Объяснение путаницы по поводу "Глубоких остановок"

Эрик Бейкер

Старая английская пословица "Унция профилактики стоит фунта лечения" вполне применима и к различным проявлениям декомпрессионной болезни (ДКБ). Лучшая профилактика ДКБ, в первую очередь, **строго соблюдать декомпрессионный профиль**. Технические дайверы обнаружили, что включение "глубоких остановок" [1] в профиль погружения может значительно уменьшить риск возникновения ДКБ. Более тщательный анализ декомпрессионной модели показывает, что такая практика помогает уменьшить или устранить чрезмерный перепад градиентов давления. Зная это, можно модифицировать модель таким образом, чтобы обеспечить точный контроль градиентов. Кроме этого, остановки в зоне декомпрессии могут быть рассчитаны, как "самые глубокие из возможных декомпрессионных остановок".

Примечание: *Для понимания концепции декомпрессии и терминологии, обсуждаемой в этой статье, рекомендуем также прочесть статью Эрика Бейкера "Понятие М-значений".*

Многие технические дайверы обнаружили, что они чувствуют усталость, недомогание или сонливость после завершения определенных типов декомпрессионных погружений. "Погружение скачком" [2], на относительно большую глубину, часто приводит к таким симптомам. Обычные модели декомпрессии, для такого вида погружений, будут генерировать первую декомпрессионную остановку на весьма мелкой глубине, по сравнению с глубиной дна. Некоторые дайверы сообщили, что если они добавляли несколько "глубоких остановок" в свои профили, то такие симптомы после погружения резко уменьшались или вообще устранялись. Проблемой путаницы и противоречий среди технических дайверов является вопрос, о том, как глубоко эти "глубокие остановки" должны быть и сколько таких остановок должно быть выполнено.

Эмпирические наблюдения дайверов привели к развитию произвольных методов расчета глубоких остановок. Многие из этих методов основаны скорее на индивидуальных предпочтениях, чем на базовых расчетах декомпрессии. Анализ декомпрессионных профилей, которые используют произвольные глубокие остановки, показывает, что существуют потенциальные проблемы. Они включают в себя остановки, которые сделаны слишком глубоко, что приводит к неадекватному увеличению времени декомпрессии на мелких остановках, чтобы компенсировать повышенное насыщение тканей инертным газом, вызванное глубокими остановками.

---

[1] "Глубокие остановки" – это остановки, которые находятся глубже, чем остановки, которые генерируют обычные методы расчета.

[2] "Погружение скачком" – это спуск на максимальную глубину, минимальное время на дне, а затем подъем на поверхность. Профиль погружения похож на шип.

ТРАДИЦИОННЫЙ РАСЧЕТ

В теории и практике декомпрессии существует компромисс между достаточной декомпрессией (без симптомов ДКБ) и экономной декомпрессией (минимальное количество времени, газов, экспозиции и т.д.). Традиционные алгоритмы для расчета растворенного газа, такие как, разработанные Робертом Воркманом и Альбертом Бульманом, стремятся оптимизировать декомпрессию, позволяя дайверу подняться на самую мелкую глубину (или "потолок"), на основе предельного М-значения гипотетического "тканевого компартамента". Получается двойная экономия во время декомпрессии: ускоренное рассыщение быстрых тканевых компартаментов, в то время как насыщение медленных компартаментов сведено к минимуму. На практике дайверам традиционно рекомендуют после покидания дна подниматься до первой остановки своевременно.

Для типичного "погружения скачком", традиционный расчет предполагает относительно длинный подъем со дна до первой остановки. В этом случае, в донной части погружения насыщение инертным газом быстрых компартаментов близко к максимальному, в то время как насыщение медленных компартаментов только частично. Это означает, что быстрые компартаменты будут контролировать начальный подъем, так как их напряжение приблизится к М-значению, задолго до медленных компартаментов. Первая остановка определяется, когда напряжение лидирующего компартамента приблизится к М-значению.

