

Matti Anttila, Ph. D

### История

Теория декомпрессии имеет богатую историю. Уже в конце девятнадцатого века французский физиолог Поль Берт (1833-1886) открыл декомпрессионную болезнь и указал на необходимость декомпрессионных остановок и медленной скорости всплытия. Помимо этого Берт изучал влияние на человеческий организм кислорода, поскольку он интересовался горными восхождениями и тепловыми аэростатами. Однако его исследовательский интерес распространялся и на среды с повышенным давлением, благодаря чему он открыл кислородное отравление. В частности, изучая влияние кислорода на центральную нервную систему (ЦНС) и описывая случаи кислородного отравления, Берт определил, что высокое парциальное давление кислорода воздействует на человека химически, а не механически. Изучая же влияния воздуха и азота, он правильно определил, что декомпрессионная болезнь (ДКБ) вызывается пузырьками азота в крови и других тканях организма (механический эффект). Помимо этого Берт экспериментировал с декомпрессионной и кислородной терапией в случаях ДКБ. Наиболее известной из его книг является "La Pression Barometrique", впервые изданная в 1878 году и описывающая физиологию человека в условиях повышенного и пониженного давления воздуха. В то время как Поль Берт заложил основы физиологии декомпрессии, детально и всесторонне проблема была исследована шотландским физиологом Джоном Скоттом Хелданом (1860-1936). В 1905 году Хелдан был привлечён к исследованиям, связанным с подводными операциями военно-морского флота. Его задачей было изучение Декомпрессионной болезни и способов её избежать. Хелдан провёл ряд исследований, изучил влияние сжатого воздуха на организм на глубине и в 1908 году опубликовал результаты своих исследований в журнале "Journal of Medicine". В этой же статье были опубликованы его таблицы. Хелдан считается отцом современной теории декомпрессии. В результате своих

исследований он пришёл к важному заключению, что человек может всплыть с глубины 10м/33фт без ДКБ независимо от времени пребывания на дне. Из этого он сделал вывод, что человеческий организм может безболезненно выдержать уменьшение давления в соотношении 2:1 (давление на глубине 10м/33фт – 2Ата, а на поверхности – 1Ата). Позднее это соотношение было пересмотрено Робертом Уокманом до 1.58:1. Уокман был доктором медицины и занимался исследованиями декомпрессии на военно-морском флоте США в 60-х годах прошлого века. Он провел системное исследование декомпрессионной модели, использовавшейся в то время в военно-морском флоте США и основанной в то время на исследованиях Хелдана. Помимо пересмотра величины безопасного соотношения давлений, Уокман выяснил, что это соотношение зависит от типа тканей (именуемых “тканевыми ячейками” или ТЯ, с различными скоростями насыщения) и глубины. Дальнейшее развитие теории декомпрессии является заслугой доктора Альберта А. Бюльмана (1923-1994) из Цюриха. В процессе своих исследований он увеличил число тканевых ячеек (ТЯ) до 16, что стало основой для его декомпрессионной модели ZH-L16 (где ZH означает Цюрих, L – линейная, а 16 – число тканевых ячеек). Первые таблицы, основанные на этой модели, были опубликованы в 1990 году (все таблицы, опубликованные ранее, были основаны на моделях с меньшим количеством ТЯ).

Основа декомпрессии

Начнём с основ: Дайвер погружается на глубину, дыша сжатым воздухом из своего баллона. Воздух содержит азот, который, будучи инертным газом, начинает насыщать ткани организма. Во время всплытия давление окружающей среды падает, и насыщающийся азот начинает переходить из других тканей в кровь, оттуда в лёгкие, а затем покидает организм с каждым выдохом. Просто, не правда ли? В рекреационном дайвинге декомпрессионные погружения не проводятся. Вместо этого дайверам рекомендуется оставаться в бездекомпрессионных пределах (НДЛ) при пребывании на дне. НДЛ для различных глубин указан в таблицах. Кроме того, дайверам рекомендуется не превышать определённую скорость всплытия. Для большинства дайверов этой информации вполне достаточно. Но

что делать,

если мы превысим бездекомпрессионный предел, и при всплытии нам потребуется декомпрессия?

