

МИНИСТЕРСТВО ЗДРАВООХРАНЕНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
«РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКИЙ ЦЕНТР
РАДИАЦИОННОЙ МЕДИЦИНЫ И ЭКОЛОГИИ ЧЕЛОВЕКА»

С.А. ХАДАНОВИЧ, Д.А. БОРОВИК, Д.В. КРАВЧЕНКО

ПУЛЬСОКСИМЕТРИЯ:
особенности метода и рекомендации по использованию

Практическое пособие для врачей



Гомель, 2023

Рецензенты:

Проректор по лечебной работе УО «Гомельский государственный медицинский университет», к.м.н., доцент В.В. Похожай

Заведующий отделением анестезиологии, реанимации и интенсивной терапии УЗ «Гомельский областной клинический кардиологический центр», к.м.н. Д.В.Осипенко

Заведующий отделением анестезиологии, реанимации и интенсивной терапии ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ» С.Н. Коваль

Рекомендовано к изданию решением учёного совета

ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ» от 20.12.2023г. протокол № 11

С.А. Хаданович. Пульсоксиметрия: особенности метода и рекомендации по использованию / С.А. Хаданович, Д.А. Боровик, Д.В. Кравченко – Гомель: ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ», 2023. – 19 с.

В пособии изложены особенности физиологии транспорта кислорода в организме человека, основные принципы пульсоксиметрии, виды пульсоксиметров. Указаны возможные причины ошибочных измерений сатурации крови кислородом, приведен алгоритм действий при ее снижении. Пособие предназначено для врачей-интернов, клинических ординаторов, врачей всех медицинских специальностей.

© Составители: Хаданович С.А.,
Боровик Д.А., Кравченко Д.В., 2023
© ГУ «РНПЦ РМ и ЭЧ», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА.....	6-7
САТУРАЦИЯ. ПРИЧИНЫ УМЕНЬШЕНИЯ И СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ.....	7-10
ПУЛЬСОКСИМЕТРИЯ. УСТРОЙСТВО И ТИПЫ ПУЛЬСОКСИМЕТРОВ. ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ.....	10-17
КИСЛОРОДНАЯ ДЕСАТУРАЦИЯ. АЛГОРИТМ ДЕЙСТВИЙ.....	17-18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	19

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ИВЛ – искусственная вентиляция легких.

ОЦК – объем циркулирующей крови.

SpO₂ – сатурация, степень насыщения крови кислородом.

ЧСС – частота сердечных сокращений.

ВВЕДЕНИЕ

Кислород – химический элемент, жизненно необходимый для функционирования всех структурных единиц организма человека. Доставка необходимого количества кислорода к тканям и органам осуществляется дыхательной системой. Она же отвечает за эффективный газообмен, в результате которого параллельно с поступлением кислорода из организма удаляется углекислый газ.

Органы и системы органов человека чувствительны к дефициту кислорода, особенно головной мозг и сердце. Возникающая вследствие разных причин гипоксия приводит к быстрому и необратимому угнетению их функций. Исходя из этого, важнейшими задачами современной медицинской практики являются профилактика, своевременное выявление, а также незамедлительное устранение гипоксии и вызвавших ее причин.

Технические возможности современной медицины позволяют проводить своевременный и информативный мониторинг газового состава крови, предупредить и выявить формирующуюся гипоксию, что, в свою очередь, дает возможность незамедлительно оказать соответствующую медицинскую помощь. Совокупность мероприятий, направленных на мониторинг содержания оксигенированного гемоглобина, называется пульсоксиметрией. Приборы, регистрирующие данный показатель в режиме реального времени, называются пульсоксиметрами [1,2].

В настоящее время с учетом возможных осложнений анестезиологического пособия пульсоксиметрия входит в перечень обязательных компонентов мониторинга витальных функций пациента во время проведения оперативных вмешательств любой сложности. Кроме этого, пульсоксиметрами должны быть оснащены все койки отделений реанимации и интенсивной терапии [2].

1. МЕХАНИЗМ ТРАНСПОРТА КИСЛОРОДА В ОРГАНИЗМЕ ЧЕЛОВЕКА

Для правильного понимания принципа работы пульсоксиметров необходимо знание физиологии транспорта кислорода, механизмов его доставки к тканям и органам.