ПУЗЫРЬКИ И ГРАДИЕНТЫ

Когда концепция М-значений была впервые представлена в 1965 году исследователем декомпрессии Роберт Воркманом, было сделано предположение, что инертный газ не будет выходить из раствора в виде пузырьков в тканях дайвера, пока не будет превышено М-значение. Эта теория была несколько спорной для того времени, однако было признано, что технологии будущего позволят дать более точную информацию о наличии и поведение пузырьков в теле дайвера. Воркман допускал, что "ультразвуковые методы обнаружения пузырьков в естественных и лабораторных условиях, которые пока только изучаются, позволят лучше определить адекватность модели декомпрессии, но все это находится еще на ранней стадии".

С тех пор была разработана Доплеровская ультразвуковая технология, и она широко используются в декомпрессионных исследованиях во всем мире. Эти исследования показали присутствие пузырьков в кровообращении дайвера в течение и после многих видов погружений, в том числе и без симптомов ДКБ. Другими словами, образование пузырьков может произойти и без превышения М-значения. Этот факт был признан в декомпрессионной науке, но механизмы образования и роста пузырьков в организме человека пока еще точно не изучены.

Законы физики и многие пузырьковые модели прогнозируют, что большее число и размеры пузырьков можно ожидать при увеличении избыточного давления градиента. В модели растворенного газа, это означает, что больше пузырьков можно ожидать, если график функции нагрузки компартамента инертным газом будет гораздо выше линии окружающего давления на графике давления.

ИЛЛЮСТРАЦИЯ ПРОБЛЕМЫ

График давления на Рис.1 отображает полный профиль декомпрессии, рассчитанный традиционным способом. В этом профиле, быстрые компартаменты имеют наибольшую газовую нагрузку на начальной стадии подъема и являются лидирующими. М-значения для этих быстрых компартаментов позволяют большие градиенты избыточного давления относительно медленных компартаментов. Следовательно, большой и быстрый градиент избыточного давления создается во время подъема к первой остановке. Этот градиент несоизмерим с меньшими градиентами избыточного давления, допустимыми при выполнении оставшейся части профиля декомпрессии, когда медленные компартаменты являются лидирующими. Предположительно, много пузырьков может быть образовано во время начального подъема к первой остановке. В этом случае расчетный градиент составляет 22.4 метра морской водой (msw) ~ 2.2 атм (не путать с абсолютной атмосферой [ата]! – *прим. переводчика*). Для сравнения, когда открыта банка содовой, градиент давления между растворенным углекислым газом и воздухом находится в диапазоне от 3.1 атм до 3.4 атм.

Хотя М-значение и не превышается в декомпрессионном профиле на Рис.1, дайвер может испытывать симптомы усталости, недомогания или сонливости после такого погружения. Объяснение этого относится к теории миграции пузырьков в организме и к отсроченному рассыщению, которое вызвано накоплением пузырьков в легочных капиллярах. В любом случае, существует причинно-следственная связь между большими градиентами избыточного давления во время погружения и симптомами после погружения. Легкие или неявные симптомы, такие как усталость и недомогание, которые обычно не требуют лечения, могут подпадать под категорию декомпрессионного напряжения, легкого варианта ДКБ.

РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Большие и/или быстрые градиенты избыточного давления в декомпрессионном профиле, вероятно, создают больше пузырьков, что приводит к декомпрессионному напряжению или ДКБ. Очевидное решение этой проблемы состоит в ограничении величин градиентов избыточного давления. Декомпрессионная модель растворенного газа может быть использована для решения этой проблемы.

Во-первых, существует предел того, как глубоко "глубокая остановка" может быть. Лидирующий компартамент, связанный с "декомпрессионной остановкой", не должен быть ниже зоны декомпрессии. В целом, для эффективного рассыщения необходим избыточный градиент давления. Также важно минимизировать степень насыщения медленных компартаментов в течение декомпрессии.