Насыщение тканей и потолок всплытия

Во время декомпрессионного погружения над нашей головой появляется невидимый потолок. Этот

«полк» определяется той глубиной, на которую мы можем всплыть, без риска получить декомпрессионную болезнь. Физиологически этот «потолок» определяется количеством инертного газа,

растворённого в тканях нашего организма. На рисунке 1 представлено типичное декомпрессионное погружение с несколькими декомпрессионными

остановками. Перед погружением «потолок» представляет собой отрицательную глубину (над

поверхностью), что означает, что ваш организм может безболезненно выдержать некоторое снижение

давления. По мере погружения дайвер проводит некоторое время на глубине, «потолок» снижается и

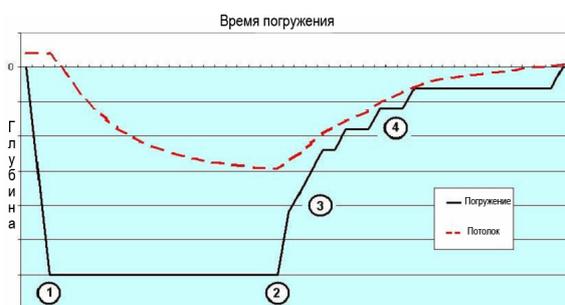
через некоторое время начинает ограничивать возможность всплытия, что приводит к необходимости

декомпрессии. Некоторые декомпрессионные программы по запросу дайвера показывают «потолок» для

каждого конкретного момента погружения. Декомпрессионные компьютеры показывают «потолок» как

глубину первой обязательной декомпрессионной остановки.

Рис. 1



При всплытии дайвер не может подняться выше «потолка», без риска получить декомпрессионную

болезнь. На профиле погружения (рис. 1) ясно видны декомпрессионные остановки. Чем ближе дайвер

подходит к «потолку», тем меньше у него остаётся запаса безопасности. Сам по себе «потолок» ничего

не говорит о насыщении или насыщении тканей. Бюльман использует 16 тканевых

ячеек для моделирования насыщения инертного газа из нашего тела. Оказывается, что в один и тот же момент времени одни тканевые ячейки могут поглощать инертный газ (насыщаться), а другие – выделять (рассыщаться). «Потолок» показывает разницу давлений по сравнению с текущей глубиной при которой ведущая тканевая ячейка насыщается настолько быстро, что при увеличении этой скорости есть риск получения ДКБ. На рисунке 2 представлены 16 тканевых ячеек в процессе погружения, изображённого на рисунке 1. Тканевая ячейка (ТЯ) достигает своего насыщения, когда она заполнена на 100%. Во время всплытия ячейки становятся перенасыщенными (насыщены выше 100%). Основным принцип декомпрессии это добиться такого перенасыщения тканей, но такого, чтобы в тканях еще не начался процесс образования пузырьков в тканях и крови.

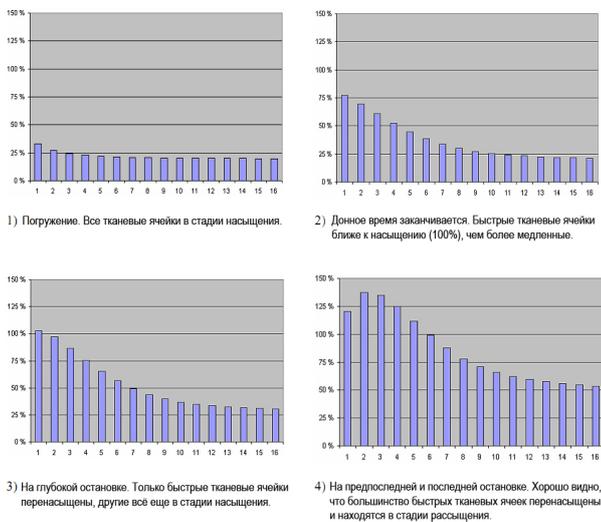


Рис. 2

Как показано на рисунке 2, количество растворенного газа, иначе говоря, его парцильное давление в тканях, имеет тенденцию следовать за давлением окружающей среды в которую мы

погружаемся. Чем

больше разница давлений (градиент давления), тем быстрее ткани насыщаются или насыщаются.

