

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| торые механизмы<br>ительном пребы- | 65  |
| СКАЯ Н. С. Азо-                    | 72  |
| х гипербарии                       |     |
| НОВСКАЯ Н. С.                      | 76  |
| еские показатели                   |     |
| А Т. И., ГАНЕН-                    | 82  |
| пособности аква-                   |     |
| в дыхательной                      |     |
| еристика сердеч-                   | 89  |
| ической болезнью                   |     |
| А Т. И., НЕУСТ-                    | 92  |
| ическая реактив-                   |     |
| й загрязненности                   |     |
| ЕВ В. Ф. Состоя-                   | 97  |
| го пребывания в                    |     |
| онального психо-                   | 102 |
| А. А., ПЕРФИ-                      | 108 |
| лородной инток-                    |     |
| КОЗЫРО В. И.                       | 115 |
| табильность мем-                   |     |
| ГУСЬКОВ Е. П.                      | 119 |
| на гипероксиче-                    |     |
| эффекта гиперба-                   | 123 |

УДК 612—073.96:008

И. П. Полещук, А. М. Генин, Р. Д. Унку,  
А. Е. Михненко, В. Н. Семенцов, А. В. Суворов

### Функциональное состояние некоторых физиологических систем организма человека при дыхании неона-кислородной смесью на глубинах до 400 метров

*Исследовали влияние высокой плотности гипербарической неона-кислородной смеси при давлении до 41 ата (4,1 МПа) на основные физиологические функции организма человека. Выявлены характерные изменения кардио-респираторной системы и параметров тканевого дыхания. Показаны изменения физической работоспособности. Установлено, что пребывание в газовой среде повышенных давления и плотности сопровождается развитием ряда компенсаторно-приспособительных реакций, дающих возможность выполнять физическую работу средней тяжести.*

#### Введение

Неон в качестве газа-разбавителя дыхательной среды во время погружений на большие глубины имеет положительные свойства: оказывает слабый наркотический эффект, вызывает несущественное искажение речи, имеет низкую теплопроводность. Одним из главных недостатков неона, лимитирующих его применение, является высокая плотность, отрицательное действие которой может иметь решающее значение при большом давлении.

Цели работы — определение возможности кратковременного и продолжительного пребывания в газовой среде, плотность которой повышалась от 9,07 до 32,1 кг/м<sup>3</sup>; оценка физической работоспособности человека в неона-кислородной смеси при давлении до 41 ата (4,1 МПа); изучение динамики состава альвеолярного газа, газов крови при физических нагрузках.

#### Методика

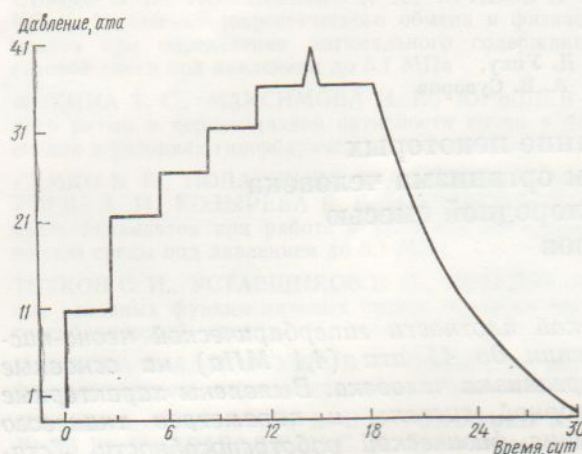
Исследования проводили в гипербарическом комплексе обитаемых гипербарических систем Южного отделения Института океанологии им. П. П. Ширшова АН СССР. В трех экспериментах (Н1-200, Н2-250, Н3-400) участвовало шесть добровольцев мужского пола. Погружение включало день компрессии, пребывание под давлением, день перехода из неона-кислородной в неона-гелио-кислородную смесь, пребывание в этой среде, декомпрессию до нормального барометрического давления. В каждом эксперименте экипаж состоял из двух человек.