В контексте модели растворенного газа, "самая глубокая возможная декомпрессионная остановка" для данного профиля может быть определена, как ближайшая стандартная остановка выше точки, где газовая нагрузка для лидирующего компартамента пересекает линию давлении окружающей среды (Рис.1–3). Самая глубокая возможная остановка легко рассчитывается декомпрессионными программами, и она будет варьироваться в зависимости от скорости подъема со дна и используемой газовой смесью.

Декомпрессионный профиль не обязательно должен иметь первую остановку на глубине, соответствующей самой глубокой возможной остановке. Эта глубина просто представляет точку, в которой, по крайней мере, один компартамент будет находиться в зоне декомпрессии. Многие декомпрессионные профили предлагают остановки, которые начинаются с нескольких стандартных глубин, которые выше самой глубокой возможной остановки. Этих остановок достаточно для контроля чрезмерных градиентов избыточного давления. Тем не менее, величина самой глубокой возможной остановки является ценной информацией для дайвера, поскольку она указывает на начало зоны декомпрессии. При достижении этой точки во время подъема со дна, дайвер должен уменьшить скорость подъема в декомпрессионной зоне до 10 м/мин или меньше. Такая практика помогает уменьшить быстрое изменение градиента избыточного давления, который, предположительно, способствует образованию и росту пузырьков.

Далее, существует проблема расчета глубоких остановок. Один из эмпирических методов для расчета глубоких остановок был предложен дайвером и морским биологом Ричардом Пайлом. Он используется в сочетании с программами расчета декомпрессии для персональных компьютеров. Полный профиль декомпрессии с использованием метода Ричарда Пайла для расчета глубоких остановок показан на Рис.2. График показывает, что этот метод эффективен для уменьшения или устранения чрезмерных градиентов избыточного давления по сравнению с традиционными методами расчета декомпрессии. Однако существуют потенциальные трудности, связанные с этим подходом. В зависимости от используемой программы декомпрессии и настроек консерватизма, напряжение в медленных компартаментах может быть ближе к М-значениям на мелких остановках, в связи с увеличением насыщения, вызванного глубокими остановками. Программа будет компенсировать глубокие остановки, но если коэффициент консерватизм не будет увеличиваться, она не сможет обеспечить такой же запас прочности на мелких остановках, как при использовании традиционного профиля. Хорошим способом сравнения является вычисление максимального процента М-значения и процента от градиента М-значения для каждого компартамента на каждой остановке.

График давление на Рис.3 показывает полный профиль декомпрессии, рассчитанный с использованием Градиент фактора, который позволяют контролировать градиенты избыточного давления по всему профилю. Градиент фактор обеспечивают последовательный подход к консерватизму в декомпрессионных вычислениях. Он может быть использован для создания глубоких остановок в зоне декомпрессии, контроля градиентов избыточного давления и обеспечения фиксированного запаса прочности М-значений по всему профилю декомпрессии. Градиент фактор – это просто десятичная дробь или процент от градиента М-значения (Рис.4).

Добавление глубоких остановок в профиль обычно увеличивает время, требуемое на мелкие остановки, а также общее время декомпрессии. Однако, если действительно "достаточная декомпрессия" является результатом, то понятие "экономичной декомпрессии" на самом деле не нарушено.

График давление – это отличный инструмент для дайверов, который позволяет оценить профиль декомпрессии. Даже быстрый взгляд позволяет выявить потенциальные проблемы, такие как большие градиенты избыточного давления.

Разработчикам декомпрессионных алгоритмов и программистам рекомендуется включать эту функцию в своих программы.

В заключение, примеры декомпрессионных профилей, используемые для графиков давления в этой статье, были рассчитаны с минимальным консерватизмом и предназначены только для целей сравнения.

Ссылки:

Baker EC.
1998. Understanding M-values. Immersed. Vol. 3, No. 3.

Bennett PB, Elliott DH, eds.
1993. The Physiology and Medicine of Diving. London: WB Saunders.

