественных изделий медицинского назначения.

Цель настоящего описательного обзора — актуализация сведений, посвященных различным методам пульсоксиметрии, их преимуществам и недостаткам, а также возможности применения у пациентов с хроническими неинфекционными заболеваниями и, прежде всего, с болезнями системы кровообращения.

Методология поиска

Поиск литературных источников осуществлялся в литературных базах ClinicalTrials, PubMed, eLIBRARY на русском и английском языках за период 2000-2023гг. Поисковые запросы включали в себя слова: "pulse oximetry" ("пульсоксиметрия"), "oxygen saturation" ("сатурация кислорода"), "limitations" ("ограничения"). Всего было проанализировано 750 источников, поиск включал систематические обзоры, опубликованные и неопубликованные рандомизированные контролируемые исследования и репрезентативные контролируемые наблюдательные исследования, в которых сообщалось о скорректированных оценках эффекта. В окончательный анализ публикаций не включались постерные доклады, диссертации, симпозиумы, клинические случаи и серии клинических случаев, письма читателям, исследования на животных, рекомендации.

Результаты

Сущность метода пульсоксиметрии

Пульсоксиметрия — неинвазивный метод оценки степени насыщения крови кислородом, т.е. процентного содержания оксигемоглобина в артериальной крови (сатурации). Принцип метода основан на способности связанного и несвязанного с кислородом гемоглобина абсорбировать световые волны различного диапазона [6]. Первые сведения о возможности использования пульсоксиметрии датируются 1874г, один из первых подобных приборов был создан в 1936г, а первый пульсоксиметр — в 1975г [7].

Как известно, оксигемоглобин способен в большей мере абсорбировать свет в инфракрасном диапазоне,

в то время как дезоксигемоглобин больше поглощает красный свет. В связи с этим для реализации методики пульсоксиметрии применяют датчик, который включает в себя два элемента: в первом располагаются два излучателя, испускающих свет в красном и инфракрасном диапазонах, а во втором, расположенном с противоположной стороны, находится фотодетектор, регистрирующий интенсивность светового потока, попадающего на него [6]. Определяя разницу между количеством поглощаемого света в систолу и диастолу, существует возможность определить показатели артериальной пульсации. Исходя из изложенного выше, проводя пульсоксиметрию, можно вычислить сатурацию, которая определяется соотношением количества оксигемоглобина к общему количеству гемоглобина и выражается в процентах. В норме ее диапазон составляет 95-100%. Невзирая на то, что сатурация взаимосвязана с его парциальным давлением в крови, зависимость эта не является линейной.

Области применения метода пульсоксиметрии

Пульсоксиметрия может успешно использоваться у детей, взрослых, а также людей пожилого и старческого возраста, причем нормальные значения сатурации, измеренные с помощью пульсоксиметрии, у людей разного возраста не отличаются. Данный метод широко используется у пациентов с хронической обструктивной болезнью легких [8], бронхиальной астмой [9], внебольничной пневмонией [10] и другими заболеваниями. К настоящему времени известно несколько методов пульсоксиметрии, различные варианты конструкции датчиков и самих приборов [6].

Как было указано выше, пульсоксиметрия может использоваться не только у взрослых, но также и у детей, в частности, у новорожденных. Таким образом, одним из перспективных направлений ее применения является раннее выявление критических врожденных пороков сердца. В проведенном систематическом обзоре в 2018г, включившем 19 исследований и 436758 новорожденных детей, было показано, что чувствительность пульсоксиметрии в выявлении критических пороков сердца у новорожденных составила 76,3% (95% доверительный интервал (ДИ): 69,5-82,0), специфичность — 99,9% (95% ДИ: 99,7-99,9), по сравнению с эхокардиографией [11]. При этом частота ложноположительных результатов составила всего 0,14 (95% ДИ: 0,07-0,22) [11]. По данным Jullien S, et al. (2021), в результате анализа имеющихся рекомендаций и мнений экспертных сообществ, проведенные исследования свидетельствуют о том, что пульсоксиметрия обладает достаточной точностью в выявлении критических врожденных пороков сердца в дополнении к антенатальному ультразвуковому исследованию и физикальному обследованию [12]. Таким образом, проведение пульсоксиметрии может дать ценную информацию у пациентов с различными врожденными пороками сердца [13-15].

Таблица 1

Области применения пульсоксиметрии

Возрастная группа/нозология	Возможности	Примечание
Новорожденные	Раннее выявление критических врожденных пороков сердца	Высокая специфичность; Целесообразно использовать в дополнении к антенатальному ультразвуковому исследованию и физикальному обследованию
ХОБЛ	Выявление признаков гипоксемии	Метод рекомендован у всех пациентов с ХОБЛ, в т.ч. для определения показаний к проведению дополнительной оксигенотерапии
БА	Использование в качестве одного из критериев тяжести обострения	Метод рекомендован у всех пациентов с БА при лечении обострения
Внебольничная пневмония	Выявление пациентов с гипоксемией, нуждающихся в респираторной поддержке	Метод рекомендован у всех пациентов с внебольничной пневмонией
ОРДС	Использование в определении степени тяжести синдрома	Метод рекомендован у пациентов с ОРДС
Хроническая сердечная недостаточность	Определение показаний к проведению оксигенотерапии	Метод рекомендован у пациентов с острой декомпенсацией хронической сердечной недостаточности

Сокращения: БА – бронхиальная астма, ОРДС – острый респираторный дистресс-синдром, ХОБЛ – хроническая обструктивная болезнь легких.

