Игнорирование гелиевого штрафа

В качестве предисловия к этой статье команда Shearwater приводит высказывание д-ра Саймона Митчелла: "Очевидный вопрос заключается в том, можем ли мы при расчетах декомпрессии в качестве дилюента задавать воздух, тогда как на самом деле во время погружения мы используем тримикс. Хотя не существует никаких доказательств, что к гелию и азоту надо относиться по-разному, существует распространенное мнение о том, что при использовании гелия необходима более длительная декомпрессия для достижения приемлемого уровня риска. К сожалению, исследования не дают четкого ответа на этот вопрос".

За последние два года наше понимание декомпрессионной науки претерпело существенные изменения благодаря исследованиям физиолога д-ра Дэвида Дулетта и команды пловцов-подводников из экспериментального подразделения ВМФ США (NEDU). В мае 2015 года они опубликовали отчет о том, что **декомпрессия во время погружений типа "морковка" с использованием тримикса ($He-N_2-O_2$) не является более эффективной, чем при использовании гелиокса ($He-O_2$).** Этот отчет опровергает распространенное мнение о необходимости увеличения длительности декомпрессии при выполнении погружений с гелиевыми смесями, которое сохранялось около 80 лет, с тех пор как NEDU разработало первые рабочие таблицы для гелиокса.

В отчете сказано, что требования к декомпрессии во время погружений типа "морковка" зависят исключительно от времени, глубины и уровня кислорода (PO_2) в течение погружения, и не зависят от соотношения гелия и азота в дыхательной смеси. Другими словами, так называемый "гелиевый штраф" (т.е. дополнительные остановки и дополнительное время декомпрессии, необходимые при дыхании гелиевыми смесями во время погружений типа "морковка") не существует. [1]

Вывод: Практически все существующие таблицы, дайвкомпьютеры и программы расчета декомпрессии, используемые техническими дайверами сегодня, в частности, алгоритм Бульмана ZH-L16, который устанавливает период полунасыщения азота в 2.65 раза больше, чем у гелия, завышают время декомпрессии. И чем выше доля гелия в смеси, тем больше будет завышено время декомпрессии.



Существует проблема, которая заключается в том, что хотя "гелиевый штраф" и является фиктивным, "штраф за глубину" таким не является, так как большинство алгоритмов увеличивают график декомпрессии, из-за рисков возникающих при увеличении глубины и / или длительности погружения. Однако не существует надежного способа, чтобы определить какой график можно уменьшить и на сколько.

---

[1] Напротив, было доказано, что во время погружений с использованием гелия декомпрессия занимает меньше времени, чем при использовании найтрокса. Это происходит потому, что азоту требуется больше времени на рассыщение в самых медленных компартаментах, которые контролируют декомпрессию.

Как мы здесь оказались?

Дополнительное время декомпрессии, рассчитываемое различными алгоритмам при дыхании гелиевыми смесями, является следствием распространенного мнения, что гелий (который легче воздуха) поглощается тканями тела быстрее, чем азот (алгоритм Бульмана предполагает, что в 2.65 раза быстрее). В результате, существующие алгоритмы предписывают более глубокую первую остановку (чтобы очистить от гелия перенасыщенные быстрые компартаменты, такие как головной или спинной мозг), что приводит к дальнейшему насыщению медленных компартаментов и, следовательно, к увеличению общего времени декомпрессии.

Тем не менее, существуют некоторые признаки того, что "гелиевый штраф" является фиктивным. В течение последних двух десятилетий GUE-дайверы совершили ряд уникальных длительных пещерных погружений в Вакула-Спрингс (Флорида) в рамках проекта Вудвильской Карстовой Равнины (WKPP). Генеральный директор и основатель WKPP Джарод Яблонски отметил, что они обнаружили, что их декомпрессия была в основном независима от используемой фракции гелия. Другие технические дайверы также заметили явное несоответствие; некоторые их них обманывали свои дайвкомпьютеры, вводя более низкую фракцию гелия, чем та, которой они реально дышали, чтобы сократить время декомпрессии. Заметим, что применять такой метод не рекомендуется по причинам указанным выше.

