

УДК 613.6:551.58

<http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-75-83>

© Зверев Д.П., Бычков С.А., Мясников А.А., Ярков А.М., Хаустов А.Б., И.Р. Кленков, Фокин С.Г., 2021 г.

ВОЗМОЖНОСТИ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ СПОСОБОВ В ДИАГНОСТИКЕ ДЕКОМПРЕССИОННОЙ БОЛЕЗНИ

¹Д. П. Зверев, ²С. А. Бычков*, ¹А. А. Мясников, ²А. М. Ярков, ²А. Б. Хаустов, ¹И. Р. Кленков,
²С. Г. Фокин

¹Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова, Санкт-Петербург, Россия

²Центр подводных исследований Русского географического общества, Санкт-Петербург, Россия

Цель работы: провести сравнительный анализ способов ультразвукового исследования правых отделов сердца со звуковой и визуальной индикацией внутрисосудистого декомпрессионного газообразования у водолазов после спуска под воду.

Материалы и методы. Проведено обследование правых отделов сердца у 13 водолазов после 152 спусков. Внутрисосудистое декомпрессионное газообразование оценивалось с помощью ультразвукового исследования с использованием звуковой локации на основе эффекта Доплера и трансторакальной двухмерной эхокардиографии.

Результаты и их обсуждение. Оба способа позволяют определять внутрисосудистое декомпрессионное газообразование после водолазного спуска, коррелируют с клинической картиной острой декомпрессионной болезни и должны использоваться в медицинском обеспечении водолазных спусков. При этом способ ультразвукового исследования на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии оказался более чувствителен в определении газовых пузырьков в правых отделах сердца по сравнению со звуковой локацией с эффектом Доплера.

Ключевые слова: морская медицина, водолазная медицина, внутрисосудистое декомпрессионное газообразование, профилактика декомпрессионной болезни, ультразвуковые способы диагностики.

*Контакт: Бычков Сергей Анатольевич, s.bychkov@urc-rgs.ru

© Zverev D.P., Bychkov S.A., Myasnikov A.A., Yarkov A.M., Khaustov A.B., Klinkov I.R., Fokin S.G., 2021

POSSIBILITIES OF ULTRASOUND METHODS IN THE DIAGNOSIS OF DECOMPRESSION SICKNESS

¹Dmitriy P. Zverev, ²Sergey A. Bychkov*, ¹Aleksey A Myasnikov, ²Andrey M. Yarkov,
²Anton B. Khaustov, ¹Ilyas R. Klenkov, ²Sergey G. Fokin

¹S. M. Kirov Military Medical Academy, St. Petersburg, Russia

²The Underwater research center of the Russian geographical society, St. Petersburg, Russia.

Aim of the work: to conduct a comparative analysis of methods of ultrasound examination of the right heart with audio and visual indication of intravascular decompression gas formation in divers after diving.

Materials and methods. An examination of the right heart in divers after 152 man-descents was carried out. Intravascular decompression gas production was assessed by ultrasound using sound location based on the Doppler effect and transthoracic two-dimensional echocardiography.

Results and discussion. Both methods make it possible to determine intravascular decompression gas formation after a diving descent, correlate with the clinical picture of acute decompression sickness and should be used in the medical support of diving descents. At the same time, the method of ultrasound examination based on transthoracic two-dimensional echocardiography turned out to be more sensitive in determining gas bubbles in the right heart as compared to auditory location with the Doppler effect.

Key words: marine medicine, diving medicine, intravascular decompression gas production, prevention of decompression sickness, ultrasound diagnostic methods.

*Contact: Bychkov Sergey Anatolevich, s.bychkov@urc-rgs.ru

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования: Зверев Д.П., Бычков С.А., Мясников А.А., Ярков А.М., Хаустов А.Б., Кленков И.Р., Фокин С.Г. Возможности ультразвуковых способов в диагностике декомпрессионной болезни // *Морская медицина*. 2021. Т. 7, № 4. С. 75–83, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-75-83>.

Conflict of interest: the authors have declared no conflict of interest.

For citation: Zverev D.P., Bychkov S.A., Myasnikov A.A., Yarkov A.M., Khaustov A.B., Klinkov I.R., Fokin S.G. Possibilities of ultrasound methods in the diagnosis of decompression sickness // *Marine Medicine*. 2021. Vol. 7, No. 4. P. 75–83, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2021-7-4-75-83>.

Введение. Декомпрессионная болезнь (ДБ) — профессиональное заболевание широкого контингента лиц, находящихся в условиях повышенного давления газовой среды, возникающее вследствие однократного или повторяющегося воздействия неадекватной декомпрессии, сопровождающейся образованием в организме свободного газа, проявляющееся, как правило, поражением ряда систем и расстройством их функций и выявляемое либо в непосредственной связи со снижением давления (острая ДБ), либо без такой связи, в отдаленном периоде, у водолазов, кессонных рабочих, акванавтов с большим стажем работы (хроническая ДБ) [1, с. 360]. Острая ДБ по степени тяжести делится на легкую, среднюю и тяжелую. В настоящее время преимущественно встречается острая ДБ легкой степени тяжести. Она возникает в 95% от общего числа случаев заболевания [2, с. 187], а ее диагностика затруднена из-за скудных объективных клинических проявлений, вследствие чего диагноз основывается в основном на жалобах водолаза. При этом начальные симптомы острой ДБ могут проявиться через несколько часов после выхода из-под воды [3, с. 301–304], а иногда являются предвестниками заболеваний средней и тяжелой степени [4, с. 151].