Различные особенности проведения пульсоксиметрии в первую очередь исследовались на пациентах, находящихся в отделениях реанимации и интенсивной терапии.

Так, в обзоре Wick KD, et al. (2022) авторы пришли к заключению, что применение пульсоксиметрии для постановки диагноза, а также для лечения пациентов с острым респираторным дистресс-синдромом может способствовать более раннему его распознаванию во всем мире [16]. Rackley CR в своей работе (2020) сделал вывод, что пульсоксиметрия является точным средством контроля у пациентов, подвергающихся механической вентиляции легких, принимая во внимание тот факт, что у них может наблюдаться быстрое ухудшение состояния ввиду развития дыхательной недостаточности [17].

Сведения о некоторых областях применения пульсоксиметрии представлены в таблице 1.

В целом необходимо отметить, что применение пульсоксиметрии у пациентов с различными заболеваниями обусловлено необходимостью раннего выявления гипоксемии, что может помочь в диагностике, а также определением показаний к проведению оксигенотерапии, что может, в свою очередь, оптимизировать тактику лечения.

Сравнение пульсоксиметрии с инвазивными методами

В литературе имеются данные, что у пациентов в критическом состоянии средние различия между неинвазивным определением сатурации с помощью пульсоксиметра и инвазивным референсным методом (с помощью СО-оксиметра) были менее чем 2% при исходном значении сатурации 90% и более, при этом стандартное отклонение различий измерений двух вышеуказанных методов было менее, чем 3% [18]. В то же время при сатурации у пациента <90%, величина ошибки измерения этого показателя с помощью пульсоксиметра увеличивается, а точность —

снижается [18]. По данным Perkins GD, et al. (2003), при исследовании 41 пациента, находившихся в отделении интенсивной терапии, и анализе 1085 парных измерений (неинвазивным и инвазивным способом) была продемонстрирована умеренная корреляция между данными пульсоксиметрии и инвазивным определением сатурации с помощью СО-оксиметра ($r=0,6$; $p<0,01$) [3]. Авторы показали, что методика пульсоксиметрии имела тенденцию к завышению истинных значений сатурации, определенных инвазивным способом [3]. Сравнение вышеуказанных методов измерения сатурации проводилось также в проспективном обсервационном исследовании Van de Louw A, et al. (2001), в которое было включено 102 пациента, находившихся в отделении интенсивной терапии [19]. В целом авторы получили низкую вероятность ошибки в 0,02%, при этом стандартное отклонение различий измерений составило 2,1%, 95% ДИ находился в диапазоне от -4,22% до 4,18% [19].

В ряде исследований проводилось сравнение данных сатурации, полученных с помощью пульсоксиметрии с инвазивным способом измерения сатурации с помощью газоанализатора. Так, в исследовании Rauniyar N, et al. (2020) при изучении 101 пациента, находившихся в блоке интенсивной терапии, было получено, что процент совпадений между вышеуказанными двумя методами составил 83,2%, при этом пульсоксиметрия имела 84,6% чувствительность и 83% специфичность в измерении сатурации [20]. Авторы пришли к выводу, что пульсоксиметрия имеет высокую точность измерения сатурации при исходном ее уровне >90% и в этом случае может использоваться вместо анализа газового состава крови [20].

В целом следует отметить, что по данным большинства исследований, пульсоксиметры имеют небольшую ошибку измерения сатурации, по сравнению с инвазивными методами, однако достаточно высокие значения доверительных интервалов, что

Таблица 2

Особенности методов пульсоксиметрии

Особенности метода	Трансмиссионная пульсоксиметрия	Рефракционная пульсоксиметрия
Характеристика метода	Регистрация светового потока, который проникает сквозь ткани	Регистрация светового потока, который отражается от ткани
Основные места наложения датчиков	Палец, крыло носа, мочка уха	Лоб
Возможность выбора места исследования	Отсутствует	Имеется
Необходимость располагать излучающий и отражающий датчики симметрично друг напротив друга	Имеется	Отсутствует
Использование при наличии лака, клея на ногтях, деформации ногтевых пластин	Ограничено (для пальцевых датчиков) Возможно (для ушных датчиков)	Возможно
Фиксация датчика	Чаще всего не затруднена	Может быть затруднена

может привести к различиям в показаниях вышеуказанных методов, которые могут иметь клиническое значение и обуславливать различную тактику ведения пациента. Также необходимо принимать во внимание тот факт, что вероятность ошибки измерения при проведении пульсоксиметрии низкая при исходных значениях сатурации >90%, однако она возрастает при снижении ее уровня <90% и значительно возрастает при значениях ниже 70%, ввиду отсутствия контрольных значений. Такие низкие значения сатурации довольно часто могут наблюдаться у пациентов, находящихся в отделении интенсивной терапии. С другой стороны, в вышеуказанных отделениях мониторинг сатурации часто проводится в т.ч. с использованием инвазивных методик. При использовании методики пульсоксиметрии в амбулаторной практике при наблюдении за пациентами вероятность наличия исходных значений сатурации <90% небольшая, следовательно, ценность этой методики возрастает.