Попасть извне напрямую в целевые ткани и органы человека кислород не может. Для их эффективной оксигенации необходимо соблюдение следующих обязательных условий:

- Кислород через дыхательные пути (или дыхательный контур при проведении ИВЛ) должен попасть в легкие;

- Кислород должен попасть в кровь посредством эффективного газообмена в альвеолах;

- Кислород с током крови должен достичь целевых тканей и органов. Функцию переносчика молекул кислорода выполняет гемоглобин эритроцитов;

- Отсутствие нарушений сердечной деятельности для перекачивания требуемого количества крови;

- Нормальный уровень ОЦК, позволяющий равномерно распределить оксигенированную кровь по всем тканям и органам.

В норме гемоглобин обладает высокой связывающей способностью с кислородом. Одна его молекула способна связать 4 молекулы кислорода, после чего такой гемоглобин считается «насыщенным» кислородом (оксигемоглобин). Таким образом, 1 г гемоглобина способен связать 1,34 мл кислорода. Учитывая, что сердце за 1 мин перекачивает около 5000 мл крови, ткани и органы за этот промежуток времени получают около 1 л кислорода. $\frac{1}{4}$ этого объема идет на клеточный метаболизм, остальные $\frac{3}{4}$ - на функционирование тканей и органов. Прекращение газообмена в легких с учетом скорости потребления кислорода 250 мл/мин означает, что объема

связанного с гемоглобином кислорода хватит на 3 минуты, после чего формируется и быстро нарастает гипоксия тканей и органов [1,2,3].

2. САТУРАЦИЯ. ПРИЧИНЫ УМЕНЬШЕНИЯ И СПОСОБЫ КОРРЕКЦИИ

Для характеристики степени насыщения гемоглобина кислородом (в процентах) используется термин «сатурация». При регистрации ее процентного значения, в медицинской документации используется обозначение «SpO₂». SpO₂ = 100% означает, что все участки связывания в молекулах гемоглобина заняты кислородом. Эта величина напрямую зависит от ряда внешних факторов, включая перепады высот относительно уровня моря. Сатурация 95-100% при дыхании на уровне моря считается нормальной и не требует коррекции. При этом важно понимать, что речь идет о степени насыщения кислородом артериальной крови. Венозная кровь насыщена кислородом в меньшей степени и богата углекислым газом. В норме сатурация венозной крови составляет 75%. По этим причинам артериальную и венозную кровь можно отличить даже невооруженным глазом: кровь из артерий и артериол имеет алый цвет, из вен – темно-красный.

Уменьшение сатурации артериальной крови, регистрируемое в ходе проведения пульсоксиметрии, может произойти по самым разнообразным причинам, которые ни при каких условиях не должны оставаться без внимания. Их можно условно разделить на следующие группы:

- Связанные с нахождением в неблагоприятных для эффективного газообмена природных условиях. Разреженный воздух высокогорья, а также бедный кислородом воздух подземных сооружений обуславливают развитие гипоксии даже при адекватном функционировании дыхательной системы. В таких условиях для сохранения достаточной оксигенации могут потребоваться дополнительные источники кислорода в виде дыхательных контуров с его запасами;

- Связанные с наличием острой или хронической дыхательной недостаточностью различной степени тяжести. Острая дыхательная недостаточность приводит к быстрому истощению кислородных резервов крови, падению сатурации и угнетению функций всех органов и систем органов человека. Данная ситуация требует неотложной медицинской помощи. Хроническая дыхательная недостаточность, как один из симптомов ряда хронических заболеваний органов дыхания, требует назначение адекватного лечения с целью минимизации хронической гипоксии и ее основных проявлений;

- Связанные с заболеваниями сердечно-сосудистой системы, приводящими к нарушению кровообращения. В этих случаях к органам и тканям поступают меньшие объемы оксигенированной крови, что приводит к развитию в них хронической гипоксии;