В 1970-х годах появилась возможность обнаружения бессимптомного внутрисосудистого декомпрессионного газообразования (ВДГ) по изменению звукового сигнала кровотока в крупных венозных сосудах [4, с. 143]. Она была реализована с помощью аппаратов ультразвуковых исследований (УЗИ), работающих на принципах Доплера. В 1974 г. Спенсер и Йохансон предложили четырехбалльную шкалу для оценки ВДГ, которую в разных модификациях используют и в настоящее время [5, с. 56]. В нашей стране исследования закономерностей декомпрессионного газообразования в хронических опытах на животных под руководством И. А. Сапова и И. П. Юнкина позволили обосновать возможность использования оценки интенсивности ВДГ при ультразвуко-

вой локации кровотока для ранней диагностики ДБ, профессионального отбора водолазов и определения физиологических параметров декомпрессии [6, с. 71].

Сегодня аппараты ультразвуковой диагностики позволяют визуализировать газовые пузырьки (ГП) в режиме реального времени с помощью трансторакальной двухмерной эхокардиографии не только в условиях стационара [5, с. 56], но и непосредственно у места водолазных спусков [7, с. 6–7; 8, с. 7; 9, с. 69].

Цель работы: проведение сравнительного анализа способов ультразвукового исследования правых отделов сердца со слуховой и визуальной индикацией ВДГ у водолазов после спуска под воду.

Материалы и методы. В ходе медико-физиологического исследования для создания отечественного водолазного снаряжения и методик проведения автономных, в том числе и глубоководных водолазных спусков, которое выполняется Центром подводных исследований Русского географического общества совместно с кафедрой физиологии подводного плавания Военно-медицинской академии имени С. М. Кирова, проводилась сравнительная оценка использования ультразвуковой слуховой локация на основе эффекта Доплера и ультразвукового исследования на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии для обнаружения ВДГ.

Исследования проводили на Голубом озере в Республике Кабардино-Балкария на высоте 809 метров над уровнем моря. В нем приняли участие 13 водолазов в возрасте от 28 до 56 лет (средний возраст $37 \pm 2,7$ года), имеющих стаж работы по специальности от 3 до 20 лет, спусковых часов от 130 до 4000. Водолазные спуски осуществлялись в аппаратах закрытого цикла дыхания с электронным управлением (ребризерах), в которых для дыхания использовалась кислородно-азотно-гелиевая смесь (10% кислорода, 40% азота, 50% гелия). Ультразвуковые исследования проведены после 152 водолазных спусков на глубины до 104 метров.

УЗИ проводились как до спуска (поиск оптимальной точки прослушивания), так и в течение 2 часов после с интервалом 15–30 минут [5, с. 54; 8, с. 12–13], в покое и с легкой физической нагрузкой (упражнение «велосипед» и активные движения рук) [5, с. 56].

Способ оценки внутрисосудистого газового образования с помощью ультразвуковой слуховой локации с эффектом Доплера. Обследуемый располагался в положении лежа на спине, звуковая локация кровотока производилась во втором, третьем или четвертом межреберье (в зависимости от телосложения обследуемого) слева от грудины в проекции легочного конуса правого желудочка и общего ствола легочной артерии. Фоновый сигнал кровотока на слух характеризуется как регулярный дующий и шипящий звук. Перемещая датчик по поверхности кожи и изменяя углы наклона, добивались наиболее отчетливого и «чистого» звукового сигнала [5, с. 54–56; 10, с. 535–539]. Отдельные сигналы от ГП на слух воспринимаются как дискретные звуки в виде «писка», «чириканья», «щебетания» и «щелканья». Множественные ГП приводят к искажению сигнала кровотока, при котором на слух он становится громким, грубым, иногда напоминающим «рев» [11, с. 536–538].

При ультразвуковой локации оценка интенсивности ВДГ осуществлялась по оригинальной шкале Спенсера с помощью аппарата УЗИ с эффектом Доплера «Минидоп 4», в баллах: 0 — сигналы от газовых пузырьков отсутствуют, слышен нормальный неискаженный фоновый сигнал кровотока; 1 — имеются отдельные редкие сигналы от ГП или слабые изменения сигнала кровотока (более звучный и грубый); 2 — отчетливые сигналы от ГП слышны менее чем в половине сердечных циклов, сигнал кровотока шумный и грубый; 3 — частые сигналы от ГП слышны более чем в половине сердечных циклов, сигнал кровотока шумный и грубый; 4 — множественные очень частые сигналы от ГП слышны во всех сердечных циклах и резко искажают сигнал кровотока [8, с. 9; 9, с. 68–69; 12, с. 30].