Методики пульсоксиметрии

На современном этапе в медицине нашли применение два способа пульсоксиметрии: **трансмиссионная** и **рефракционная**. Проведение **трансмиссионной** пульсоксиметрии основано на способности проникновения светового потока через ткани человека, в связи с этим для определения значений сатурации излучатель и воспринимающий датчик должны располагаться строго на противоположных сторонах, между которыми должна находиться исследуемая область. Для комфортного проведения данного исследования необходимо накладывать датчики на такие небольшие участки тела, как палец, мочка уха, крыло носа. Однако при проведении трансмиссионной пульсоксиметрии могут наблюдаться ряд ограничений при использовании пальцевого датчика. К ним относятся накладные ногти, лак для ногтей, изменения ногтевого ложа при некоторых заболеваниях (симптом "барабанных палочек", симптом "часовых стекол"). В такой ситуации более предпочтительным является применение ушного датчика. Также одним из ограничений трансмиссионного метода пульсо-

ксиметрии является необходимость правильного расположения датчика для корректного определения значений сатурации, обе части датчика должны располагаться симметрично по отношению друг к другу.

Рефракционная (отраженная) пульсоксиметрия основана на регистрации световых волн, которые не поглощаются оксигенированным гемоглобином и отражаются от ткани. Данный метод удобен возможностью применения на разнообразных участках тела, где расположить датчики симметрично друг напротив друга не представляется технически возможным, или расстояние между датчиками будет превышать возможность для регистрации светового потока, например, на животе, лице, предплечье, плече. К преимуществам рефракционной пульсоксиметрии относится возможность выбора места исследования, отсутствие необходимости располагать излучающий и отражающий датчики друг напротив друга, а также возможность использования при деформации ногтевых пластин, наличии лака для ногтей, в отличие от пальцевых трансмиссионных датчиков. Однако при использовании рефракционной пульсоксиметрии определенным ограничением могут стать трудности фиксации датчиков при некоторых вариантах их расположения, например, на коже лба.

Основные особенности методов пульсоксиметрии представлены в таблице 2.

В настоящее время существует достаточно большое количество различных датчиков для проведения пульсоксиметрии, которые могут иметь различные конструктивные особенности в зависимости от места их размещения, например, на пальце, на ухе, на коже лба (обычно используется датчик-прищепка и резиновый датчик), используемой длины волны излучателей, возрастной категории пациентов (взрослый, новорожденный, младенец), санитарной обработке (одно- и многоцветные).

Многоцветные датчики обычно исполнены в виде зажимов (прищепок), которые крепятся на палец, мочку уха, крыло носа, одноразовые, как правило, представлены адгезивными датчиками, которые приклеиваются на палец или лоб пациента. У детей чаще

Таблица 3

Сравнительная характеристика многоцветных и одноцветных датчиков для проведения пульсоксиметрии

Особенность	Многоцветный датчик	Одноцветный датчик
Место наложения датчика	Палец, ухо, крыло носа	Палец, лоб
Вариант исполнения	Датчик-прищепка или резиновый	Адгезивный датчик с пластырем
Возможность повреждения	Высокая (особенно для датчика-прищепки)	Низкая
Соотношение цена/качество	Более высокое, особенно в амбулаторных условиях (в случае необходимости однократного измерения сатурации кислорода большому числу пациентов)	Более низкое (невозможность измерений сатурации кислорода у разных пациентов одним и тем же датчиком)
Скорость наложения датчика	Более быстрая	Более медленная
Возможность регистрации сатурации с разных участков тела в случае получения низкоамплитудных волн	Имеется	Отсутствует
Риск передачи инфекции	Более высокий	Низкий
Надежность крепления датчика	Менее надежно	Более надежно (особенно при движении пациента)
Возможность использования при наличии вазоконстрикции	Ограничена	Имеется

всего используются адгезивные датчики или датчики меньшего размера. В ряде случаев датчик-прищепка для взрослых может использоваться на большом пальце у ребенка [10]. Сравнение между собой одноцветных и многоцветных датчиков представлено в таблице 3 [21].

Кроме того, существуют различные варианты исполнения и самих пульсоксиметров, они могут быть напалечными, ручными и стационарными, а также обычными и цифровыми, и т.д.

Ограничения и недостатки пульсоксиметрии

Как известно, пульсоксиметрия — это непрямой неинвазивный метод оценки легочной вентиляции, следовательно, она не дает представление об уровне парциального давления углекислого газа (PaCO_2). Таким образом, при проведении пульсоксиметрии невозможно оценить степень выраженности гиперкапнии, что может оказать влияние на результаты измерений. Также на показания пульсоксиметра могут повлиять следующие основные факторы [6, 10, 21]:

- яркий свет, направленный на прибор (в пульсоксиметрах используется фотодетектор);
- движения и дрожь пациента (затруднение детекции сигнала);
- периферическая гипоперфузия при шоке, гипотермии, гиповолемии (уменьшение или исчезновение пульсовой волны);
- нарушения ритма сердца (затруднение восприятия пульсового сигнала);
- отравление угарным газом, например, при пожаре (монооксид углерода вытесняет кислород и образует карбоксигемоглобин — ярко-красное соединение);
- анемия (поглощение света зависит от концентрации гемоглобина);
- выраженная трикуспидальная регургитация (определение венозной сатурации);

— неправильное позиционирование датчика (нарушается симметрия, путь световых волн из двух светодиодов неодинаковый);

— наличие лака на ногтях, накладные ногти, деформация ногтевых пластин (затруднение прохождения светового потока);

— внешнее электромагнитное излучение (могут возникать помехи вследствие влияния электромагнитных полей, например, от физиотерапевтической аппаратуры и т.д.).