- Связанные с заболеваниями и состояниями, приводящими к дефициту гемоглобина. У пациентов с острой или хронической анемией концентрация гемоглобина в крови существенно ниже нормальной ее величины. При этом доставка достаточного количества кислорода к тканям и органам становится невозможной. Критически низкой считается концентрация гемоглобина 60 г/л. В таком случае объем поступления кислорода в целевые органы и ткани существенно ниже их метаболических потребностей. Таким образом, пациентам с массивной интраоперационной кровопотерей и развитием тяжелой анемии необходимо давать 100% кислород и параллельно в кратчайшие сроки возмещать возникшую кровопотерю. Гемотрансфузия также может быть показана пациентам с хронической анемией тяжелой степени (концентрация гемоглобина в крови 70 г/л и менее). При этом следует помнить, что у таких пациентов значение сатурации кислородом артериальной крови может оставаться нормальным при очень низких значениях концентрации гемоглобина. Исключением являются патологические состояния, приводящие к дефициту гемоглобина, способного связывать кислород. Опасным для жизни является отравление угарным газом.

Данное химическое соединение имеет большее сродство к гемоглобину, чем кислород, и активнее с ним связывается, в результате чего образуется карбоксигемоглобин, не способный транспортировать кислород к органам и тканям. При этом показания сатурации, полученные от пульсоксиметра, завышены, что требует внимательной клинической оценки состояния пациента;

- Связанные с неправильной эксплуатацией пульсоксиметра или его поломкой [3,4].

Важно понимать, что уровень сатурации 94% уже свидетельствует о наличии у пациента гипоксии, что, в свою очередь, требует немедленного устранения вызвавшей ее причины. В ряде случаев увеличение концентрации кислорода во вдыхаемой газовой смеси позволяет быстро и эффективно улучшить сатурацию артериальной крови, увеличить ее кислородные резервы. В связи с этим, преоксигенация пациента на операционном столе непосредственно перед индукцией в анестезию в настоящее время является обязательной. Вдыхание 100% кислорода в течение нескольких минут существенно увеличивает его депо как в легких, так и в крови, что дает анестезиологу возможность выполнить интубацию трахеи и начать искусственную вентиляцию легких до истощения кислородных резервов пациента. При этом всегда необходимо учитывать особенности физиологии дыхания у пациентов различных групп. Так, у беременных женщин увеличенная матка снижает объем легких, уменьшая кислородный резерв. При этом потребность в кислороде увеличивается за счет метаболических потребностей плода. У детей на фоне высоких энергетических затрат и малого дыхательного объема резерв кислорода мал и быстро истощается даже при условии выполненной адекватной преоксигенации [4].

Падение уровня сатурации ниже 90% считается опасным для жизни состоянием и требует незамедлительного медицинского вмешательства. Доказывает это кривая диссоциации оксигемоглобина (рис. 1), свидетельствующая о том, что после падения сатурации ниже 90%

происходит стремительное уменьшение парциального давления кислорода в артериальной крови – доставка его к тканям и органам блокируется, вызывая развитие тяжелой гипоксии [1,5].

