

КРАТКОЕ СООБЩЕНИЕ / SHORT MESSAGE

УДК 626.02

<http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2023-9-1-95-99>**РАЦИОНАЛЬНАЯ ДЕКОМПРЕССИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПЬЮТЕРНЫХ ПРОГРАММ***А.М. Ярков¹*, С.А. Бычков¹, С.Г. Фокин¹**Центр подводных исследований Русского географического общества,
Санкт-Петербург, Россия*

Водолазами при проведении водолазных спусков используются таблицы с режимами декомпрессии. В настоящее время таблицы вытесняются подводными компьютерами, в которых запрограммированы современные математические модели декомпрессионных алгоритмов. Ни одна из существующих моделей не учитывает индивидуальные особенности организма, процессы, протекающие в нем в условиях повышенного давления газовой и водной среды, и не описывает реальные процессы достаточно хорошо.

Современные водолазные компьютеры способны снабжать водолаза большим объемом информации. На основании данных о глубине, времени, количестве погружений и времени поверхностных интервалов они помогают планировать погружения, информировать, когда нужно совершить подъем, назначать в случае необходимости остановки безопасности и рассчитать время до полета на самолете.

В настоящее время можно с уверенностью заявить, что компьютер водолазу просто необходим. От этого зависит его здоровье, а порой и жизнь.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: морская медицина, водолаз, декомпрессионные модели, градиент-фактор, режимы декомпрессии

Для корреспонденции: Ярков Андрей Михайлович, e-mail: y-andrei@mail.ru

For correspondence: Andrey M. Yarkov, e-mail: y-andrei@mail.ru

Для цитирования: Ярков А.М., Бычков С.А., Фокин С.Г. Рациональная декомпрессия с применением компьютерных программ // *Морская медицина*. 2023. Т. 9, № 1. С. 95-99, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2023-9-1-95-99>.

For citation: Yarkov A.M., Bychkov S.A., Fokin S.G. Rational decompression using computer programs // *Marine medicine*. 2023. Vol. 9, No. 1. P. 95-99, doi: <http://dx.doi.org/10.22328/2413-5747-2023-9-1-95-99>.

RATIONAL DECOMPRESSION USING COMPUTER PROGRAMS*Andrey M. Yarkov¹*, Sergey A. Bychkov¹, Sergey G. Fokin¹**Center for Underwater Research of the Russian Geographical Society, St. Petersburg, Russia*

Divers use tables with decompression modes when conducting diving descents. Currently, tables are being replaced by underwater computers, into which modern mathematical models of decompression algorithms are programmed. None of the existing models takes into account the individual characteristics of the organism, the processes occurring in the body under conditions of high pressure of the gas and water environment, and does not describe the real processes well enough.

Modern diving computers are able to supply a diver with a large amount of information. Based on data on depth, time, number of dives and time of surface intervals, they help to plan dives, inform when it is necessary to make an ascent, assign, if necessary, safety stops and calculate the time before the flight by plane.

Currently, it is safe to say that a computer is simply necessary for a diver. His health, and sometimes his life, depends on it.

KEYWORDS: marine medicine, diver, decompression models, gradient factor, decompression modes.

© Авторы, 2023. Издательство ООО «Балтийский медицинский образовательный центр». Данная статья распространяется на условиях «открытого доступа», в соответствии с лицензией ССВУ-NC-SA 4.0 («Attribution-NonCommercial-ShareAlike» / «Атрибуция-Некоммерчески-Сохранение Условий» 4.0), которая разрешает неограниченное некоммерческое использование, распространение и воспроизведение на любом носителе при условии указания автора и источника. Чтобы ознакомиться с полными условиями данной лицензии на русском языке, посетите сайт: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.ru>

Введение. Человек сталкивается с повышенным давлением газовой и водной среды в процессе водолазных спусков и кессонных работ, в подводных домах, при нырянии и подводном плавании с аквалангом, при лечении сжатым воздухом или кислородом в камерах повышенного давления и барооперационных. Число лиц, систематически пребывающих в этих условиях, с каждым годом увеличивается.

Ошибки в математическом моделировании процессов насыщения и насыщения на практике неизбежно приводят к возникновению избыточного перенасыщения отдельных тканей индифферентными газами и, следовательно, образованию газовых пузырьков, являющихся причиной декомпрессионной болезни. Если учесть чрезвычайное многообразие тканей организма, разную степень их кровоснабжения, влияние функционального состояния организма и физической активности, различную индивидуальную чувствительность и другие внутренние и внешние факторы, то станет ясным, насколько сложна задача создания оптимальных режимов декомпрессии [1].