Таким образом, на результаты измерений сатурации с помощью пульсоксиметрии могут влиять различные факторы, которые, в некоторых случаях, следует учитывать в клинической практике.

Позиционирование датчика пульсоксиметрии. В литературе имеются данные, что ушной датчик пульсоксиметра быстрее реагирует на изменение сатурации, по сравнению с пальцевым датчиком [22]. Авторы вышеуказанного исследования при обследовании 7 мужчин в возрасте от 18 до 35 лет показали, что средняя задержка между появлением наименьших значений сатурации при использовании ушных и пальцевых датчиков пульсоксиметра составила $15 \pm 3,5$ с, при этом, когда ушные датчики показывали наименьшее ее значение ($78 \pm 3,5\%$), пальцевые датчики в этот момент демонстрировали гораздо более высокие цифры ($94,6 \pm 3,5\%$) [22]. В этом исследовании снижение сатурации у участников происходило на фоне задержки дыхания на 60 сек. Поскольку апноэ провоцирует развитие вазоконстрикции, использование ушных датчиков для проведения пульсоксиметрии в данном случае является предпочтительным ввиду более высокой точности измерения. В работе Budidha K, et al. (2018) при изучении 15 здоровых добровольцев было показано, что пальцевой датчик был чувствительным к развитию периферической гипоперфузии, которая моделировалась путем

локальной гипотермии в 10°C [23]. В этом исследовании локальная гипотермия приводила к падению сатурации, измеренной с помощью пальцевого пульсоксиметра, менее 90% у 5 добровольцев, особенно в последние 4 мин воздействия (из 10) по сравнению с 1 добровольцем при использовании внутриушного пульсоксиметра [23]. При использовании рефракционной пульсоксиметрии возможно использовать другие локализации для позиционирования датчиков, например, кожу лба. В исследовании Choi SJ, et al. (2010) при сравнении между собой трансмиссионного пальцевого датчика, а также рефракционного датчика с размещением на лбу у двух пациентов, у которых применялся общий наркоз, было показано, что после эпизода апноэ время наступления десатурации кислорода до 95% составляло 82,0 с (IQR: 67,0-98,5) vs 94,0 с (IQR: 84,0-106,5) ($p < 0,001$), а десатурации до 90% — 94,0 с (IQR: 75,5-109,5) vs 100,0 с (IQR: 84,5-114,5) ($p < 0,001$) для рефракционного и трансмиссионного пульсоксиметра, соответственно [24]. Рефракционный пульсоксиметр в данном исследовании также быстрее реагировал и на ресатурацию, которая возникала при дыхании 100% кислородом через маску, по сравнению с трансмиссионным пульсоксиметром (23,2±5,6 vs 28,9±7,6 с; $p < 0,001$). По результатам проведенного исследования авторы указывают на то, что в ситуациях, когда предполагаются быстрые изменения сатурации, например, при проведении операций в условиях общего наркоза, предпочтительным будет выбор рефракционного пульсоксиметра в связи с его более быстрым откликом на де- и ресатурацию кислорода [24]. В литературе также имеются данные исследований, проведенных Fernandes N, et al. (2007), а также Schallom L, et al. (2007), подтвердивших, что использование рефракционного пульсоксиметра с креплением на лбу сопровождается меньшей вероятностью ошибок измерения и большей точностью, по сравнению с традиционным пальцевым пульсоксиметром [25, 26]. Также определенный интерес представляет использование внутренних датчиков для рефракционной пульсоксиметрии, например, пищеводных датчиков, которые вводятся с помощью зондов [27, 28]. В двух вышеуказанных исследованиях результаты, полученные с помощью пищевого датчика, хорошо соотносились с результатами СО-оксиметра, а также имели меньшую погрешность измерений, по сравнению с пальцевым трансмиссионным пульсоксиметром. Авторы пришли к выводу, что такие датчики могут успешно применяться как альтернатива датчикам с традиционными местами крепления, особенно у пациентов с плохой периферической перфузией, в т.ч. у пациентов с распространенными ожогами, или же при проведении открытых сердечно-сосудистых операций и операций на грудной клетке. Также в литературе имеются сведения об использовании прямо-

го измерения, а также мониторингования сатурации с поверхности внутренних органов, таких как пищевод, желудок, кишечник, печень, для оценки их перфузии при проведении открытых хирургических операций [29], что также может использоваться как альтернатива традиционной пульсоксиметрии.