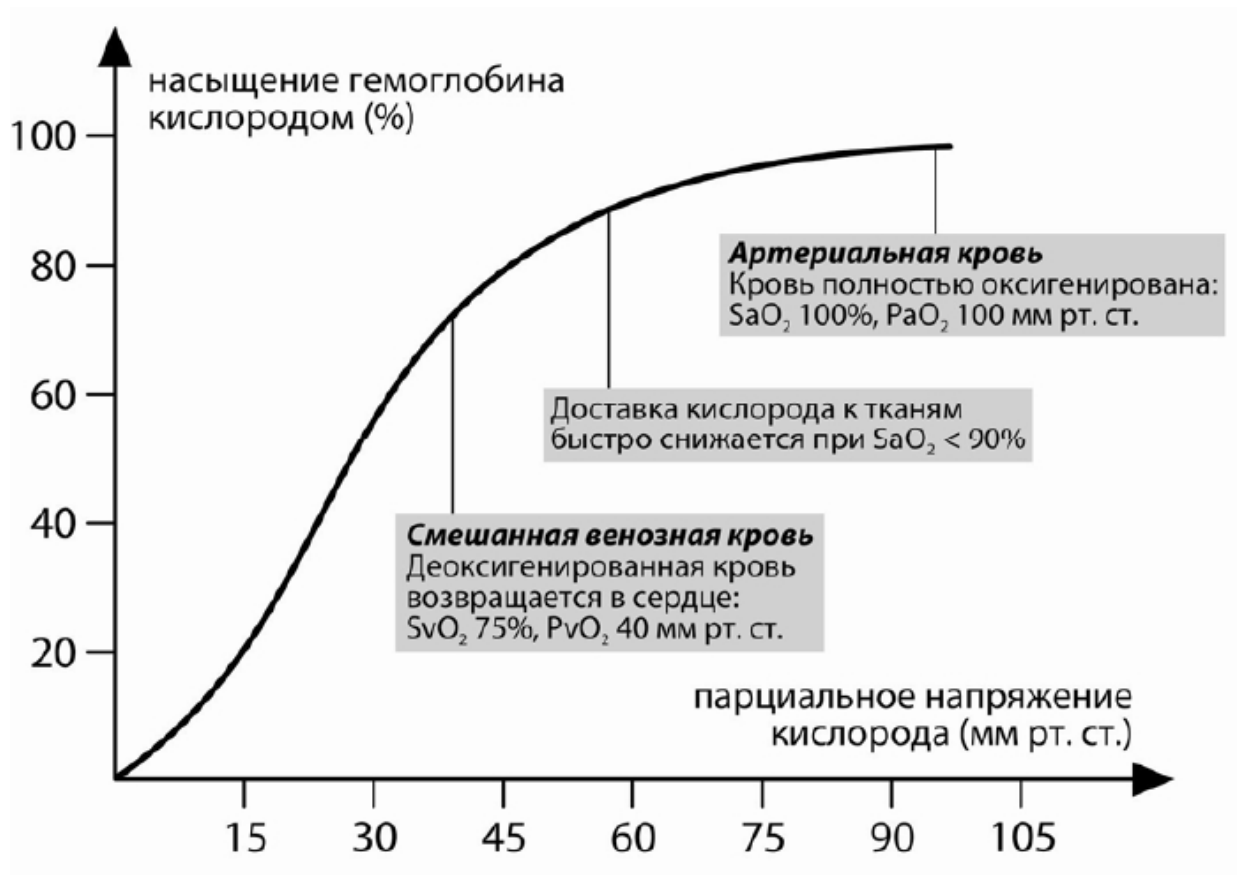


Рис.1 Кривая диссоциации оксигемоглобина

3. ПУЛЬСОКСИМЕТРИЯ. УСТРОЙСТВО И ТИПЫ ПУЛЬСОКСИМЕТРОВ. ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ.

Пульсоксиметрия как один из методов диагностики в клинической медицине берет свое начало с 1940 г., когда американский физиолог Гленн Аллан Миллекен создал первый в мире портативный пульсоксиметр – прибор для регистрации степени насыщения крови кислородом. Осознание всей важности данного изобретения пришло во второй половине 80-х гг., когда

оснащение пульсоксиметрами операционных стало обязательным в США, а затем данному примеру последовали и другие страны [6].

Современный пульсоксиметр – прибор, использующийся для регистрации в режиме реального времени двух важнейших в практической медицине параметров:

- сатурации кислородом артериальной крови;
- частоты пульса.

Пульсоксиметр состоит из нескольких компонентов:

- Датчик (периферическая часть пульсоксиметра). Состоит из двух частей: светоизлучающих диодов и фотодетектора. Свет диодов достигает фотодетектора, проходя через ткани. Определенная порция света, излучаемая диодами датчика, поглощается тканями. Степень поглощения напрямую зависит от того, насколько насыщен кислородом гемоглобин крови. Не поглощенный свет улавливается фотодетектором. В настоящее время датчики пульсоксиметров имеют различные физические размеры и форму для регистрации сатурации и частоты пульса как у взрослых, так и у детей с возможностью размещения на пальцах конечностей (рис. 2, 3) (форма прищепки или резиновые) или на мочке уха (резиновые);