Вероятность развития острой ДБ по результатам ВДГ с помощью УЗИ с эффектом Доплера рассчитывалась по уравнению Л. К. Волкова¹:

$$S=100/(1+10^{3,4-1,85\lambda})\%$$

где: S — относительная частота заболевания в %, λ — единая оценка интенсивности газообразования в баллах, которая рассчитывается по формуле: $\lambda=\lambda_{п}+0,33(\lambda_{д}-\lambda_{п})$, где $\lambda_{п}$ — интенсивность газообразования в покое, $\lambda_{д}$ — интенсивность газообразования после движений.

Способ оценки внутрисосудистого декомпрессионного газообразования с помощью ультразвукового исследования на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии. Визуализация правых отделов сердца осуществлялась в положении обследуемого лежа на левом боку, левая рука под головой, правая вдоль тела. Датчик располагался на уровне пятого левого межреберья между левой передней грудной и левой среднегрудной линией в направлении к груди. При перемещении датчика по поверхности кожи и изменении углов наклона на экране визуализируются стенки и полости правых отделов сердца и работа трикуспидального клапана. Четкое и стабильное изображение на экране является сигналом для осуществления видеозаписи 15 сердечных циклов на жесткий диск аппарата [7, с. 6]. Во время видеозаписи изображения врач осуществлял предварительную оценку интенсивности ВДГ.

Исследования проводились с помощью аппарата УЗИ SonoSite Edge 1 2D с фазированным датчиком для внутренних органов P21x/5–1.

Оценка результатов проводилась по расширенной шкале Эфтедаля–Брубакка [8, с. 11] в баллах: 0 — нет газовых пузырьков в поле зрения; I — редкие ГП; II — один ГП на каждом 4 сердечных цикла; III — один ГП в каждом сердечном цикле; IVa — один ГП на см²; IVb — не менее трех ГП на см²; IVc — множество ГП, различимых между собой; V — одиночные ГП неразличимы, «белый мрак».

Результаты и их обсуждение. Интенсивность ВДГ с помощью ультразвуковой слуховой локации с эффектом Доплера представлены на рис. 1.

При УЗИ в покое в 133 случаях ВДГ не определялось (0 баллов); в 17 случаях изменения составили 1 балл; и по одному случаю 2 и 3 балла. После нагрузки получены следующие результаты: в 113 случаях — 0 баллов; в 20 случаях —

¹ Волков Л.К. Физиологическое обоснование профилактики декомпрессионных расстройств: автореф. дис. канд. мед. наук. СПб., 1994. С. 34.

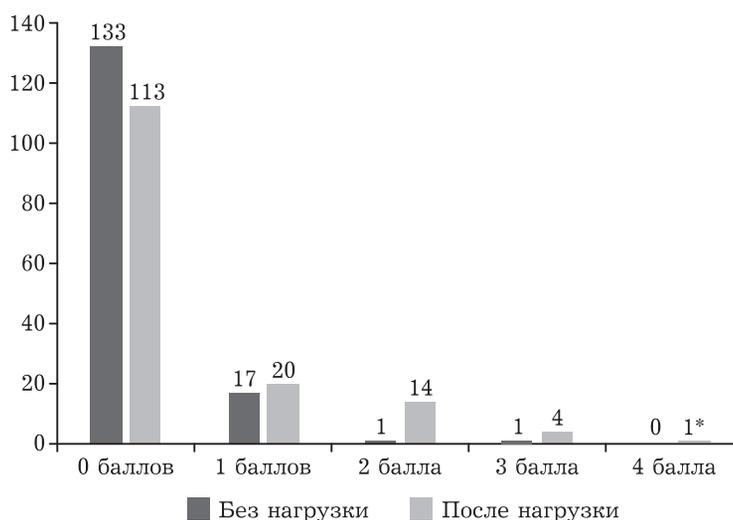


Рис. 1. Оценка внутрисосудистого декомпрессионного газообразования с помощью ультразвуковой локации с эффектом Доплера после спусков

* Случай острой декомпрессионной болезни.

Fig. 1. Evaluations of post-decompression intravascular gas formation using Doppler ultrasound after descents

*A case of acute decompression sickness.

1 балл; в 14 случаях — 2 балла; в 4 случаях — 3 балла; в одном случае — 4 балла.

В соответствии с закономерностями насыщения-рассыщения организма индифферентными газами при декомпрессии (снижении общего давления) может развиваться пересыщение — состояние, при котором парциальное давление индифферентных газов в тканях становится больше общего давления. При пересыщении раствор становится неустойчивым, способным к выделению молекул газа в свободное состояние и образованию газовых пузырьков, прежде всего в тканях и в венозной крови. После выхода водолаза на поверхность величина пересыщения постоянно уменьшается, так как насыщение тканей индифферентным газом уменьшается (продолжается процесс насыщения), а общее давление остается неизменным. То есть, при прочих равных условиях, вероятность образования газового пузырька с течением времени нахождения на поверхности уменьшается. И поэтому индикацию ГП надо проводить как можно раньше после окончания спуска под воду. Если режим декомпрессии был проведен без нарушений, а после не было провоцирующих острую декомпрессионную болезнь факторов (интенсивная физическая и тепловая нагрузка, употребление алкоголя), то ВДГ с течением времени уменьшается, а вместе с ним и вероятность развития острой ДБ. Методически важным является вопрос, в течение какого времени после выхода

на поверхность необходимо проводить определение ВДГ для надежного исключения развития острой ДБ? В связи с этим в исследовании рассчитывали вероятность развития острой ДБ по Л. К. Волкову (таблица).