Таким образом, при сравнении трансмиссионных датчиков пульсоксиметрии с креплением на палец и ухо, а также рефракционного датчика с креплением на лоб, использование последнего представляется более предпочтительным у большинства пациентов, особенно при ухудшении периферической циркуляции, а также при необходимости мониторингования сатурации у пациентов, у которых предполагается быстрое ее изменение, например, во время хирургических операции под общим наркозом. В качестве примера можно назвать операцию коронарного шунтирования, во время которой может наблюдаться быстрое изменение сатурации кислорода, а также наблюдается периферическая гипоперфузия. Более предпочтительное использование датчика с креплением на лбу при наличии у пациента гипоперфузии обуславливается тем, что при таком расположении датчик регистрирует сатурацию с надглазничной артерии, которая имеет обильный кровоток и меньше подвержена вазоконстрикции, в отличие от периферических артерий. При сравнении между собой пальцевого и ушного датчиков, последний представляется более предпочтительным выбором вследствие более быстрой реакции на изменение сатурации кислорода и меньшей зависимости от периферической перфузии. Кроме того, ушной датчик и датчик с фиксацией на лбу лишены недостатка пальцевого датчика — затруднение измерения сатурации при использовании пациентами лака для ногтей, накладных ногтей, а также деформации ногтевых пластин при ряде заболеваний/состояний (например, при симптоме барабанных палочек и часовых стекол).

При проведении открытых хирургических операций можно использовать прямое измерение сатурации различных органов, что может дать хирургу дополнительную информацию об их функционировании.

Анемия. Далее рассмотрим другое ограничение использования метода пульсоксиметрии — наличие у пациента анемии. Как известно, поглощение света при проведении пульсоксиметрии зависит от концентрации гемоглобина, таким образом, низкие его значения могут приводить к искажениям результатов данного метода. При анемии, как известно, требуется более высокий уровень кислорода для обеспечения его транспорта, таким образом, у данных пациентов показатель сатурации может быть неоправданно завышенным. В исследовании Perkins GD, et al. (2003) авторы продемонстрировали, что наличие анемии

хоть и увеличивало вероятность ошибки измерения сатурации в большую сторону, однако данная вероятность увеличивалась незначительно [3]. В исследовании Osborn ZT, et al. (2019) было показано, что методу пульсоксиметрии можно использовать в качестве скрининга на наличие анемии у пациентов, причем чувствительность и специфичность данной методики оказались 81,6% и 75,4%, соответственно [30].

Таким образом, исходя из данных проведенных исследований, наличие анемии, вероятнее всего, не будет приводить к значительному увеличению вероятности ошибки определения сатурации с помощью пульсоксиметрии. В то же время при проведении пульсоксиметрии пациентам с выраженной анемией, а также признаками гипоксии, т.е. исходным ожидаемым низким значением сатурации, оценивать эти данные необходимо аккуратно, принимая во внимание увеличение вероятности ошибок измерения пульсоксиметров при исходных значениях сатурации <90%.

Качественные изменения гемоглобина. К ограничениям метода пульсоксиметрии можно отнести не только количественные, но и качественные изменения гемоглобина, например, наличие у пациента высокой концентрации в крови карбоксигемоглобина, а также метгемоглобина. Традиционные пульсоксиметрические датчики используют две длины волны — 660 и 940 нм для того, чтобы определить соотношение между окси- и дезоксигемоглобином на основании их различных спектров поглощения [31]. Таким образом, точность измерения сатурации с помощью пульсоксиметрии может быть нарушена в присутствии других форм гемоглобина, имеющих аномальный спектр поглощения. Например, поглощение карбоксигемоглобина аналогично оксигемоглобину при длине волны 660 нм. Следовательно, при высоких концентрациях в крови карбоксигемоглобина, наблюдающиеся, например, у людей, пострадавших при пожаре, показатели сатурации при проведении пульсоксиметрии будут неоправданно завышены [31]. Также наличие у пациента в крови высокой концентрации метгемоглобина при метгемоглобинемии будет приводить к его поглощению при длинах волн 660 и 940 нм, сопровождаясь завышенными значениями сатурации в данном случае. Теоретически, к ошибкам в измерении сатурации может приводить использование пульсоксиметрии у пациентов с серповидно-клеточной анемией. При этом заболевании у пациентов образуется аномальный гемоглобин — S, неизмерение которого при проведении пульсоксиметрии может приводить к ложному снижению сатурации, что было подтверждено в исследовании Fitzgerald RK, et al. (2001) [32]. С другой стороны, хотя недооценка истинного значения сатурации в данном исследовании имела место, однако ошибка составила всего -1,6% (95% ДИ: от

-0,3 до -3; $p=0,03$), что, скорее всего, не будет иметь самостоятельного значения в клинической практике [32]. В то же время некоторые авторы указывают на возможную переоценку значений сатурации у пациентов с серповидно-клеточной анемией при образовании большого количества карбоксигемоглобина вследствие гемолиза эритроцитов, однако эти данные оказались противоречивыми.

Путем решения вышеуказанной проблемы с некоторым возможным увеличением количества ошибок в определении сатурации у пациентов с качественными изменениями гемоглобина может быть использование инвазивного измерения сатурации с помощью современных СО-оксиметров, которые используют множество различных длин волн света, тем самым позволяя измерять концентрацию оксигемоглобина, дезоксигемоглобина, карбоксигемоглобина и метгемоглобина [31]. В то же время следует отметить, что некоторые современные пульсоксиметры способны измерять метгемоглобин и карбоксигемоглобин. Так, в исследовании Barker SJ, et al. (2006) использование пульсоксиметра Masimo Rad-57 позволяло измерять уровень карбоксигемоглобина с погрешностью в $\pm 2\%$ с разбросом от 0% до 15%, а также уровень метгемоглобина с погрешностью в 0,5% и разбросом от 0% до 12% [33].