Возникает закономерный вопрос: «Почему нельзя просто всплыть на поверхность?»

Каковы пределы

перенасыщения и чем они определяются?»

М-фактор

Ещё немного истории: Роберт Уокман ввёл понятие М-фактора, которое обозначает максимально-

возможное давление инертного газа в гипотетической тканевой ячейке, которое она может выдержать

без возникновения ДКБ. Как уже говорилось, Хелдан в ходе своих исследований выяснил, что М-фактор

равен 2, а Уокман уточнил, что он равен 1.58. (Эта цифра получается исходя из того, что всплытие с

глубины 10м/33фт изменяет давление с 2Ата до 1Ата, с учётом того, что воздух содержит 79% инертных

газов, в основном азота).

Уокман определил М-фактор, в терминах глубины (величины давления), а не соотношения давлений,

которое он, однако, использовал для построения линейной зависимости М-фактора от глубины. Наклон

полученной прямой М-фактора называется  $\Delta M$  и представляет собой изменение М-фактора с

изменением глубины. Бюльман для определения М-фактора использовал тот же метод, что и Уокман, но

вместо давления столба воды (относительного давления) он использовал абсолютное давление, которое

выше на 1Ата. Разница хорошо видна на рисунке 3, где прямая М-фактора по Уокману проходит выше,

чем прямая М-фактора по Бюльману.

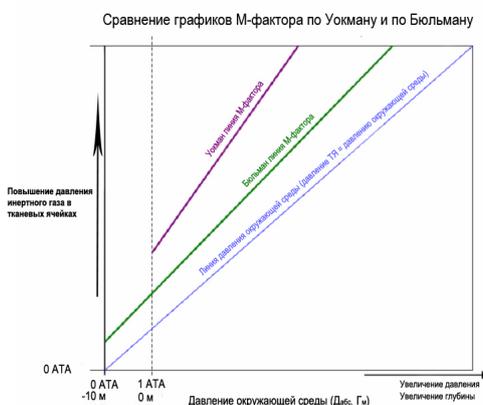


Рис. 3

На рисунке 3 представлено сравнение графиков М-фактора по Уокману и по Бюльману. Это сравнение

подробно рассматривается в литературе, но основные различия очевидны: Поскольку прямая М-фактора по Уокману круче, чем по Бюльману, она оставляет меньший запас безопасности. Кроме того М-фактор по Уокману допускает большее перенасыщение, чем М-фактор по Бюльману. Для

дальнейшего усложнения картины следует отметить, что помимо того, что значение М-фактора различно для разных

тканевых ячеек, для каждой ТЯ принято использовать два параметра М-фактора: М0-фактор (значение

М-фактора на поверхности; М0 читается как «М-ноль») и значение М-фактора как соотношение давлений

( $\Delta M$ , «дельта-М»). Уокман определяет соотношение между этими величинами следующим образом:

$M = M_0 + \Delta M \cdot d$ , где М – предел парциального давления для данной ТЯ (в Ата)

М0 – предел парциального давления на поверхности для данной ТЯ

(в Ата)

$\Delta M$  – увеличение М с глубиной для данной ТЯ (в Ата/м)

d – глубина (м)

Набор этих величин приведён в литературе, но, стоит заметить, что все они касаются одного:

максимально допустимого перенасыщения тканевых ячеек. Однако следует помнить, что

декомпрессионная болезнь не ограничена строго величиной М-фактора. Просто ДКБ гораздо более

вероятна при его превышении, хотя возможна и при парциальных давлениях меньших, чем М-фактор.

Градиент-фактор

Градиент-фактор призван ввести дополнительный консерватизм в декомпрессионную модель Бюльмана.

Как уже было сказано в предыдущей главе, линия М-фактора устанавливает предел, который не следует

превышать во время декомпрессионного всплытия. Однако, поскольку ни одна декомпрессионная

модель не способна гарантированно предотвратить все случаи ДКБ, из-за того, что и дайверы и условия

погружения очень различаются, дополнительный запас безопасности будет весьма кстати.