Именно поэтому более 100 лет ведутся разработки моделей и алгоритмов расчета режимов декомпрессии, направленные на поиск оптимального соотношения скорости и безопасности декомпрессии, зависящих главным образом от величины используемого в расчетах допустимого перенасыщения и периода полурассыщения тканей организма.

Обсуждение. В 1878 г. Поль Бер (Paul Bert) доказал, что основная причина декомпрессионной болезни – возникновение пузырьков газа в крови и тканях организма, и выделил пять факторов:

- величина давления;
- продолжительность пребывания под максимальным давлением;
- скорость снижения давления до нормального;
- физические нагрузки водолаза при нахождении под повышенным давлением;
- возраст и конституция водолаза.

П. Бер предложил проводить медленный спуск водолаза (основной недостаток метода, во время которого происходило значительное насыщение организма азотом еще до достижения максимальной величины окружающего давления) и медленный подъем.

Основоположителем классической теории декомпрессии считают шотландского физиолога

Джона Скотта Халдейна (John Scott Haldane), который по заказу ВМФ Великобритании провел экспериментальные спуски в барокамере, используя коз. Дж. Халдейн предложил представить тело как набор тканевых компонентов, которые насыщаются и насыщаются газом с определенной скоростью. Насыщение и насыщение тканей происходит перфузионно-параллельно, т. е. одновременно. Диффузия молекул газа из одной ткани в другую не предусматривалась.

Декомпрессионная модель Дж. Халдейна была построена на двух гипотезах:

1. Мгновенная скорость абсорбции биологически инертного газа тканью (изменение его парциального напряжения в ткани) прямо пропорциональна градиенту парциального давления газа на границе газообмена (альвеолы легких – ткань). Основной движущей силой в процессе насыщения тканей инертным газом является градиент парциальных давлений – напряжений.

2. Ткани тела способны выдерживать определенный избыток растворенного инертного газа (т. е. находиться в состоянии перенасыщения) без образования свободной газовой фазы (пузырьков).

Модель Дж. Халдейна явилась прообразом и основой для всех последующих теорий и таблиц декомпрессии. Первые декомпрессионные таблицы и метод ступенчатой декомпрессии (эффективный по сравнению с используемым ранее равномерным) были опубликованы в 1908 г. [2].

Последующее развитие метод расчета декомпрессии получил в середине 1960-х годов. Роберт Воркмэн (Robert Workman) получил экспериментальные данные: «быстрые» ткани (обладающие малым временем полунасыщения) способны вынести больший избыток инертного газа, чем «медленные» (характеризующиеся большим временем полунасыщения), а также для всех тканей коэффициент допустимого перенасыщения падает по мере возрастания глубины (давления).

Р. Воркмэн ввел понятие M-оценки (от англ. Maximum), характеризующее максимально допустимое парциальное напряжение инертного газа (то, при котором не происходит образование пузырей) для каждой ткани на определенной глубине.

Принятая концепция линейной зависимости между глубиной (давлением окружающей среды) и максимально допустимым напряжением

инертного газа в каждой отдельно взятой ткани до сих пор является важным элементом современных фазовых моделей.

Параллельно над разработкой фазовой модели трудился профессор Альберт Бульман (Albert Bühlmann). Основное различие между разработками Р. Воркмэна и А. Бульмана заключались в методе подсчета М-оценок. У Воркмэна этот критерий основывался на гидростатическом давлении, а у Бульмана – на абсолютном.

В 1983 г. проф. А. Бульман опубликовал книгу «Декомпрессия – Декомпрессионная болезнь» – это первое издание, в котором были изложены материалы по декомпрессионным вычислениям. Представленные расчеты и вычисления послужили основой для большинства декомпрессионных программ-планировщиков. Для составления декомпрессионных таблиц использовали алгоритм ZH-L16B, а для программирования подводных компьютеров – ZH-L16C [3].

Математически вычисляя М-оценку, изменяя количество пар коэффициентов и компонентов, было разработано большое число декомпрессионных моделей. Некоторые из них представлены ниже.

Билл Гамильтон (Robert William, «Bill», Hamilton) разработал для Шведского ВМФ модель M11F6 М-оценки, которую использовали для составления декомпрессионных таблиц.