Bühlmann, AA.
1984. Decompression-Decompression Sickness. Berlin: Springer-Verlag.

Bühlmann, AA.
1995. Tauchmedizin. Berlin: Springer-Verlag.

Hamilton RW, Rogers RE, Powell MR, Vann RD.
1994. Development and validation of no-stop decompression procedures for recreational diving: The DSAT Recreational Dive Planner. Santa Ana, CA: Diving Science and Technology Corp.

Pyle RL.
1996. The importance of deep safety stops: Rethinking ascent patterns from decompression dives. DeepTech. 5:64; Cave Diving Group Newsletter. 121:2-5.

Schreiner HR.
1968. Safe ascent after deep dives. Rev. Subaquat. Physiol. Hyperbar. Med. 1:28-37.

Schreiner HR, Kelley PL.
1971. A pragmatic view of decompression. In: Lambertsen CJ, ed. Underwater Physiology IV. New York: Academic Press.

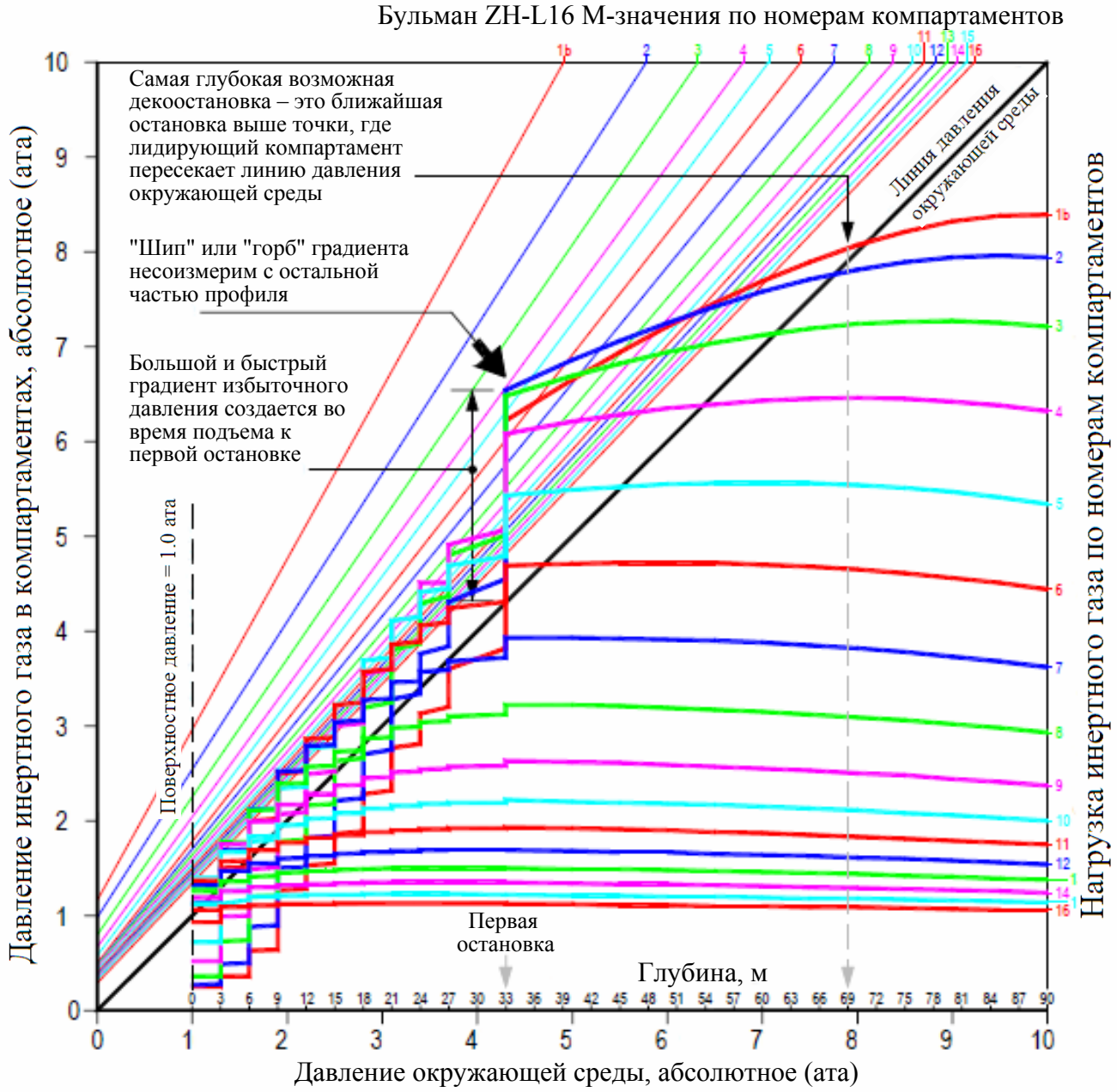
Wienke BR.
1991. Basic decompression theory and application. Flagstaff, AZ: Best.