В эксперименте Н1-200 компрессия была проведена вначале смесью неона с кислородом (4,5 % O<sub>2</sub>) до давления 3 ата (0,3 МПа), а затем — неоном (100 % Ne) до давления 21 ата (2,1 МПа) с оста-

© И. П. ПОЛЕЩУК, А. М. ГЕНИН, Р. Д. УНКУ, А. Е. МИХНЕНКО,  
В. Н. СЕМЕНЦОВ, А. В. СУВОРОВ, 1991

ISSN 0201-8489. Физiol. журн. 1991. Т. 37, № 4

новками на глубинах 100 и 150 м. В эксперименте Н2-250 компрессия была начата с подачи сжатого воздуха до давления 1,5 ата (0,15 МПа), а затем продолжена подачей чистого неона до давления 26 ата (2,6 МПа). Профиль погружения НЗ-400 представлен на рис. 1. Ночью перед началом компрессии до давления 11 ата (1,1 МПа) обследуемые спали в жилом отсеке под давлением 1,3 ата (0,13 МПа) в среде сжатого воздуха. На следующие сутки компрессия была про-



должена до давления 1,65 ата (0,16 МПа) воз-  
духом и далее чистым не-  
оном с трехдневными ос-  
тановками на глубинах  
100, 200, 250, 300 и 350 м.  
На 3-и сутки пребывания  
под давлением 36 ата  
(3,6 МПа) обследуемые  
совершили экскурсию до  
давления 41 ата (4,1

Рис. 1. Профиль имитированно-  
го водолазного спуска НЗ-400.

МПа), где оставались в течение 120 мин. Средняя скорость компрессии во всех погружениях составляла 0,1 ата/мин (0,01 МПа/мин).

Исследовали функции системы дыхания, кислородный режим кожи и артериализированной капиллярной крови, кардио- и гемодинамику, физическую работоспособность обследуемых.

При изучении респираторной системы определяли значения некоторых показателей, характеризующих механику дыхания, вентиляцию и газообмен, газовый состав и кислотно-основное состояние (КОС) крови. При исследовании вентиляции и газообмена определяли: частоту дыхания (ЧД), дыхательный объем (ДО, л) и относительное содержание ( $\%$ )  $O_2$  и  $CO_2$  во вдыхаемом ( $V_{iO_2}$  и  $V_{iCO_2}$ ), выдыхаемом ( $V_{eO_2}$  и  $V_{eCO_2}$ ) и альвеолярном ( $V_{AO_2}$  и  $V_{ACO_2}$ ) газе. Рассчитывали минутную вентиляцию легких (МВЛ, л/мин), альвеолярную вентиляцию (АВ, л/мин), потребление  $O_2$  ( $PO_2$ , л/мин), выделение  $CO_2$  ( $BCO_2$ , л/мин), дыхательный коэффициент (R), использование кислорода (ИК, мл), вентиляторный эквивалент (ВЭ), отношение АВ к МВЛ ( $\%$ ), а также парциальное давление ( $O_2$  и  $CO_2$  (мм рт. ст.) во вдыхаемом ( $p_{iO_2}$  и  $p_{iCO_2}$ ) и альвеолярном ( $p_{AO_2}$  и  $p_{ACO_2}$ ) газе. При оценке легочного объема и резервных возможностей вентиляторного аппарата определяли жизненную емкость легких (ЖЕЛ, мл), резервный объем и максимальную скорость выдоха ( $PO$  и  $v_{max}$ , л/с) и максимальную произвольную вентиляцию легких (МПВЛ, л/мин), измеряемую за 15 с.

Вентиляцию легких измеряли с помощью спаренной трубки Флейша, что позволяло на 30 % уменьшить сопротивление на выходе. Содержание  $O_2$  и  $CO_2$  во вдыхаемом и альвеолярном газе определяли на газоанализаторах ОМ-11 и 1В-2, а также анализаторе  $O_2$  ОМ-14 марки «Вескат», после редуцирования газа до нормального давления. На основании прямых измерений рН и напряжения  $O_2$  и  $CO_2$  в артериализированной крови ( $p_{aO_2}$  и  $p_{aCO_2}$ , мм рт. ст.) с помощью «Цифрового анализатора газов крови и рН «1L-21» рассчитывали значения параметров, характеризующих КОС крови: буферные основания (ВВ), стандартные бикарбонаты (В) и истинные бикарбонаты (АВ), избыток оснований (ВЕ) и общее содержание  $CO_2$  (Т  $CO_2$ ). Динамику  $pO_2$  в коже левого предплечья регистрировали с помощью полярографического метода прибором «Оксиметр-М». Определяли исходное значение  $pO_2$  в капиллярной крови и его изменения во время физической нагрузки