Рис. 2 Датчик пульсоксиметра для мониторинга кислородной сатурации у взрослых

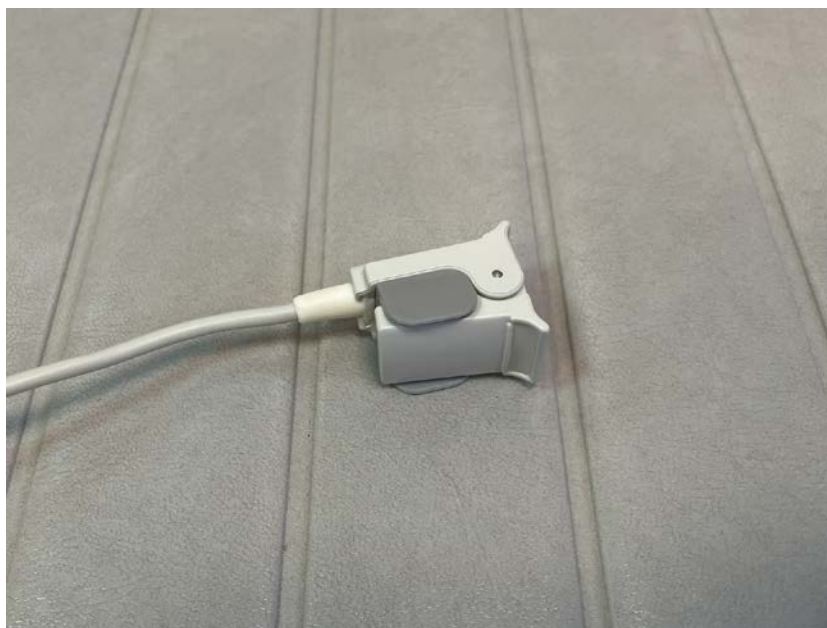


Рис. 3 Датчик пульсоксиметра для мониторинга кислородной сатурации у детей

- Микропроцессор. В него поступает информация от фотодетектора, которая обрабатывается и преобразуется в процентное значение сатурации кислородом артериальной крови и частоту пульса непосредственно в момент измерения;

- Монитор. На нем отображаются значения сатурации и частоты пульса, полученные микропроцессором от датчика. Кроме того, современные пульсоксиметры имеют звуковую индикацию. Ритмичные сигналы подаются в такт частоте пульса, имеют различный тембр, понижающийся по мере изменения сатурации от нормальной к низкой. Также возможно устанавливать границы тревог, когда прибор начнет сигнализировать о слишком низких показаниях сатурации, а также о выраженных брадикардии и тахикардии. Эксплуатация пульсоксиметров в условиях стационара без звукового сигнала запрещена [4,5].

Первый вариант пульсоксиметра с размещением датчика на пальце руки или ноги был разработан еще в 1977 г. компанией Konica-Minolta. Устройство современных пульсоксиметров базируется на его принципе – основная задача разработчиков в настоящее время сведена к производству

максимально портативных пульсоксиметров в целях удобства эксплуатации. Также следует заметить, что востребованность портативных пульсоксиметров резко возросла во время пандемии COVID-19 – данные приборы зарекомендовали себя как надежный метод ранней диагностики формирующейся пневмонии при коронавирусной инфекции [6].

Современные пульсоксиметры могут представлять собой как компактные, работающие автономно на элементах питания приборы (рис. 4), так и отдельные модули в системах комплексного мониторинга витальных функций пациентов, использующихся в операционных, а также в палатах отделений реанимации и интенсивной терапии (рис. 5).



Рис. 4 Портативный пульсоксиметр, работающий от элементов питания



Рис. 5 Система комплексного мониторинга CONTEC CMS9000 с модулем для проведения пульсоксиметрии

Для получения корректных показаний пульсоксиметра важно соблюдать ряд правил его эксплуатации, последовательно выполняя следующие действия:

- Включить пульсоксиметр, дождаться, пока прибор пройдет самотестирование;
- Выбрать подходящий в данной ситуации датчик и место его размещения. Устанавливать его следует на руке, свободной от манжеты артериального давления. Ее раздутие прерывает показания пульсоксиметра;
- Разместить датчик, дождаться появления четко выраженного пульсового сигнала;
- При любых сомнениях в корректности показаний пульсоксиметра его работу можно проверить, надев датчик на свой палец [4].

ВАЖНО! Всегда необходимо проводить клиническую оценку состояния пациента, невзирая на показания аппаратуры.

Корректность показаний пульсоксиметра напрямую зависит от того, где и насколько правильно размещен его датчик. Важно установить его там, где пульс будет легко определяться, убедившись при этом, что датчик излучает красный свет.