Из представленных данных следует, что вероятность развития острой ДБ заметно уменьшалась через час после спуска, а через два часа был выявлен лишь один случай с наибольшей вероятностью возникновения острой ДБ в 0,62%. Таким образом, при медицинском обеспечении водолазных спусков отсутствие жалоб водолазов и нулевой уровень ВДГ при использовании способа УЗИ, основанном на эффекте Доплера, позволяют ограничить время индикации двумя часами. Если же при УЗИ определяются ГП исследование должно быть продолжено до устойчивого снижения ВДГ. При этом необходимо помнить о возможности клинической стадии заболевания и через несколько часов после окончания декомпрессии.

Вероятность развития острой ДБ при интенсивности ВДГ от 0 до 1,33 баллов (λ) является довольно низкой. Именно поэтому профилактические мероприятия в этом случае включали в себя повторные исследования ВДГ (с интервалом в 30 минут) и наблюдение за функциональным состоянием организма с применением доступных методов исследования: активное выявление жалоб, осмотр кожных покровов, подсчет частоты сердечных сокращений, частоты дыхания, измерение арте-

Таблица

Вероятность развития острой декомпрессионной болезни по результатам, полученным способом УЗИ, основанным на эффекте Доплера (%)

Table

The results of the probability of developing acute decompression disease according to L. K. Volkov (%)

Вероятность развития острой ДБ (S) сразу после спуска	Вероятность развития острой ДБ (S) через час после спуска	Вероятность развития острой ДБ (S) через 2 часа после спуска
1 случай с вероятностью 99% ($\lambda=3,33$)	*	*
4 случая с вероятностью 33% ($\lambda=1,66$)	1 случай с вероятностью 33% ($\lambda=1,66$)	0 случаев с вероятностью 33% ($\lambda=1,66$)
12 случаев с вероятностью 10% ($\lambda=1,33$)	4 случая с вероятностью 10% ($\lambda=1,33$)	0 случаев с вероятностью 10% ($\lambda=1,33$)
2 случая с вероятностью 2,7% ($\lambda=1,0$)	0 случаев с вероятностью 2,7% ($\lambda=1,0$)	0 случаев с вероятностью 2,7% ($\lambda=1,0$)
2 случая с вероятностью 0,62% ($\lambda=0,66$)	1 случай с вероятностью 0,62% ($\lambda=0,66$)	1 случай с вероятностью 0,62% ($\lambda=0,66$)
18 случаев с вероятностью 0,16% ($\lambda=0,33$)	11 случаев с вероятностью 0,16% ($\lambda=0,33$)	7 случаев с вероятностью 0,16% ($\lambda=0,33$)
113 случаев с вероятностью 0% ($\lambda=0$)	135 случаев с вероятностью 0% ($\lambda=0$)	143 случая с вероятностью 0% ($\lambda=0$)

* Случай, после которого была произведена лечебная рекомпрессия, не учтен, так как водолаз уже находился в барокамере.

риального давления и т.д. В случае определения интенсивности ВДГ в интервале от 1,33 до 3 баллов при отсутствии клинических симптомов частоту исследования уровня ВДГ сокращали до 15 минут. При нарастании уровня ВДГ до высоких значений, свидетельствующих о значительном риске возникновения острой ДБ (более 3 баллов), до развития клинических симптомов проводилось дыхание медицинским кислородом и строгий контроль ограничения физической нагрузки водолазов. По данным

литературы при 4 баллах необходимо проводить лечебную рекомпрессию, не дожидаясь развития симптомов [12, с. 21; 13, с. 44–46].

Величина внутрисосудистого газообразования, выявленного с помощью ультразвукового исследования на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии, представлены на рис. 2.

Оценка интенсивности ВДГ производилась по расширенной шкале Эфтедаля–Брубакка. При УЗИ в покое в 105 случаях не было