Для планирования «бездекомпрессионных» погружений Раймонд Роджерс (Raymond Rogers) и Майкл Повелл (Michael Powell) рассчитали М-оценку, которая легла в основу декомпрессионных таблиц PADI Recreational Dive Planner. Используя предложенные таблицы, водолаз может подняться на поверхность с минимальным риском декомпрессионной болезни [4].

Рассчитанная математически М-оценка – максимально допустимая разница между напряжением газа в тканях и внешним давлением (в зависимости от глубины и типа ткани) – не учитывает индивидуальные особенности организма, поэтому возникает риск получения декомпрессионной болезни. Чтобы дать водолазам возможность выбора, как близко профиль всплытия будет приближаться к рассчитанной М-оценке, Эриком Бейкером (Erik Baker) было введено такое понятие, как градиент-фактор.

Градиент-факторная (GF) модель является наиболее гибким алгоритмом для расчета погружений как с использованием воздушных (кислородно-азотных) смесей (КАС), так и для

мультисмесевых погружений с использованием кислородно-азотно-гелиевых смесей (КАГС).

GF-модель способствует установке аргументированных глубоких остановок в зависимости от насыщения тканей и используемых дыхательных газовых смесей. Если установить GF 100/100, получится математически рассчитанный алгоритм М-оценки в чистом виде, без каких-либо глубоких остановок. GF 0/0 – время декомпрессии стремится к бесконечности. Два параметра GF обычно записываются как «нижний GF % / верхний GF %», или GF 20/80, где 20 % – нижний GF, а 80 % – верхний GF.

Классическая декомпрессионная модель Дж. Халдейна и его последователей была направлена на недопущение образования газовых пузырьков в крови и тканях организма. Однако в конце 1960-х годов получила распространение «пузырьковая модель» декомпрессии. Образование пузырьков в декомпрессии происходит вблизи «газовых зародышей» (микропузырьков, затравок), всегда присутствующих в тканях. Подобные затравки заметно облегчают преодоление энергетического барьера, на образование свободной фазы затрачивается меньше энергии, так как рост пузырька начинается не с нулевой точки.

В конце 1970-х годов Давид Юнт (David Yount) с коллегами разработали микропузырьковую модель VPM (Varying Permeability Model). Первые декомпрессионные остановки VPM предлагает выполнять на глубинах, значительно превышающих глубины остановок в неохалдейновских моделях [5]. Алгоритм VPM-B включает в профиль погружения глубокие остановки для контроля образования пузырьков, сокращая при этом время декомпрессии на малых глубинах. VPM-B/E – для экстремальных или сверхдлительных погружений. VPM-B + GFS позволяет использовать алгоритм декомпрессии VPM-B и не превышать значение верхнего градиент-фактора 90 %.

На основе VPM Брюс Винке (Bruce Wienke) разработал RGBM (Reduced Gradient Bubble Model), распространив модель на высокогорные погружения с «обратным» профилем и серию последовательных погружений в проницаемой области, и т. д.

В настоящее время в водолазной практике получило широкое распространение использование водолазных компьютеров (декомпрессионных). Современные компьютеры способ-

ны снабжать водолаза большой информацией на глубине и на поверхности, способствуя контролю скорости подъема. На основании данных о глубине, времени, количестве погружений и времени поверхностных интервалов они помогают планировать погружения, информировать, когда нужно совершить подъем, назначать в случае необходимости остановки безопасности и рассчитать время до полета на самолете.

Можно с уверенностью заявить, что компьютер водолазу просто необходим. От этого зависит его здоровье, а порой и жизнь.

На сегодняшний день большинство современных компьютерных программ (Deco-planner, AV1 и т.д.) и подводных компьютеров (A-130, «Сивуч», Liquivision X1, Shearwater Predator) используют в качестве декомпрессионных расчетов алгоритм Бульмана ZHL-16C, градиент-факторную модель, 16 тканей в модификации Эрика Бейкера.

Приверженцы микропузырьковой модели VPM (Varying Permeability Model) используют

компьютерные программы (V-Planner, MultiDeco, PalmVPM и т. д.) и подводные компьютеры (V-Planner Live, MultiDeco-X1, MultiDeco-DR5 и пр.), которые в качестве декомпрессионных расчетов применяют алгоритмы VPM-B, VPM-B/E, VPM-B/FBO, VPM-B + GFS.

Заключение. В заключение хотелось бы отметить, что ни одна из существующих моделей не учитывает индивидуальные особенности организма человека, процессы, протекающие в нем в условиях повышенного давления газовой и водной среды, и не описывает реальные процессы достаточно хорошо. Выбор и использование оптимального режима декомпрессии, снижение окружающего давления ступенчатым способом или непрерывно с такой скоростью, чтобы за весь период декомпрессии в крови и тканях организма не образовывались газовые пузырьки, способные вызвать клинические проявления декомпрессионной болезни или ее «немую» форму, остается за водолазом.