Существует ряд факторов, искажающих показания датчика пульсоксиметра:

- Датчик закреплен слишком слабо – слабая пульсовая волна на мониторе или ее отсутствие; заниженные показания сатурации на мониторе или их отсутствие;

- Датчик закреплен слишком плотно – пережатие тканей, ослабление в них кровотока: нет показаний частоты пульса и сатурации;

- Конечности слишком холодные – нарушена перфузия тканей за счет гипотермии или периферической вазоконстрикции по причине гиповолемии;

- Двигательная активность, дрожь, психомоторное возбуждение пациента – все это обуславливает нестабильное положение датчика и искажение его показаний;

- Деформированные ногтевые пластины – создают препятствие для прохождения света датчика через ткани: значения пульса и сатурации недостоверны;

- Лак для ногтей - создает препятствие для прохождения света датчика через ткани: значения частоты пульса и сатурации недостоверны;

- Загрязнение линз и фотодетектора датчика – слабая пульсовая волна на мониторе или ее отсутствие; заниженные показания сатурации на мониторе или их отсутствие.

Важно учитывать, что, давая информацию в режиме реального времени, пульсоксиметр является системой раннего оповещения и способен выявить развивающуюся гипоксию до наступления ее характерных клинических признаков. При этом, сигналы тревог, подаваемые

пульсоксиметром, всегда должны быть интерпретированы клинически. По умолчанию тревога подается при падении сатурации до 90% и ниже. Смещение или отсоединение датчика от пациента сопровождается отсутствием пульсовой волны и показаний сатурации. ЧСС в норме у детей выше, чем у взрослых, что также следует учитывать. Диапазоны нормальных показателей ЧСС и кислородной сатурации для пациентов разных возрастных групп приведены в таблице [5].

Таблица. Диапазоны нормальных показателей ЧСС и кислородной сатурации для пациентов разных возрастных групп

Возраст	Диапазон нормы частоты сердечных сокращений, уд/мин	Нормы уровня сатурации кислорода SpO₂, %
Дети до 2 лет	100-180	95 и выше для пациентов всех возрастных групп
2-10 лет	60-140	
10 лет - взрослые	50-100	

4. КИСЛОРОДНАЯ ДЕСАТУРАЦИЯ. АЛГОРИТМ ДЕЙСТВИЙ.

Базовые настройки тревог пульсоксиметра установлены на подачу сигнала при падении уровня сатурации кислорода до 90% и ниже. Но следует помнить, что величина $SpO_2 \leq 94\%$ уже требует медицинской помощи, направленной на устранение возможных причин падения сатурации. Состояние, при котором в режиме реального времени у пациента происходит быстрое снижение сатурации кислорода от нормальных величин до $\leq 90\%$ называется кислородная десатурация.

При $SpO_2 \leq 94\%$, зафиксированной пульсоксиметром, необходимо увеличить процентное содержание кислорода во вдыхаемой пациентом

газовой смеси. Алгоритм дальнейших действий базируется на принципе «ABCDE»:

- «А» (AIRWAY) - проходимость дыхательных путей;
- «В» (BREATHING) - наличие/отсутствие самостоятельного дыхания;
- «С» (CIRCULATION) - оценка состояния кровообращения;
- «D» (DRUG EFFECTS) - влияние лекарственных средств на функционирование дыхательной системы пациента;
- «Е» (EQUIPMENT) - корректность работы анализирующей аппаратуры.

Подробный алгоритм действий при кислородной сатурации $\leq 94\%$ представлен на рис. 6 [6].