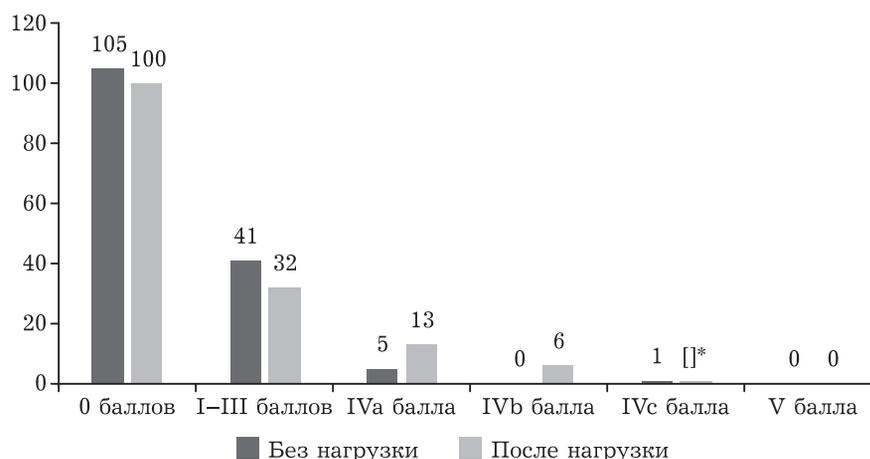


Рис. 2. Результаты оценки внутрисосудистого декомпрессионного газообразования у водолазов после спусков с помощью ультразвукового исследования на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии

* Случай острой декомпрессионной болезни.

Fig. 2. Results of evaluation of the venous gas embolism of divers after descents using ultrasound based on transthoracic two-dimensional echocardiography

* A case of acute decompression sickness.

выявлено ВДГ; в 41 случае были зарегистрированы единичные ГП — I–III балла; в 5 случаях — IVa балла (до 1–3 пузырьков в см²); и в одном случае — IVc балла. После нагрузки получены следующие результаты: в 100 случаях ВДГ не было обнаружено; в 32 случаях были зарегистрированы единичные ГП (I–III балла) (рис. 3); в 13 случаях IVa балла (рис. 4); в 6 случаях IVb (рис. 5); и 1 случай, который можно оценить на IVc балла (рис. 6).

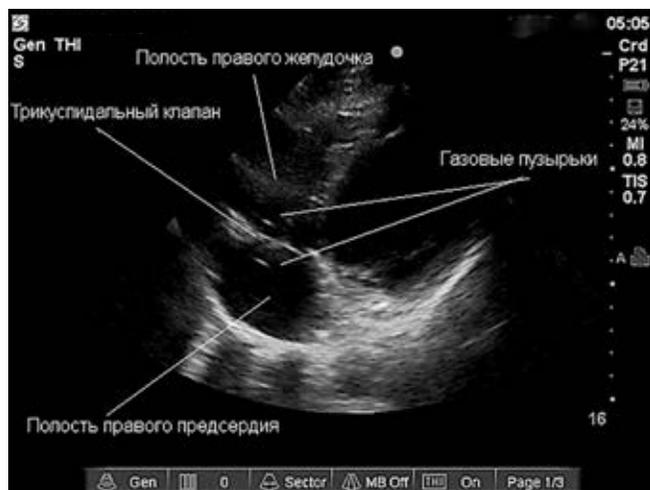


Рис. 3. Сонограмма правых отделов сердца. Визуализация единичных газовых пузырьков в каждом сердечном цикле, III балла
Fig. 3. Sonogram of the right parts of the heart. Visualization of single gas bubbles in each cardiac cycle, grade III

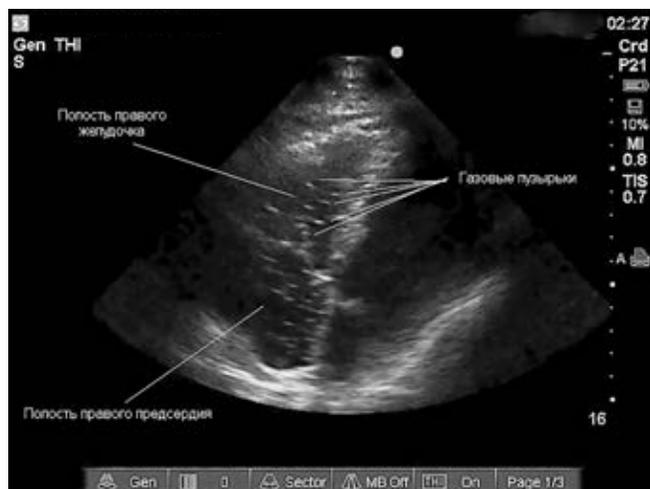


Рис. 4. Сонограмма правых отделов сердца. IVa балла, не менее 1 газовых пузырьков на см²
Fig. 4. Sonogram of the right parts of the heart. Grade IVa, not less than 1 gas bubble per cm²

Только в одном случае выявлена клинически выраженная форма острой ДБ, у водолаза

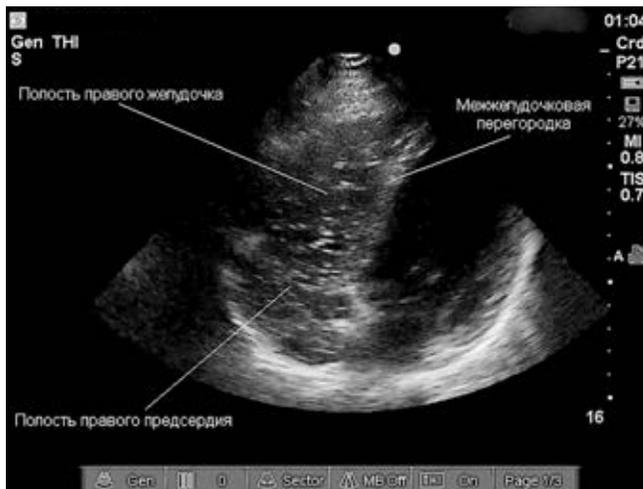


Рис. 5. Сонограмма правых отделов сердца. IVb балла, не менее 3 газовых пузырьков на см²
Fig. 5. Sonogram of the right parts of the heart. Grade IVb, not less than 3 gas bubbles per cm²