и при восстанов-  
лительно-сосудистой  
диагностикой П  
фирмы «NICHON»  
проводили синхро-  
дентиях, фонокар-  
Рассчитывали пр  
методике Blumbe  
Для оценки фун  
физической работ  
ударный объем с  
ем кровообращен  
ферическое сопр  
и показатель, к  
кислороду (ABP-  
отражающие кро  
Нагрузочное  
стотой педалиров  
нагрузок: 10-мин  
(25—50 %  $PO_2$  м  
полняли две наг  
тервалом отдыха  
отдыха до дости  
5 мин).

## Результаты и их

При повышении  
нию с воздухом  
среде наблюдало  
62 %. Парциальн  
12,6—16,5 мм рт  
сопровождаящая  
проводилось из  
доза, о чем сви  
У всех акванавто

(до 50 %) сни  
за 1 с (ФЖЕЛ<sub>1</sub>)  
17-кратном увели

Во время 3-  
300 м и часово  
 $PO_2$  по сравнени  
ное давление СС  
плотности выдых  
пребывания в не  
бине» отмечался

Таким образ  
сти ВЛ оказали  
плотности газова  
чению возможно

При кратков  
21 и 26 ата (2,1  
по своей направ  
обращения. Так,  
ванавтов, у кото  
точно высоким —  
различий не выяв  
от динамики ЧС  
26 ата (2,6 МПа)  
казателей, харак  
ABP- $O_2$ . Так, АВ

ISSN 0201-8489. Физи

2-250 компрессия  
вления 1,5 ата  
она до давления  
ставлен на рис. 1.  
га (1,1 МПа) об-  
ата (0,13 МПа)  
рессия была про-  
до давления  
(0,16 МПа) воз-  
далее чистым не-  
трехдневными ос-  
ми на глубинах  
250, 300 и 350 м.  
сутки пребывания  
авлением 36 ата  
Па) обследуемые  
или экскурсию до  
41 ата (4,1

Профиль имитированно-  
пазного спуска НЗ-400.

корость компрессии  
Па/мин).

одный режим кожи  
и гемодинамику,

али значения неко-  
хания, вентиляцию  
состояние (КОС)  
определяли: часто-  
относительное со-  
CO<sub>2</sub>), выдыхаемом  
е. Рассчитывали ми-  
лярную вентиляцию  
еление CO<sub>2</sub> (VCO<sub>2</sub>),  
ние кислорода (ИК,  
AB к МВЛ (%), а  
во вдыхаемом (P<sub>i</sub>O<sub>2</sub>) и  
енке легочного объе-  
парата определяли  
объем и максималь-  
льную произвольную  
15 с.

енной трубки Флей-  
ение на выходе. Со-  
ом газе определяли  
лизаторе O<sub>2</sub> OM-14  
рмального давления.  
ия O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub> в арте-  
с помощью «Цифро-  
считывали значения  
ные основания (ВВ),  
онаты (AB), избыток  
. Динамику P<sub>O<sub>2</sub></sub> в ко-  
полярного графического  
ходное значение P<sub>O<sub>2</sub></sub>  
физической нагрузки