Wienke BR.
1994. Basic diving physics and applications. Flagstaff, AZ: Best.

Workman RD.
1965. Calculation of decompression schedules for nitrogenoxygen and helium-oxygen dives. Research Report 6-65. Washington: Navy Experimental Diving Unit.

Рисунок 1

График давления: Полный профиль погружения (Традиционный метод расчета)



Notes:

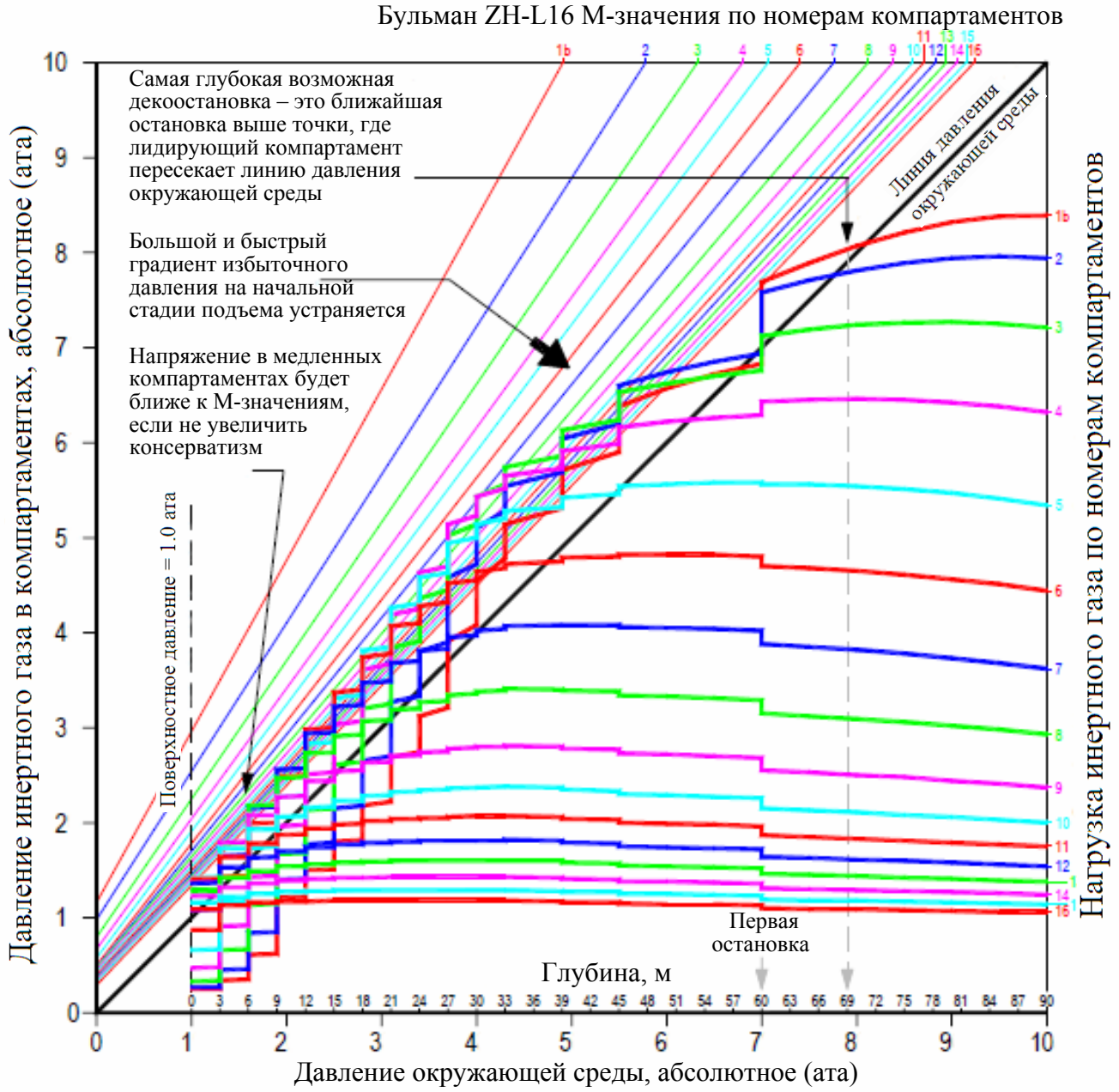
1. 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
2. Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
3. Conservatism factor is minimal (15%).
4. Ascent rate is 10 msw/min.
5. Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
6. Run times are leaving the stop.
7. This deco profile is representative for the typical deep "bounce dive."