Сведения об авторах:

Ярков Андрей Михайлович – кандидат медицинских наук, врач водолазной медицины, автономная некоммерческая организация «Центр подводных исследований Русского географического общества», 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 3, лит. А; e-mail: y-andrei@mail.ru; ORCID 0000-0001-9349-0085

Бычков Сергей Анатольевич – врач водолазной медицины, автономная некоммерческая организация «Центр подводных исследований Русского географического общества», Санкт-Петербург, ул. Захарьевская д. 3, лит. А; e-mail: markis86@mail.ru; ORCID 0000-0002-8506-7815

Фокин Сергей Георгиевич – водолаз-исследователь, исполнительный директор, автономной некоммерческой организации «Центр подводных исследований Русского географического общества», 191123, г. Санкт-Петербург, ул. Захарьевская, д. 3, лит. А; e-mail: s.fokin@urc-rgs.ru. ORCID 0000-0002-4351-1703

Information about the authors:

Andrey M. Yarkov – Cand. of Sci. (Med.), Doctor of Diving Medicine, autonomous non-profit organization «Center for Underwater Research of the Russian Geographical Society», 3-A, Zakharyevskaya St., St. Petersburg, 191123, Russia; e-mail: y-andrei@mail.ru; ORCID 0000-0001-9349-0085;

Sergei A. Bychkov – diving medicine doctor of the autonomous non-profit organization «Center for Underwater Research of the Russian Geographical Society», 3-A, Zakharyevskaya St., St. Petersburg, 191123, Russia; e-mail: markis86@mail.ru; ORCID 0000-0002-8506-7815;

Sergey G. Fokin – research diver, executive director autonomous non-profit organization «Center for Underwater Research of the Russian Geographical Society», 3-A, Zakharyevskaya St., St. Petersburg, 191123, Russia; e-mail: s.fokin@urc-rgs.ru; ORCID 0000-0002-4351-1703.

Вклад авторов: Все авторы подтверждают соответствие своего авторства, согласно международным критериям ICMJE (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Наибольший вклад распределен следующим образом:

Концепция и план исследования – А.М. Ярков, С.А. Бычков; сбор и анализ данных – А.М. Ярков, С.А. Бычков; подготовка рукописи – А.М. Ярков, С.А. Бычков, С.Г. Фокин.

Author contribution. All authors according to the ICMJE criteria participated in the development of the concept of the article, obtaining and analyzing factual data, writing and editing the text of the article, checking and approving the text of the article.

Special contribution: AAG, КОК, АВМ contribution to the concept and plan of the study, contribution to data collection, contribution to data analysis and conclusions, contribution to the preparation of the manuscript.

Потенциальный конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Disclosure. The authors declare that they have no competing interests.

Поступила/Received: 24.01.2023

Принята к печати/Accepted: 03.02.2023

Опубликована/Published: 30.03.2023

ЛИТЕРАТУРА/ REFERENCES

1. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. *Декомпрессионная болезнь* / Под ред. В.М. Баранова. Калининград: Страж Балтики. 2010. 651 с. [Smolin V.V., Sokolov G.M., Pavlov B.N. Decompression sickness / Edited by V.M. Baranov. Kaliningrad: Guardian of the Baltic, 2010, 651 p. (In Russ.)].
2. Boycott A.E., Damant G.C.C., Haldane J.S. The Prevention of compressed air illness. *Journal of Hygiene, London*, 1908, № 8, pp. 342–443.
3. Bühlmann A.A., Völlm E.V., Nussberger P. *Tauchmedizin*. Berlin: Springer Verlag, 2002.
4. Волков Л.К., Мясников А.А., Войцехович И.А., Головяшкин Г.В. Способ оценки безопасности режимов декомпрессионной болезни водолазов // *Воен.-мед. журнал*. 1996. №9. С. 48–50 [Volkov L.K., Myasnikov A.A., Voitsekhovich I.A., Golovyashkin G.V. A method for assessing the safety of decompression sickness regimes of divers. *Military medical journal*, 1996, No. 9, pp. 48–50 (In Russ.)].
5. Yount D.E. Application of a bubble formation model to decompression sickness in rats and humans. *Aviat Space Environ Med*, 1979, Vol. 50, № 1, pp. 44–50.