Но реальным ключом к разгадке послужили исследования на животных, которые д-р Дулетт, спелеолог и член WKPP, проводил в начале 2000-х годов в Университете Аделаиды, до своего перехода в NEDU. В своей итоговой работе "Изменение кровотока не выявляет различий между кинетикой азота и гелия в головном мозге или в *скелетном чуде* овцы", которая была опубликована только в декабре 2014 года, группа исследователей обосновала, что не существует никаких различий в кинетике азота и гелия (то есть в поглощении и в выведении) в рамках изученных диапазонов. Заметим, что опечатка в названии, "скелетное чудо" вместо "скелетные мышцы", к большому огорчению авторов была обнаружена только после публикации работы. В этой работе был сделан вывод о том, что нецелесообразно назначать различные временные константы для азота и гелия во всех компартаментах, используемых в алгоритме декомпрессии, кроме самых медленных.

Исследования гелия

В последние годы ВМФ Канады начал программу исследований тримикса (частично из-за увеличения стоимости гелия) и предложил ВМФ США присоединиться к ней. Для проведения погружений с газовыми смесями в ВМФ США применяются ребризеры (так как на открытом цикле в ВМФ такие погружения не проводятся), а в качестве дилюента всегда используется гелиокс.

Д-р Дулетт и его коллеги, д-р Уэйн Герт (руководитель отдела декомпрессии NEDU) и Кейт Голт, провели исследования, целью которых было определить: позволяет ли тримикс значительно сократить время декомпрессии по сравнению с гелиоксом. [2]

---

[2] Заметим, что в большинстве случаев в ребризерном дайвинге гелиокс обладает рядом преимуществом перед тримиксом, так как имеет нулевой наркоз и более низкую плотность (и соответственно меньшую работу дыхания), а охлаждающий эффект гелия не являются проблемой в ребризерном дайвинге. Однако тримикс имеет одно важное достоинство: он компенсирует HPNS (нервный синдром высокого давления) во время очень глубоких погружений (глубже 150 метров).

Результаты немногочисленных экспериментов, проведенных над дайверами, которые погружались с найтроксом и гелиоксом на одну и ту же глубину, противоречивы и не предоставляют убедительных доказательств различий в декомпрессионных требованиях. Были проведены и другие исследования тримикса, но ни одно из них не ставило своей целью продемонстрировать реальную разницу в эффективности между тримиксом и гелиоксом.

Д-р Дулетт и его команда, используя линейно-экспоненциальную мультигазовую вероятностную модель декомпрессии (LEM), разработанную NEDU для оценки риска декомпрессионной болезни (ДКБ), выбрали следующий профиль погружения: 60 метров глубины и 40 минут донного времени. Такой профиль обеспечивает наибольшие отличия в предполагаемой вероятности риска ДКБ между тримиксом и гелиоксом среди ряда других профилей, которые удовлетворяют как условиям эксперимента, так и оперативной целесообразности, т.е. находятся в диапазонах 45…90 метров глубины и 20…60 минут донного времени. Эксперимент проводился в исследовательском центре OSF NEDU.

Каждый дайвер-доброволец, участвовавший в эксперименте, был оснащен ребризером ВМФ МК-16 и полнолицевой маской. В качестве дилюента использовался либо тримикс 12/44 (12% кислорода, 44% гелия, 44% азота) или гелиокс 12/88 (12% кислорода, 88% гелия). Дайверы погружались в воду в специальной камере, подвергаясь воздействию давления эквивалентного 60 метрам морской воды, и выполняли 40 минутный цикл упражнений на специальном подводном тренажере.

По истечении 40 минут, дайверы приступали к 119 минутной декомпрессии при постоянном PO_2 по графику для тримикса (смотрите таблицу), который был не только на 15 минут короче, чем соответствующий график для гелиокса, но и позволял выполнить первую декоостановку на 21 метровой глубине, по сравнению с 27 метровой глубиной для гелиокса. После всплытия дайверы обследовались на наличие признаков и симптомов декомпрессионной болезни (ДКБ).

Таблица 1. Сравнение графиков декомпрессии для гелиокса* и тримикса.

Глубина (метры)	Донное время	Остановки (метры, минуты)								Всего (мин)	$Р_{ДКБ}$(%)**	
		27	24	21	18	15	12	9	6		Гелиокс	Тримикс
60	40	5	3	3	2	3	12	11	95	134	2.14	
60	40			4	2	2	6	16	89	119	5.56	2.14

* График для гелиокса (выделен серым цветом) – приведен только для сравнения и не использовался в данном эксперименте.
** LEM-he8n25 – расчетная $Р_{ДКБ}$ (оценка риска вероятности ДКБ) при скорости спуска 12 м/мин для указанных газовых смесей.