Рис. 6. Сонограмма правых отделов сердца. IVc балла, множество еще различимых газовых пузырьков
Fig. 6. Sonogram of the right parts of the heart. Grade IVc, a large number of still distinguishable gas bubbles

были жалобы на неприятные ощущения в области правого плечевого сустава. В этом случае при первом же обследовании оба ультразвуковых способа показали высокий уровень ВДГ: по шкале Эфтедаля–Брубакка IVc/IVc и 3/4 балла по шкале Спенсера. С учетом наличия высокого уровня ВДГ по данным обоих способов ультразвукового исследования этот случай верифицирован как острая декомпрессионная болезнь легкой степени тяжести. Водолазу была проведена лечебная рекомпрессия по кислородному режиму [3, с. 604] в водолаз-

ной барокамере с использованием штатных кислородных масок. По окончании лечебной рекомпрессии жалоб у водолаза не было, по данным УЗИ декомпрессионное газообразование отсутствовало при исследовании обоими способами.

Стоит отметить, что было выявлено 5 случаев ВДГ с максимальной оценкой IVa/IVb способом УЗИ на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии по шкале Эфтедаля–Брубакка, из которых четырем по шкале Спенсера было поставлено 1/3 балла ($\lambda=1,66$, вероятность развития острой ДБ составляет 33%) с помощью способа УЗИ со слуховой локацией с эффектом Допплера. Ни в одном из перечисленных случаев признаков острой ДБ выявлено не было.

По результатам исследования выявляется закономерность между оценками двух шкал: IVa соответствует 1 баллу, IVb соответствует 2 баллам, IVc соответствует 3–4 баллам. Не всегда исследователи слышали изменение кровотока используя способ оценки ВДГ аппаратом УЗИ со слуховой локацией с эффектом Допплера, при наличии более одного ГП на см² методом двухмерной эхокардиографии (IVa). Можно предположить, что наличие интенсивности ВДГ от I до IVa баллов по расширенной шкале Эфтедаля–Брубакка является критерием безопасного выведения избытка индифферентных газов из организма, при этом риск возникновения острой ДБ незначительный. Такой уровень декомпрессионного газообразования в большинстве случаев не определялся способом УЗИ со слуховой локацией, основанном на принципе Допплера.

Заключение. Оба использованных ультразвуковых способа обследования положительно зарекомендовали себя в выявлении ВДГ после декомпрессии водолазов. Способ УЗИ со слуховой локацией с эффектом Допплера уже давно используется у места спусков и входит в практику медицинского обеспечения водолазов. Но разрешение систем визуализации на аппаратах УЗИ продолжает улучшаться, и на их фоне способ слуховой локации стано-

вится недостаточно информативным и удобным для оценки реальной ВДГ в пограничных случаях острой ДБ [8, с. 9; 9, с. 71]. А отсутствие возможности записывать оригинальные данные исследования, усложняют использования данного способа при научно-исследовательской работе.

УЗИ на основе трансторакальной двухмерной эхокардиографии подходит для использования в экспедиционных условиях у места водолазного спуска. Оборудование такого типа позволяет вести протоколы исследований с выставлением даты, времени, информации о водолазе и характеристиками спуска. Способ включает в себя возможность записи обследования с дальнейшим просмотром и более точным выставлением степени ВДГ. Помимо этого, высокая разрешающая способность данного исследования, позволяет выявить ВДГ низкой интенсивности на ранних стадиях образования, то есть при единичных ГП в 10–15 сердечных циклах [7, с. 6], что дает большие преимущества в наблюдении динамики развития ВДГ в постспусковом периоде, в профессиональном отборе водолазов, а также в научно-исследовательской работе [5, с. 54–56]. Прежде всего, такие исследования позволят выявить механизмы патогенеза хронической ДБ водолазов. В настоящее время значительное число случаев декомпрессионного газообразования остаются невыявленными и никак не оцениваются с точки зрения профилактики. Накоплено много фактических данных о патологических изменениях, связанных с бессимптомным декомпрессионным газообразованием, касающихся центральной нервной, сердечно-сосудистой и дыхательной систем, системы крови, выделительной системы, водно-солевого, углеводного и ферментативно-гормонального обмена [14, с. 57–59; 15, с. 30; 16, с. 1704–1707; 17, с. 48; 20, с. 164; 18, с. 176–178]. Отсутствие эффективной системы профилактики хронической декомпрессионной болезни приводит к сокращению профессионального долголетия водолазов, акванавтов и кессонных рабочих.

ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

1. Фисун А.Я., Халимова Ю.Ш. *Профессиональные болезни*. СПб.: Фолиант, 2019. 592 с. [Fisun A.Ya., Halimova Yu.Sh. *Occupational diseases*. St. Petersburg: Publishing house Foliant, 2019, 592 p. (In Russ.)].

2. Шитов А.Ю. Использование неспецифических методов повышения устойчивости водолазов к декомпрессионной болезни // *Кубанский научный медицинский вестник*. 2011. № 2. С. 187–191 [Shitov A.Yu. Nonspecific methods of increasing divers' resistance to the decompression sickness application. *Kuban Scientific Medical Bulletin Issue*, 2011, No. 2, pp. 187–191 (In Russ.)].
3. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. *Водолазные спуски до 60 метров и их медицинское обеспечение*. М.: Слово, 2013. 608 с. [Smolin V.V., Sokolov G.M., Pavlov B.N. *Diving descents up to 60 meters and their medical support*. Moscow: Publishing house Slovo, 2013, 608 p. (In Russ.)].
4. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. *Декомпрессионная болезнь*. Калининград: Страж Балтики, 2010. 651 с. [Smolin V.V., Sokolov G.M., Pavlov B.N. *Decompression sickness*. Kaliningrad: Guardian of the Baltic, 2010, 651 p. (In Russ.)].
5. Мясников А.А., Головяшкин Г.В., Шитов А.Ю., Мотасов Г.П., Чумаков А.В., Сухорослова И.Е., Бобров Ю.М. Ультразвуковая диагностика декомпрессионного внутрисосудистого газообразования в практике водолазного врача // *Военно-медицинский журнал*. 2014. № 6. С. 53–58. [Myasnikov A.A., Golovyashkin G.V., Shitov A.Yu., Motasov G.P., Chumakov A.V., Sukhoroslova I.E., Bobrov Yu.M. Intravascular decompressive aerogenesis ultrasonography in a practice of diving medical physician. *Military medical journal*, 2014, No. 6, pp. 53–58 (In Russ.)].
6. Шитов А.Ю. Современное состояние проблемы профилактики декомпрессионной болезни // *Лечащий врач*. 2011. № 11. С. 70–73. [Shitov A.Yu. The current state of the problem of prevention of decompression sickness. *The Practitioner*, 2011, No. 11, pp. 70–73 (In Russ.)].
7. Germompfe P., Papadopoulou V., Hemelryck W., Obeid G., Lafere P., Eckersley R.J., Tang M-X., Balestra C. The use of portable 2D echocardiography and «frame-based» bubble counting as a tool to evaluate diving decompression stress // *Diving and Hyperbaric Medicine*, 2014, March, No. 44 (1), pp. 5–13.
8. Møllerløkken A., Blogg S.L., Doolette D.J., Nishi R.Y., Pollock N.W. Consensus guidelines for the use of ultrasound for diving research caisson // *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2016. Juli, No. 3. Jg. 31. P. 6–16.
9. Pollock N.W. Use of ultrasound in decompression research // *Diving and Hyperbaric Medicine*. 2007. No. 37. P. 68–75.
10. Тернова С.К. *Основы лучевой диагностики и терапии*. Москва: ГЭОТАР-Медиа, 2013. С. 534–535. [Ternova S.K. *Fundamentals of Radiation Diagnostics and Therapy*. Moscow: Publishing house, 2013, pp. 534–535 (In Russ.)].
11. Беннетт П.Б., Эллиотт Д.Г. *Медицинские проблемы подводных погружений* / пер. с англ. М.: Медицина, 1988. 672 с. [Bennett P.B., Elliott D.G. *The Physiology and medicine of diving* / translated from English. Moscow: Publishing house Medicine, 1988, 672 p. (In Russ.)].
12. Мясников А.А., Зверев Д.П., Шитов А.Ю., Чернов В.И., Андрусенко А.Н. Состояние сердечно-сосудистой системы человека при различных уровнях внутрисосудистого декомпрессионного газообразования после повторных воздействий повышенного давления воздуха // *Экология человека*. 2006. № 6. С. 19–23. [Myasnikov A.A., Zverev D.P., Shitov A.Yu., Chernov V.I., Andrusenko A.N. Condition of the cardio-vascular system of a human being under different levels of the decompressed gas formation after repeated influence of the increased air pressure. *Human ecology*, 2006, No. 6, pp. 19–23 (In Russ.)].
13. Волков Л.К., Ляпин В.М. О диагностической и патогенной роли венозной газовой эмболии при мышечно-суставной форме декомпрессионной болезни // *Медико-биологические проблемы декомпрессии*. М., 1991. С. 43–47 [Volkov L.K., Lyapin V.M. On the diagnostic and pathogenic role of venous gas embolism in the musculoskeletal form of decompression sickness. *Medical and biological problems of decompression*. Moscow, 1991, pp. 43–47 (In Russ.)].
14. Рымина Т.Н. Профессиональная заболеваемость водолазов // *Здоровье. Медицинская экология. Наука*. 2009. Т. 38, № 3. С. 57–59. [Rymina T.N. Professional morbidity of divers. *Health. Medical ecology. The science*, 2009, Vol. 38, No. 3, pp. 57–59 (In Russ.)].
15. Мясников А.А., Ефиценко Е.В., Зверев Д.П., Кленков И.Р. Хроническая декомпрессионная болезнь и ее диагностика // *Вестник Российской военно-медицинской академии*. 2018. № 4. С. 26 [Myasnikov A.A., Efitsenko E.V., Zverev D.P., Klenkov I.R., Chronic decompression sickness and its diagnosis. *Bulletin of the Russian Military Medical Academy*, 2018, No. 4, pp. 26 (In Russ.)].
16. Сапов И.А., Винничук Н.Н., Пискунов М.И. Изменения некоторых биохимических показателей организма при декомпрессионном газообразовании различной интенсивности // *Физиологический журнал СССР*. 1980. Т. 66, № 11. С. 1700–1707. [Sapov I.A., Vinnichuk N.N., Piskunov M.I. Changes in some biochemical parameters of the body during decompression gas formation of varying intensity. *Physiological journal of the USSR*, 1980, Vol. 66, No. 11, pp. 1700–1707 (In Russ.)].
17. Жердев Г.М., Гарибджанов В.А., Евстропова Г.Н. Причины прекращения водолазами профессиональной трудовой деятельности // *Военно-медицинский журнал*. 1992. Т. 3. С. 47–48. [Zherdev G.M., Garibdzhanov V.A., Evstropova G.N. Reasons for the termination of professional activity by divers. *Military medical journal*, 1992, T. 3, pp. 47–48 (In Russ.)].