Трикуспидальная регургитация. Еще одним ограничением метода пульсоксиметрии может быть ее использование у пациентов с выраженной трикуспидальной регургитацией. Как известно, в данном случае у пациентов возникает застой крови в большом круге кровообращения с появлением венозной пульсации (положительный венозный пульс). В этом случае наполнение артерий и вен будут происходить в одно и то же время и, следовательно, датчик пульсоксиметра в данном случае будет регистрировать в т.ч. венозную пульсацию и, соответственно, сатурацию. Как известно, венозная сатурация меньше артериальной, следовательно, у пациентов с выраженной трикуспидальной регургитацией можно ожидать неоправданное низкое значение показателя сатурации [34]. Для преодоления данного ограничения у таких пациентов рекомендуется использовать инвазивные методы оценки сатурации.

Характеристика основных факторов, которые могут влиять на измерение сатурации при проведении пульсоксиметрии, представлена в таблице 4.

Принимая во внимание ограничения применения "классической" пальцевой пульсоксиметрии, необходим поиск новых возможных вариантов для определения сатурации и разработка соответствующих девайсов для их реализации. Особенно актуальной эта проблема представляется в свете необходимости импортозамещения и достижения технологического суверенитета, в т.ч. в сфере медицинских изделий. Важным является дополнение существующих моде-

Таблица 4

Характеристика основных факторов, которые могут влиять на измерение сатурации кислорода при проведении пульсоксиметрии

Фактор, приводящий к неправильному измерению сатурации кислорода пульсоксиметром	Причина	Примеры	Влияние на измерение сатурации	Возможности преодоления действия фактора
Уменьшение или исчезновение пульсовой волны	Периферическая гипоперфузия	Вазоконстрикция Гиповолемия Гипотермия Шок	Низкие значения или невозможность измерения	Использование ушного датчика или датчика с креплением на лоб
Наличие в крови других форм гемоглобина, имеющих аномальный спектр поглощения	Качественные изменения гемоглобина	Высокая концентрация карбоксигемоглобина, метгемоглобина, сульфгемоглобина, гемоглобина-S	Ложно-нормальные или ложно-высокие значения при отравлениях угарным газом. Возможны ложно-низкие или ложно-высокие значения при метгемоглобинемии, сульфгемоглобинемии. Возможны ложно-низкие значения сатурации при серповидно-клеточной анемии, особенно при кризах	Использование инвазивных способов измерения сатурации, в т.ч. современных СО-оксиметров
Высокий уровень кислорода для обеспечения его транспорта	Количественные изменения гемоглобина и эритроцитов	Анемия	Ложно-высокие значения	Использование инвазивных способов измерения сатурации
Затруднение прохождения светового потока	Лак для ногтей, деформация ногтей	Черный, коричневый лак для ногтей, накладные ногти, деформация ногтей при симптоме барабанных палочек и часовых стекол	Ложно-низкие значения при использовании пальцевых датчиков (особенно устаревших датчиков)	Использование ушного датчика или датчика с креплением на лоб
Регистрация венозных пульсаций пульсоксиметром	Низкая сатурация венозной крови	Трикуспидальная регургитация, артериовенозные шунты Сепсис	Ложно-низкие или ложно-высокие значения	Использование инвазивных способов измерения сатурации
Попадание дополнительного света на фотодетектор или увеличение количества света, проходящего сквозь ткани	Яркий свет, направленный на прибор	Измерения при ярком свете	Ложно-высокие или ложно-низкие значения	Ограничение попадания света на пульсоксиметр/ пациента
Механические колебания датчика	Движение и дрожь пациента	Физическая нагрузка Паркинсонизм	Ложно-низкие значения	Измерение сатурации в состоянии покоя, использование датчика с креплением на лоб
Затруднение восприятия светового сигнала	Нарушения ритма сердца	Фибрилляция, трепетание предсердий, частая экстрасистолия и т.д.	Ложно-низкие значения	Использование инвазивных способов измерения сатурации
Несимметричное расположение частей датчика (датчиков) друг относительно друга	Неправильное расположение трансмиссионного датчика	Ошибки при расположении датчика, механическая неисправность датчика	Ложно-низкие значения	Использование рефракционных датчиков, изменения положения трансмиссионного датчика

лей пульсоксиметров дополнительными функциями, например, определением частоты дыхания для всесторонней оценки дыхательной недостаточности и определения ее возможных причин. В плане перспективы разработки темы стоит отметить необходимость выполнения поисковых прикладных исследований по определению новых и оптимальных методик пульсоксиметрии с учетом накопленного опыта по использованию в клинической практике имею-

щихся способов определения сатурации, их преимуществ и недостатков.

Заключение

Современные методы определения сатурации с помощью пульсоксиметрии в целом хорошо соотносятся с инвазивными методами оценки данного показателя, что позволяет ее широко использовать в реальной клинической практике. В то же время для

повышения точности измерения сатурации необходимо учитывать имеющиеся ограничения различных методик пульсоксиметрии. Появление и внедрение в клиническую практику методики рефракционной пульсоксиметрии позволяет в значительной мере компенсировать ограничения традиционной трансмиссионной пульсоксиметрии, касающиеся периферической гипоперфузии, невысокого времени отклика, ограничений, связанных с особенностью ногтей пациента. В случае возникновения особых ситуаций, при которых измерение сатурации с по-

мощью пульсоксиметрии может оказаться недостаточно точным (отравление угарным газом, метгемоглобинемия, выраженная анемия, выраженная трикуспидальная недостаточность и т.д.), рекомендуется тщательная клиническая оценка пациента, а также контроль данных пульсоксиметрии с помощью инвазивных методик.