Как показано на рисунке 3 декомпрессионное всплытие должно проходить между линией М-фактора и

прямой внешнего давления. Для того, чтобы происходило насыщение, парциальное давление инертного газа в тканевой ячейке должно превосходить внешнее давление. С другой стороны, в целях безопасности, нам бы не хотелось слишком близко подходить к линии М-фактора. Здесь нам на помощь приходит Градиент-фактор. Градиент-фактор (ГФ) определяет величину перенасыщения ведущей тканевой ячейки инертным газом. Если  $ГФ=0\%$ , то перенасыщения нет, и парциальное давление инертного газа в ведущей тканевой ячейке равно внешнему давлению (Ведущая ТЯ не обязательно является самой быстрой ТЯ!) Если  $ГФ=100\%$ , то декомпрессия проходит, когда ведущая ТЯ находится непосредственно на линии Бюльмановского М-фактора. При этом риск ДКБ значительно выше, чем при более низких значениях градиент-фактора.

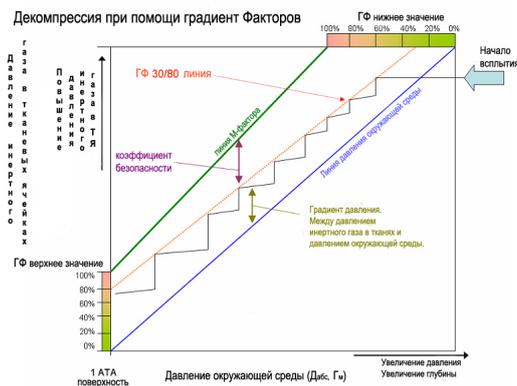


Рис. 4

(Иногда, особенно в уравнениях и расчетах, значение градиент-фактора выражается в долях единицы, а не в процентах. Это не должно вас смущать, поскольку  $100\%=1.00$ .) Некоторым дайверам не нравится идея использовать один и тот же уровень консерватизма в течении всего всплытия. Таким образом, возникла необходимость изменения запаса безопасности в процессе

подъёма. Это привело к появлению двух параметров ГФ: «Нижний ГФ» и «Верхний ГФ». Нижний градиент-фактор определяет первую декомпрессионную остановку, а верхний градиент-фактор – запас безопасности на поверхности после всплытия. При этом градиент-фактор изменяется с глубиной. Это показано на рисунке 4, где Нижний ГФ и Верхний ГФ представляют собой начальную и конечную точку Линии Градиент-фактора. На графике видно, что декомпрессия начинается, когда значение парциального давления инертного газа в тканевых ячейках дайвера достигнет 30% разницы между внешним давлением и М-фактором. Затем дайвер делает остановку, позволяя парциальному давлению в ТЯ понизиться настолько, чтобы можно было всплыть на глубину следующей остановки, ГФ для которой уже несколько больше. Два параметра ГФ обычно записываются как «Нижний ГФ (%) / Верхний ГФ (%)», или ГФ30/80, где 30% – Нижний ГФ, а 80% – Верхний ГФ.

Практика применения и безопасность

Ни одна декомпрессионная модель не даёт абсолютных гарантий от ДКБ. Линия М-фактора не является строгой границей для декомпрессионной болезни. Современные исследования в области декомпрессии показали, что пузырьки инертного газа присутствуют в наших тканях после всплытия, даже если нет никаких симптомов ДКБ. Таким образом, М-фактор не гарантирует отсутствие пузырьков в тканях, а только предполагает их приемлемое количество.

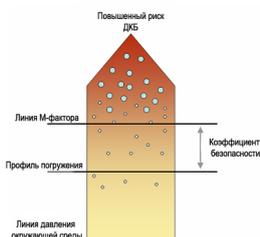


Рис. 5

Следует понимать, что для различных условий погружения и разных дайверов необходим разный запас прочности. Таким образом, полезно понимать практическую разницу между различными погружениями, где были использованы разные параметры ГФ. Рассмотрим ещё один пример: Погружение на глубину 50м/165фт, время на дне – 20мин, основная дыхательная смесь – Тримикс 18/45 (18% кислорода и 45% гелия) и чистый кислород для декомпрессии на глубине выше 6м/20фт. Скорость погружения – 15м/мин (50фт/мин), скорость всплытия – 10м/мин (33фт/мин). Декомпрессионный алгоритм на основе модели Бюльмана ZH-L16B с использованием декомпрессионных таблиц с разными значениями параметров ГФ (как показано в таблице 1).