Decompression Table

Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
33	29	15	45	0	100		
27	31	12	51				
24	33	9	60				
21	36	6	73				
18	40	3	99				

Рисунок 2

График давления: Полный профиль погружения (Пайловский метод расчета глубоких остановок)



Notes:

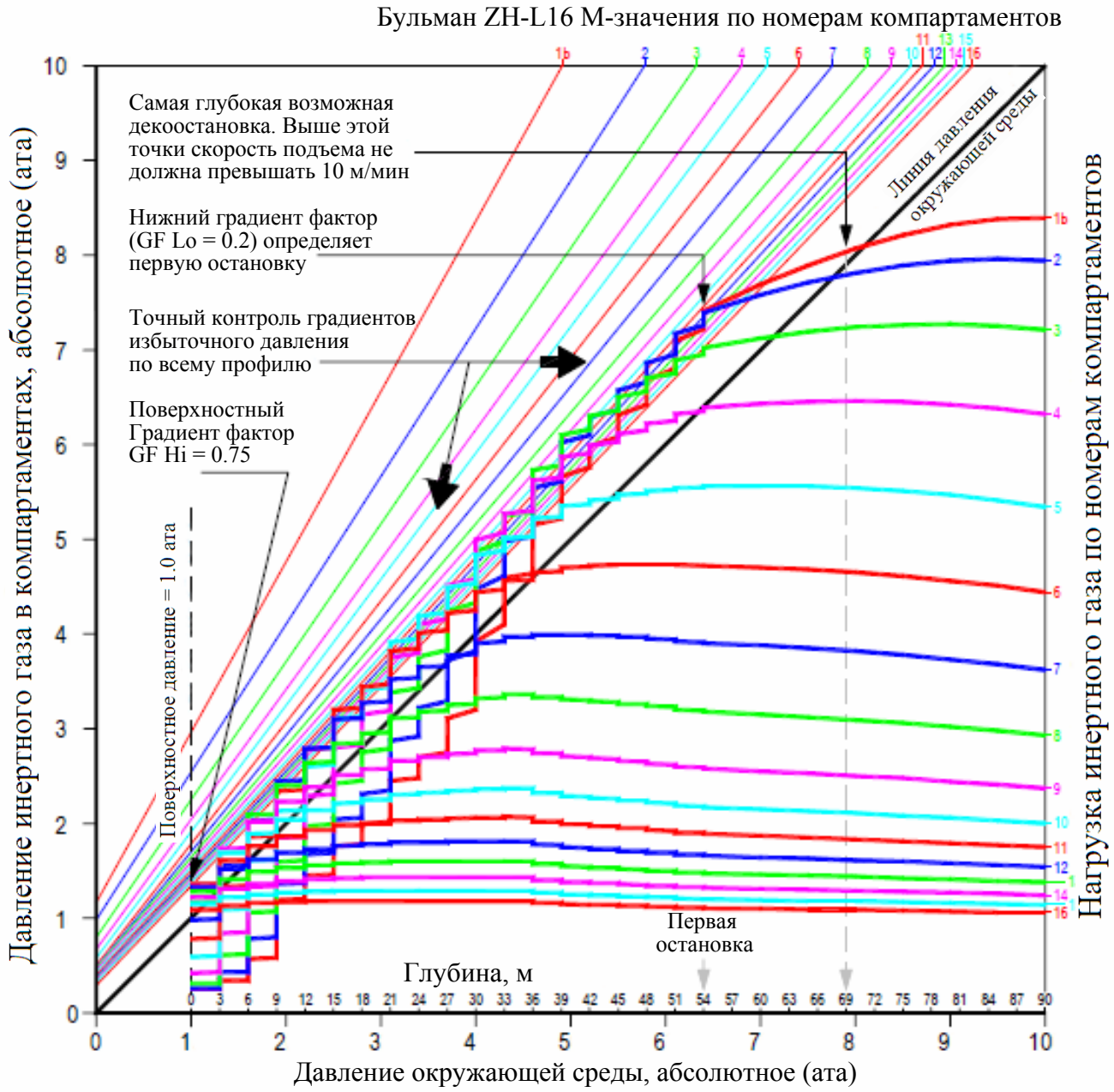
1. 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
2. Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
3. Conservatism factor is minimal (15%).
4. Ascent rate is 10 msw/min.
5. Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
6. Run times are leaving the stop.
7. Deep stops result in higher gas loadings in slower compartments at shallow stops.

Decompression Table

Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
60	26	27	35	12	57		
45	29	24	37	9	66		
39	31	21	40	6	81		
33	32	18	44	3	109		
30	33	15	49	0	110		

Рисунок 3

График давления: Полный профиль погружения (Использование Градиент факторов для контроля всего профиля)



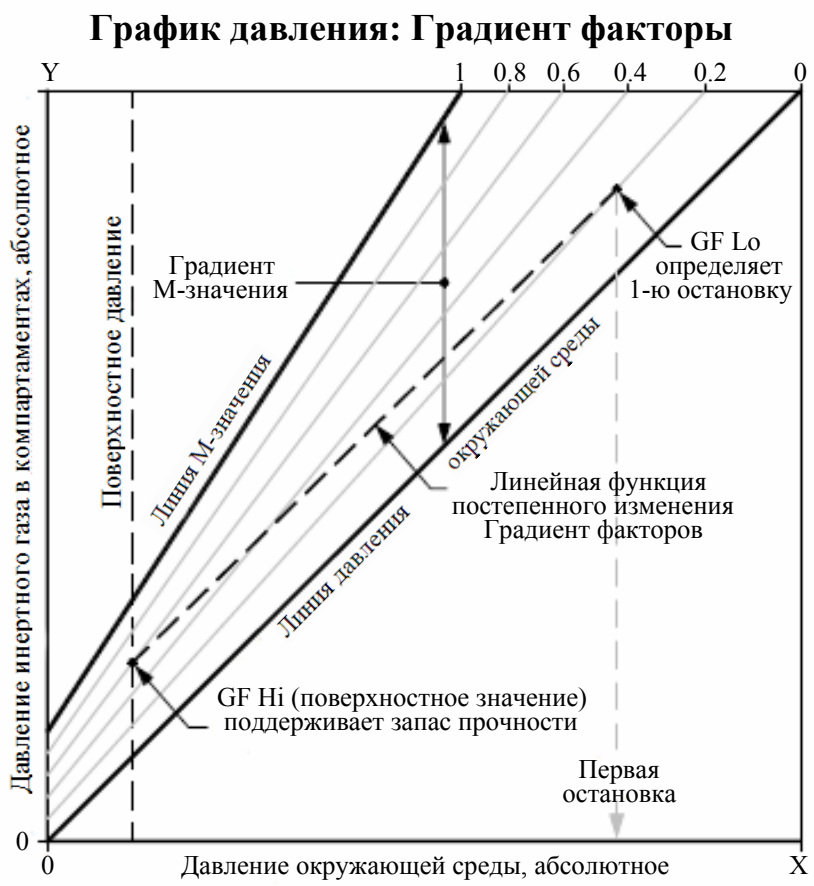
Notes:

1. 13/50 Trimix dive to 90 msw (293 fsw) for 20 minutes bottom time.
2. Deco mixes: Nitrox 36% at 33 msw, Nitrox 50% at 21 msw, and Nitrox 80% at 9 msw.
3. Conservatism is by gradient factors.
4. Ascent rate is 10 msw/min.
5. Inert gas loadings are shown leaving the bottom at 20 minutes run time.
6. Run times are leaving the stop.
7. Proximity of gas loadings to M-values is controlled by gradient factors.

Decompression Table

Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)	Stop (msw)	Run (min)
54	24	39	30	24	40	9	71
51	25	36	33	21	44	6	87
48	26	33	34	18	47	3	119
45	27	30	36	15	53	0	120
42	28	27	38	12	61		

Рисунок 4



Градиент фактор – это десятичная дробь (или процент) от градиента М-значения.

Градиент факторы (GF) находятся в диапазоне от 0 до 1, $0 \le GF \le 1$.

Градиент фактор = 0 представляет линию давления окружающей среды.

Градиент фактор = 1 представляет линию М-значения.

Градиент факторы изменяют консерватизм в зоне декомпрессии в пределах исходных уравнений М-значений.

Самое низкое значение Градиент фактора (GF Lo) определяет глубину первой остановки. Используется для создания глубоких остановок на глубине "самой глубокой возможной декоостановки".

Уравнения М-значений изменены для использования с Градиент факторами (GF)

Уравнения Воркмана:

$M = Depth*(\Delta M*GF - GF+1) + (Psb+GF*(M_o - Psb))$

Tol. $Depth = [P - (Psb+GF*(M_o - Psb))] / (\Delta M*GF - GF+1)$

Уравнения Бульмана:

$P_{t.tol.}i.g. = P_{amb.}*(GF/b - GF+1) + GF*a$

$P_{amb.tol.} = (P_{t.}i.g. - GF*a) / (GF/b - GF+1)$

Градиент факторы могут быть применены вручную для каждой остановки или в автоматическом режиме. Простая линейная функция дает возможность постепенно изменять Градиент фактор от GF Lo до GF Hi:

$$GF\ slope = \frac{GF\ Hi - GF\ Lo}{Final\ Stop\ Depth - First\ Stop\ Depth}$$

$$GF = GF\ slope * Current\ Stop\ Depth + GF\ Hi$$

Преимущества метода Градиент фактора для консерватизма

- Используется для создания глубоких остановок на глубине "самой глубокой возможной декоостановки".
- Декомпрессионные остановки, включая глубокие остановки, будут всегда в зоне декомпрессии.
- Позволяет точный контроль градиентов избыточного давления, включая постепенное изменение градиентов от первой остановки до поверхности.
- Незначительные изменения в привычной декомпрессионной модели Холдейна – легко понять и применить.
- Гибкость – Градиент факторы могут быть применимы и к индивидуальной физиологии, и к различным типам профилей погружения.