Отношения и деятельность: все авторы заявляют об отсутствии потенциального конфликта интересов, требующего раскрытия в данной статье.

Литература/References

1. Bajmakanova GE. Interpretation of arterial blood gas indicators. *Pulmonology and allergology*. 2013;2:42-5. (In Russ.) Баймаканова Г. Е. Интерпретация показателей газов артериальной крови. *Пульмонология и аллергология*. 2013;2:42-5.
2. Egorova MO. Gas-electrolyte composition of blood and informative parameters of its evaluation. *Directory of the head of the CDL*. 2017;9: 41-54. (In Russ.) Егорова М. О. Газово-электролитный состав крови и информативность параметров его оценки. *Справочник заведующего КДЛ*. 2017;9:41-54.
3. Perkins GD, McAuley DF, Giles S, et al. Do changes in pulse oximeter oxygen saturation predict equivalent changes in arterial oxygen saturation? *Crit Care*. 2003;7(4):R67. doi:10.1186/cc2339.
4. Polidanov MA. Pulse oximetry: the essence of technology and modern technical means. *Modern Science*. 2019;12(4):137-40. (In Russ.) Полиданов М. А. Пульсоксиметрия: сущность технологии и современные технические средства. *Modern Science*. 2019;12(4):137-40.
5. Sigal ZM, Bryndin VV, Meshchanov SYu, et al. Possibilities of pulse oximetry application in clinical practice (literature review). *Health, demography, ecology of the Finno-Ugric peoples*. 2017;(4):81-5. (In Russ.) Сигал З. М., Брындин В. В., Мещанов С. Ю. и др. Возможности применения пульсоксиметрии в клинической практике (обзор литературы). *Здоровье, демография, экология финно-угорских народов*. 2017;(4):81-5.
6. Buzunov RV, Ivanova IL, Kononov YuN, et al. Computer pulse oximetry in the diagnosis of respiratory disorders in sleep: textbook. *Izhevsk*, 2013. p. 40. (In Russ.) Бузунов Р. В., Иванова И. Л., Кононов Ю. Н. и др. Компьютерная пульсоксиметрия в диагностике нарушений дыхания во сне: учебное пособие. *Ижевск*, 2013: 40 с.
7. Kakov SV, Muler VP. Pulse oximetry. *VNMT*. 2006;1:171. (In Russ.) Каков С. В., Мулер В. П. Пульсоксиметрия. *ВНМТ*. 2006;1:171.
8. Zinnatullina AR, Hamitov RF. Chronic obstructive pulmonary disease: the significance of risk factors for frequent exacerbations that require hospitalization. *Pulmonology*. 2021;31(4):446-55. (In Russ.) Зиннатуллина А. Р., Хамитов Р. Ф. Хроническая обструктивная болезнь легких: значимость факторов риска частых обострений, при которых требуется госпитализация. *Пульмонология*. 2021;31(4):446-55. doi:10.18093/0869-0189-2021-31-4-446-455.
9. Gajnitdinova VV, Avdeev SN, Pozdnyakova AA, et al. Bronchial asthma and COVID-19 in elderly patients: features of the course, survival, predictors of mortality. *Pulmonology*. 2022;32(2):151-61. (In Russ.) Гайнитдинова В. В., Авдеев С. Н., Позднякова А. А. и др. Бронхиальная астма и COVID-19 у пожилых пациентов: особенности течения, выживаемость, предикторы летальности. *Пульмонология*. 2022;32(2):151-61. doi:10.18093/0869-0189-2022-32-2-151-161.
10. Bajsultanova RE, Rachina SA, Kotidis IM, et al. The practice of treating community-acquired pneumonia in adult patients with type 2 diabetes mellitus in a multidisciplinary hospital. *Pulmonology*. 2022;32(4):568-75. (In Russ.) Байсултанова Р. Э., Рачина С. А., Котидис И. М. и др. Практика лечения внебольничной пневмонии у взрослых пациентов с сахарным диабетом 2-го типа в многопрофильном стационаре. *Пульмонология*. 2022;32(4):568-75. doi:10.18093/0869-0189-2022-32-4-568-575.
11. Plana MN, Zamora J, Suresh G, et al. Pulse oximetry screening for critical congenital heart defects. *Cochrane Database Syst Rev*. 2018;3(3):CD011912. doi:10.1002/14651858.CD011912.pub2.
12. Jullien S. Newborn pulse oximetry screening for critical congenital heart defects. *BMC Pediatr*. 2021;21(Suppl 1):305. doi:10.1186/s12887-021-02520-7.
13. Sadykova DI, Sabirova DR, Kustova NV, et al. Pulse oximetric screening for early detection of critical conditions in newborns. *Modern science: actual problems of theory and practice. Series: Natural and Technical Sciences*. 2017;10:90-3. (In Russ.) Садыкова Д. И., Сабирова Д. Р., Кустова Н. В. и др. Пульсоксиметрический скрининг для раннего выявления критических состояний у новорожденных. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Серия: Естественные и технические науки*. 2017;10:90-3.