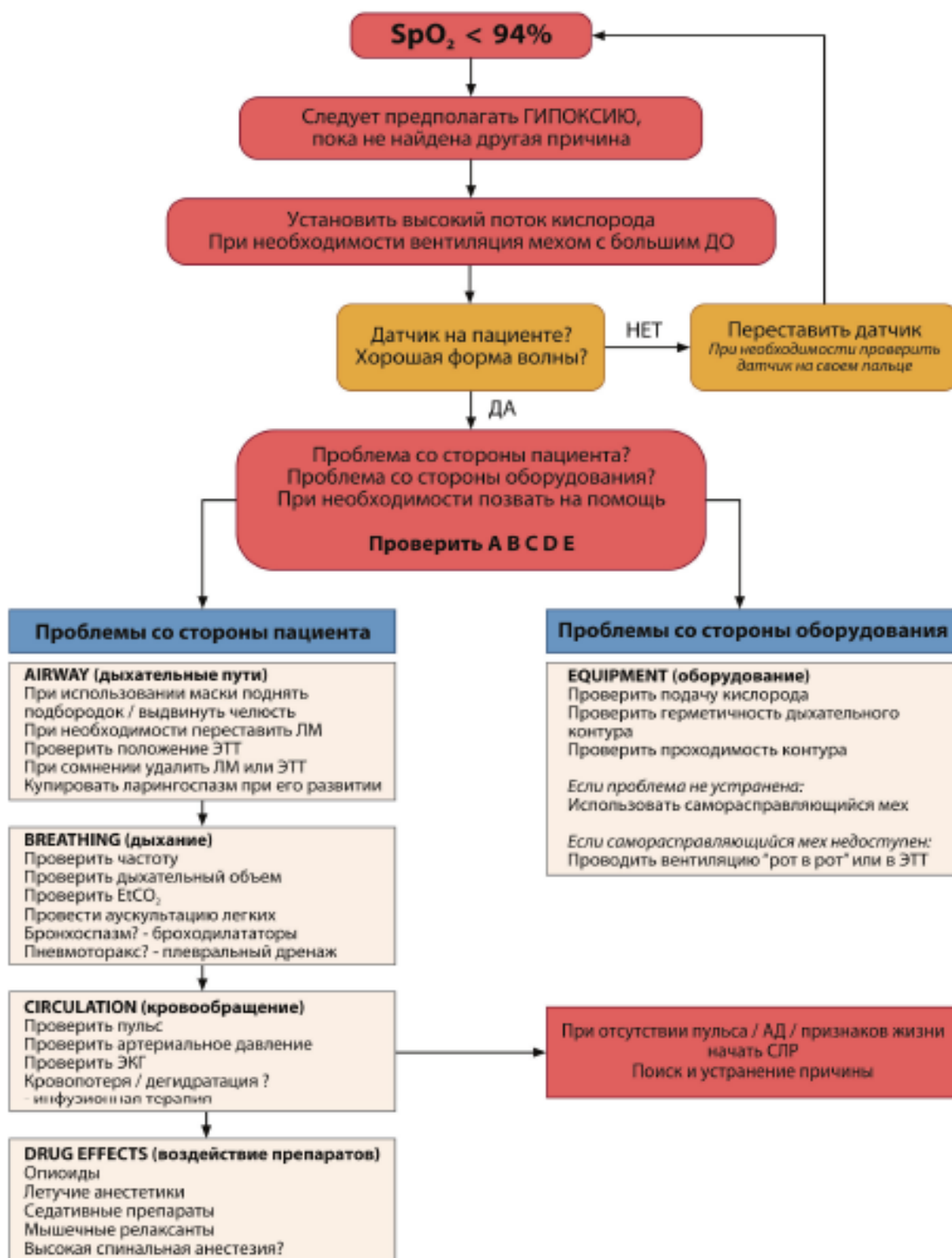


Рис. 6 Алгоритм действий при снижении кислородной сатурации $\leq 94\%$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Berry W., Barreiro G., Dziekan G. et al. *Pulsoximetry Training Manual*. Worldwide Health Organisation. 2009; 7-19.
2. Пульсоксиметрия / Климов А.В., Гумерова Н.А. // *Аллея науки*. 2021. Т. 2, №12 (63). 125-128.
3. Клиническое значение пульсоксиметрии у взрослых / Гришин О.В., Гришин В.Г. // *Медицинский алфавит*. 2020. №25. С. 13-21.
4. Пульсоксиметрия: сущность технологии и основные технические средства / Полиданов Д.А., Блохин И.С. // *Modern Science*. 2019. №12-4. С. 137-140.
5. Определение газового состава крови в диагностике хронических заболеваний органов дыхания / Лаврентьева Н.Е., Азовскова Т.А. // *Справочник врача общей практики*. 2012. №9. С. 16-20.
6. Dima M.T., Romania D.S. *Pulsoximetry Electronics Analysis*. *Social Studies and Social Psychology*. 2022. №8 (38). С. 470-472.