Согласно линейно-экспоненциальной модели декомпрессии (LEM) и связанной с ней базой данных *he8n25*, которая содержит информацию о более чем четырех тысячах погружений на воздухе, найтроксе, тримиксе и гелиоксе, дайверы с тримиксом имеют 2.14% вероятность риска ДКБ, в то время как дайверы с гелиоксом имеют 5.65% вероятность риска ДКБ (более чем в два раза выше). Таким образом, текущая модель декомпрессии ВМФ США считает, что для погружений типа "морковка" декомпрессия на тримиксе является более "эффективной", чем декомпрессия на гелиоксе. Поэтому в своих исследованиях, д-р Дулетт и его команда хотели проверить: действительно ли погружения с гелиоксом имеют более высокий уровень риска ДКБ по сравнению с тримиксными погружениями.

Результаты? В течение примерно десяти недель 32 добровольца совершили 50 погружений с гелиоксом без инцидентов и 46 погружений с тримиксом с двумя зафиксированными случаями ДКБ, после чего ученые остановили эксперимент. Статистически это означает, что **декомпрессия с тримиксом не является более эффективной, чем с гелиоксом.** Это также означает, что существующие алгоритмы, включая алгоритм ВМФ США, нуждаются в пересмотре.

Согласно д-ру Дулетту, несмотря на то, что тестировался только один профиль (частично из-за больших издержек), маловероятно, что тестирование других профилей в соответствующих диапазонах дало бы иные результаты, учитывая принцип действия алгоритма декомпрессии. Полученные результаты также касаются и дайвинга на открытом цикле.

В настоящий момент NEDU работает над пересмотром алгоритма декомпрессии ВМФ США, чтобы учесть результаты новых исследований. Это, скорее всего, вызовет корректировку модели полунасыщения для азота и гелия в медленных компартаментов (от 100 до 200 минут и более). По мнению д-ра Дулетта, это будет медленный процесс. "Вся декомпрессионная наука похожа на это. Как видно по этому случаю, очень редко выпадает шанс самому быстро все исправить. Потребовалось много времени, чтобы газовые концепции Бульмана были исправлены", – сказал он.

Итак, что это значит для технических дайверов?

По большому счету это означает, что технические дайверы, вероятно начнут использовать гелиокс в качестве предпочтительного дилюента для погружений с ребризером. Для глубоких погружений на открытом цикле, скорее всего по прежнему будет использоваться тримикс, из-за высокой стоимости гелия. Интересно, что подобную ситуацию предсказал наделенный даром предвидения исследователь д-р Билл Стоун в своей статье "Случай с гелиоксом: вопросы наркоза и экономики", которая была опубликована в январе 1992 года.

"В целом, – писал д-р Стоун, – в дискуссиях, что лучше использовать, гелиокс или тримикс, основным вопросом в настоящее время является компромисс затрат, из-за неэффективности открытого цикла на глубине. В конечном счете, когда ребризерные технологии станут широко доступными, дебаты завершатся и гелиокс станет предпочтительным донным газом во время глубоких погружений" [3]. Это было сказано задолго до того, как обнаружилось, что гелиевого штрафа не существует. В то время стоимость гелия составляла около 0.008 $/л, по сравнению с 0.03…0.08 $/л на сегодняшний день (в зависимости от региона).

Разумеется, более актуальным является вопрос: "Какой алгоритм будут использовать технари для расчета декомпрессии на гелиоксе?" Текущие таблицы Mk-16 MOD 1, которые опубликованы в руководстве по подводному плаванию ВМФ США – это одна из возможностей. Но, как отмечалось выше, эта версия таблиц содержит гелиевый штраф. Таким образом, технарям придется ждать, пока NEDU или другие подобные организации, например университет Дьюка, опубликуют исправленный алгоритм, а затем ждать, когда производители дайвкомпьютеров смогут реализовать его.

К сожалению, это не произойдет в ближайшее время. "Из-за циклов финансирования, это может занять от двух до трех лет", – сказал д-р Дулетт.

---

[3] Команда д-ра Стоуна совершила серию погружений на открытом цикле с использованием гелиокса в пещерах Вакула-Спрингс (Флорида) в 1987 году.