14. Karpova AL, Spivak EM, Pyhanceva AN, et al. Pulse oximetry as a method of early neonatal screening for the presence of critical heart defects in children. *Neonatology: news, opinions, training*. 2015;4(10):68-72. (In Russ.) Карпова А. Л., Спивак Е. М., Пыханцева А. Н. и др. Пульсоксиметрия как метод раннего неонатального скрининга на наличие критических пороков сердца у детей. *Неонатология: новости, мнения, обучение*. 2015;4(10):68-72.
15. Tarayan MV, Drozdova AI, Efremov ES, et al. The role of pulse oximetry in neonatal screening of critical and complex-combined congenital heart defects. *Almanac of Clinical Medicine*. 2017;45(3):186-91. (In Russ.) Тараян М. В., Дроздова А. И., Ефремов Е. С. и др. Роль пульсоксиметрии в неонатальном скрининге критических и сложно-комбинированных врожденных пороков сердца. *Альманах клинической медицины*. 2017;45(3):186-91. doi:10.18786/2072-0505-2017-45-3-186-191.
16. Wick KD, Matthay MA, Ware LB. Pulse oximetry for the diagnosis and management of acute respiratory distress syndrome. *Lancet Respir Med*. 2022;10(11):1086-98. doi:10.1016/S2213-2600(22)00058-3.
17. Rackley CR. Monitoring During Mechanical Ventilation. *Respir Care*. 2020;65(6):832-46. doi:10.4187/respcare.07812.
18. Jubran A. Pulse oximetry. *Crit Care*. 2015;19(1):272. doi:10.1186/s13054-015-0984-8.
19. Van de Louw A, Cracco C, Cerf C, et al. Accuracy of pulse oximetry in the intensive care unit. *Intensive Care Med*. 2001; 27:1606-13. doi:10.1007/s001340101064.
20. Rauniyar N, Pujari S, Shrestha P. Study of Oxygen Saturation by Pulse Oximetry and Arterial Blood Gas in ICU Patients: A Descriptive Cross-sectional Study. *JNMA J Nepal Med Assoc*. 2020;58(230):789-93. doi:10.31729/jnma.5536.
21. Chan ED, Chan MM, Chan MM. Pulse oximetry: understanding its basic principles facilitates appreciation of its limitations. *Respir Med*. 2013;107(6):789-99. doi:10.1016/j.rmed.2013.02.004.
22. Lindholm P, Blogg SL, Gennser M. Pulse oximetry to detect hypoxemia during apnea: comparison of finger and ear probes. *Aviat Space Environ Med*. 2007;78(8):770-3.
23. Budidha K, Kyriacou PA. In vivo investigation of ear canal pulse oximetry during hypothermia. *J Clin Monit Comput*. 2018;32(1):97-107. doi:10.1007/s10877-017-9975-4.
24. Choi SJ, Ahn HJ, Yang MK, et al. Comparison of desaturation and resaturation response times between transmission and reflectance pulse oximeters. *Acta Anaesthesiol Scand*. 2010;54(2):212-7. doi:10.1111/j.1399-6576.2009.02101.x.
25. Fernandez M, Burns K, Calhoun B, et al. Evaluation of a new pulse oximeter sensor. *Am J Crit Care*. 2007;16:146-52.
26. Schallom L, Sona C, McSweeney M, et al. Comparison of forehead and digit oximetry in surgical/trauma patients at risk for decreased peripheral perfusion. *Heart Lung*. 2007;36:188-94. doi:10.1016/j.hrtlng.2006.07.007.
27. Pal SK, Kyriacou PA, Kumaran S, et al. Evaluation of oesophageal reflectance pulse oximetry in major burns patients. *Burns*. 2005;31(3):337-41. doi:10.1016/j.burns.2004.10.025.
28. Kyriacou PA. Direct pulse oximetry within the esophagus, on the surface of abdominal viscera, and on free flaps. *Anesth Analg*. 2013;117(4):824-33. doi:10.1213/ANE.0b013e3182a1bef6.
29. Kyriacou PA, Hickey M, Phillips JP. Pulse oximetry of body cavities and organs. *Annu Int Conf IEEE Eng Med Biol Soc*. 2013;2013:2664-7. doi:10.1109/EMBC.2013.6610088.
30. Osborn ZT, Villalba N, Derickson PR, et al. Accuracy of Point-of-Care Testing for Anemia in the Emergency Department. *Respir Care*. 2019;64(11):1343-50. doi:10.4187/respcare.06364.
31. Verhovsek M, Henderson MP, Cox G, et al. Unexpectedly low pulse oximetry measurements associated with variant hemoglobins: a systematic review. *Am J Hematol*. 2010;85(11):882-5. doi:10.1002/ajh.21810.
32. Fitzgerald RK, Johnson A. Pulse oximetry in sickle cell anemia. *Crit Care Med*. 2001;29(9):1803-6. doi:10.1097/00003246-200109000-00025.
33. Barker SJ, Curry J, Redford D, et al. Measurement of carboxyhemoglobin and methemoglobin by pulse oximetry: a human volunteer study. *Anesthesiology*. 2006;105(5):892-7. doi:10.1097/0000542-200611000-00008. Erratum in: *Anesthesiology*. 2007;107(5):863.
34. Hart GK, Warrillow S. Misleading pulse-oximetry in a patient with tricuspid valve incompetence. *Anaesth Intensive Care*. 2006;34(2):282-3.