18. Мясников А.П. *Медицинское обеспечение водолазов, аквалангистов и кессонных рабочих*. Ленинград: Медицина, 1977. 208 с. [Myasnikov A.P. *Medical support for divers, scuba divers and caisson workers*. Leningrad: Publishing house Medicine, 1977, 208 p. (In Russ.)].

Поступила в редакцию/Received by the Editor: 11.10.2021 г.

Авторство:

Вклад в концепцию и план исследования — Д.П.Зверев, С.А.Бычков, А.А.Мясников, А.М.Ярков, И.Р.Кленков, А.Б.Хаустов, С.Г.Фокин. Вклад в сбор данных — Д.П.Зверев, С.А.Бычков, А.М.Ярков, А.Б.Хаустов, С.Г.Фокин. Вклад в анализ данных и вывод — С.А.Бычков, А.А.Мясников, И.Р.Кленков, А.М.Ярков. Вклад в подготовку рукописи — С.А.Бычков, А.А.Мясников, А.М.Ярков, И.Р.Кленков, А.Б.Хаустов.

Сведения об авторах:

Зверев Дмитрий Павлович — кандидат медицинских наук, доцент, полковник медицинской службы, начальник кафедры физиологии подводного плавания федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: z.d.p@mail.ru; SPIN 7570–9568; ORCID 0000–0003–3333–6769;

Бычков Сергей Анатольевич — врач водолазной медицины автономной некоммерческой организации «Центр подводных исследований Русского географического общества»; 191123, Санкт-Петербург, Захарьевская ул., д. 3, лит. А; e-mail: s.bychkov@rgs-urc.ru; ORCID 0000–0002–8506–7815;

Мясников Алексей Анатольевич — профессор доктор медицинских наук, заслуженный работник высшей школы РФ, полковник медицинской службы запаса, профессор кафедры физиологии подводного плавания федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С.М.Кирова» Министерства обороны Российской Федерации; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: a_mjasnikov@mail.ru; SPIN 2590–0429, ORCID 0000–0002–7427–0885;

Ярков Андрей Михайлович — кандидат медицинских наук, врач водолазной медицины автономной некоммерческой организации «Центр подводных исследований Русского географического общества»; 191123, Санкт-Петербург, Захарьевская ул., д. 3, лит. А; e-mail: a.yarkov@urc-rgs.ru; SPIN 1618–3133;

Хаустов Антон Борисович — врач водолазной медицины автономной некоммерческой организации «Центр подводных исследований Русского географического общества»; 191123, Санкт-Петербург, Захарьевская ул., д. 3, лит. А; e-mail: bentmody@mail.ru;

Кленков Ильяс Рифатьевич — майор медицинской службы, адъютант федерального государственного бюджетного военного образовательного учреждения высшего образования «Военно-медицинская академия имени С. М. Кирова» Министерства обороны Российской Федерации, кафедра физиологии подводного плавания; 194044, Санкт-Петербург, ул. Академика Лебедева, д. 6; e-mail: fugazik@mail.ru; SPIN: 9827–8535, ORCID 0000–0002–1465–1539;

Фокин Сергей Георгиевич — исполнительный директор автономной некоммерческой организации «Центр подводных исследований Русского географического общества»; 191123, Санкт-Петербург, Захарьевская ул., д. 3, лит. А; e-mail: s.fokin@urc-rgs.ru.