журн. 1991. Т. 37, № 4

и при восстановлении. Для регистрации и расчета показателей сер-  
дечно-сосудистой системы применяли полиграф «Мингограф-7», поликар-  
диоанализатор ПА-09, магнитный регистратор биопотенциалов «SDR»  
фирмы «NICHON» и ЭВМ М-400. Для оценки сократимости миокарда  
проводили синхронную регистрацию электрокардиограммы в 11 отве-  
дениях, фонокардиограмму и дифференциальную реограмму туловища.  
Рассчитывали продолжительность фаз систолы левого желудочка по  
методике Blumberg [4] в модификации Holldas [9] и Karpman [10].  
Для оценки функционального состояния гемодинамики в покое и при  
физической работе определяли: частоту сердечных сокращений (ЧСС),  
ударный объем сердца и ударный индекс (УОС и УИ), минутный объ-  
ем кровообращения и сердечный индекс (МОК и СИ), удельное пери-  
ферическое сопротивление сосудов (УПСС), кислородный пульс (КП)  
и показатель, косвенно отражающий артериовенозную разницу по  
кислороду (ABP-O<sub>2</sub>). Кроме того, рассчитывали некоторые показатели,  
отражающие кровенаполнение, эластичность и тонус легочных сосудов.

Нагрузочное тестирование проводили на велоэргометре ВВ-6 ча-  
стотой педалирования 60—65 мин<sup>-1</sup>. Использовали три модификации  
нагрузок: 10-минутную фиксированную работу средней интенсивности  
(25—50 % PO<sub>2 max</sub>); тест PWC 170 (при этой пробе обследуемые вы-  
полняли две нагрузки по 5 мин каждая, разделенные 3-минутным ин-  
тервалом отдыха); ступенчато возрастающую нагрузку без интервалов  
отдыха до достижения PO<sub>2 max</sub> (продолжительность каждой ступени —  
5 мин).

### Результаты и их обсуждение

При повышении плотности вдыхаемого газа в 14,1 и 17,2 раза по сравне-  
нию с воздухом в обычных условиях у акванавтов в неоно-кислородной  
среде наблюдалось урежение дыхания, увеличение энергозатрат на 19—  
62 %. Парциальное давление CO<sub>2</sub> в альвеолярном газе повышалось на  
12,6—16,5 мм рт. ст. У всех акванавтов отмечалась гиперкапния,  
сопровождавшаяся снижением рН. Абсолютное значение P<sub>a</sub>CO<sub>2</sub> со-  
провождалось изменениями КОС крови по типу респираторного аци-  
доза, о чем свидетельствовало увеличение содержания АВ и Т CO<sub>2</sub>.  
У всех акванавтов в экспериментах Н1-200 и Н2-250 отмечалось резкое  
(до 50 %) снижение V<sub>max</sub> и объема форсированного выхода  
за 1 с (ФЖЕЛ<sub>1</sub>). МВЛ снижалась на 67,7 % (при 14- и на 70,4 % при  
17-кратном увеличении плотности газовой среды).

Во время 3-суточного пребывания на «глубинах» 100, 200, 250,  
300 м и часового — на глубине 400 м у акванавтов увеличивалось  
PO<sub>2</sub> по сравнению с нормальными условиями на 18—85 %. Парциаль-  
ное давление CO<sub>2</sub> в альвеолярном газе, возрастающее с увеличением  
плотности выдыхаемого газа, достигало 52—56 мм рт. ст. На 2-е сутки  
пребывания в неоно-кислородной среде у акванавтов на каждой «глу-  
бине» отмечался выраженный аспираторный ацидоз.

Таким образом, можно констатировать, что резервные возможно-  
сти ВЛ оказались существенно ограниченными в условиях высокой  
плотности газовой среды, что безусловно должно приводить к ограни-  
чению возможностей человека при выполнении физической работы.

При кратковременном пребывании в неоно-кислородной среде при  
21 и 26 ата (2,1 и 2,6 МПа) у акванавтов регистрировали различные  
по своей направленности и силе ответные реакции системы крово-  
обращения. Так, урежение ритма сердца зарегистрировано у тех ак-  
ванавтов, у которых исходное значение этого показателя было доста-  
точно высоким — 76 мин<sup>-1</sup>. В динамике УОС статистически значимых  
различий не выявлено, и тем самым изменения МОК целиком зависели  
от динамики ЧСС. Вместе с тем, при давлении 21 ата (2,1 МПа) и  
26 ата (2,6 МПа) наблюдалось существенное увеличение значений по-  
казателей, характеризующих кардиореспираторную систему, КП и  
ABP-O<sub>2</sub>. Так, ABP-O<sub>2</sub> превышала исходную на 27—107 %.