Глубина м (фт)	Время на уровне с различными градиент факторами					Газ:	Заметка:
	ГФ 10/90	ГФ 20/70	ГФ 30/85	ГФ 36/95	ГФ 100/100		
50m (165 ft)	20	20	20	20	20	Tx 18/45	Run time: 3...20min
30m (100 ft)	1					Tx 18/45	
27m (90 ft)	1	1				Tx 18/45	
24m (80 ft)	1	1	1			Tx 18/45	
21m (70 ft)	1	2	1	1		Tx 18/45	
18m (60 ft)	1	3	2	2		Tx 18/45	
15m (50 ft)	3	3	3	2		Tx 18/45	
12m (40 ft)	3	5	3	3	2	Tx 18/45	
9m (30 ft)	7	10	7	5	3	Tx 18/45	
6m (20 ft)	5	6	5	4	4	Oxygen	ppO2 1.6 ATA
3m (10 ft)	8	13	9	7	7	Oxygen	ppO2 1.3 ATA
Общее время погружения:	54	67	54	48	40		

Таблица. 1

Эти параметры ГФ часто используются для различных типов погружений (погружений с ребризером, глубоких погружений в холодную воду, настройки по умолчанию для различных декомпрессионных программ), а данные для ГФ 100/100 даны для сравнения, поскольку представляют собой чистый алгоритм Бюльмана (без какого либо запаса безопасности). В таблице 1 явно видно, что чем меньше значение параметра Нижний ГФ, тем более глубокие декомпрессионные остановки рекомендуются. На практике многие дайверы используют Нижний ГФ, равный 10%, чтобы получить более «глубокие» декомпрессионные остановки, именуемые иногда остановками Пайла, смысл которых в сокращении

пузырьков в тканях на начальной стадии всплытия. Однако при «глубоких» остановках наиболее медленные ткани продолжают насыщаться, что приводит к увеличению времени декомпрессии (и снова дополнительный запас безопасности не повредит, что, однако, приведёт к ещё большему «зависанию»).

Кроме того, из таблицы 1 следует, что чем меньше параметр Верхний ГФ, тем продолжительнее декомпрессионные остановки на малых глубинах.



Рис. 6

Таким образом, мы видим, что план погружения может быть существенно изменён с помощью подбора значений градиент-фактора. Большинство декомпрессионных программ в настоящее время используют либо разного рода консервативные настройки (численные или словесные), либо градиент-фактор. С помощью этих настроек дайвер может легко изменить общее время погружения на десятки минут (без учёта требуемого запаса дыхательных смесей). Но здесь есть одна тонкость: представьте себе, что декомпрессионная программа показывает вам, что дыхательной смеси для декомпрессии требуется больше, чем вмещает ваш баллон (с учётом запаса). При этом у вас есть лёгкая, но опасная возможность уменьшить время декомпрессии (и сократить требуемый запас дыхательной смеси) путём соответствующего подбора параметров ГФ, сократив, тем самым, запас безопасности. Пользователям декомпрессионных компьютеров, использующих настраиваемую модель Градиент-

фактора, следует хорошо представлять, как изменение параметров ГФ изменит профиль погружения.

Очень многие дайверы просто используют настройки по умолчанию, или копируют настройки своих друзей, или даже скачивают их из Интернета, не имея представления о том, как эти настройки соотносятся с конкретным погружением. Разные дайверы имеют разную степень склонности к декомпрессионной болезни, и, хотя метод градиент-фактора позволяет в широком диапазоне варьировать время погружения (а, стало быть, и запас дыхательной смеси), иногда следует «повисеть» подольше – «от греха подальше».

Таким образом, как обычно принято в дайвинге, выбор настроек градиент-фактора и, следовательно, уровня консерватизма вашего погружения, остаётся **ИСКЛЮЧИТЕЛЬНО** за вами!