При ступенчатом повышении давления до 41 ата (4,1 МПа) в эксперименте НЗ-400 наблюдалось и удлинение интервалов R—R, и их укорочение. Синусовый ритм сохранялся в течение всего времени пребывания под давлением. В целом не выявлено каких-либо существенных нарушений биоэлектрической активности миокарда. Изменения амплитуды зубцов R и T, показателя R/T и систолического показателя, по всей вероятности, в большей мере обусловлены изменениями регулирующей функции вегетативной нервной системы, хотя не исключено, что определенную роль могли играть и изменения катехоламинного обмена. Более многообразными во время пребывания в гипербарической среде были изменения показателей фазовой структуры сердечного цикла. Так, отмечалась тенденция к увеличению продолжительности периода напряжения ( $t$ ) с повышением давления окружающей среды и сроков экспозиции. При этом наибольшая его продолжительность зарегистрирована при 41 ата (0,068 с в исходном состоянии до 0,137 с в эксперименте). Значения резервного показателя ( $D/t$ ) при этом же давлении снизились от 8,1—8,6 до 6,7—3,9 ед. Существенные изменения претерпевали также показатели, характеризующие кардиореспираторную систему. Кислородный пульс при давлении 36—41 ата (3,6—4,1 МПа) возрос в среднем на 3,44—3,70 (мл/уд, а ABD-O<sub>2</sub>— на 35—43 %).

С первых суток пребывания акванавтов под повышенным давлением окружающей среды амплитуда систолической волны снижалась в среднем на 0,064 Ом. Значения показателей артериального тонуса повышались от  $55,8 \pm 2,0$  до  $82,0 \% \pm 1,4 \%$ , венозного — от  $49,9 \pm 1,5$  до  $78 \% \pm 2,3 \%$ . Отмечена и некоторая тенденция к повышению тонуса крупных сосудов. С увеличением давления окружающей среды сосудистый тонус повышался. В целом, можно констатировать, что пребывание акванавтов в неона-кислородной среде сопровождалось развитием синдрома смешанной гипертензии малого круга кровообращения.

При выполнении одномоментной нагрузки мощностью 636 кгм/мин в экспериментах Н1-200 и Н2-250 прирост ЧСС в среднем на 10—12 мин<sup>-1</sup> был меньше, чем фоновый. Частота дыхания также была на 2,5—26,4 мин<sup>-1</sup> ниже, чем фоновая. Дыхательный объем возрастал на 0,94—2,27 л, а  $p_A\text{CO}_2$  увеличивалось до 60,1—76,8 мм рт. ст. Потребление кислорода возросло в среднем на 39,4—59,2 %. В эксперименте Н2-250 один акванавт на 4-й минуте работы мощностью 636 кгм/мин отказался от дальнейшего ее выполнения в связи с затруднением дыхания, при этом  $p_A\text{CO}_2$  достигло 76,9 рт. ст. В эксперименте НЗ-400 физическая работа мощностью 636 кгм/мин сопровождалась незначительным снижением, по сравнению с фоном ЧСС на 6—10 мин<sup>-1</sup> при всех значениях плотности. При давлении 11—21 ата (1,1—2,1 МПа) ПК существенно не изменялось и увеличивалось на 170 и 230 мл/мин при давлении 26 и 31 ата (2,6—3,1 МПа) соответственно. При давлении 11 и 21 ата (1,1 и 2,1 МПа) работа мощностью ( $1183 \pm 118$ ) кгм/мин сопровождалась повышением  $\text{PO}_{2\text{max}}$  на 220 и 260 мл/мин (8,3 и 9,8 %). ЧСС была ниже значений, зарегистрированных в контрольных исследованиях, на 16 мин<sup>-1</sup> (9,4 %). Дальнейшее увеличение давления до 26, 31 и 36 ата (2,6; 3,1 и 3,6 МПа) сопровождалось снижением максимальной мощности нагрузки и соответственно уменьшением общего объема работы. При этом при давлении 26—31 ата (2,6—3,1 МПа) работа прекращалась по медицинским показаниям (возникновение единичных экстрасистол, повышение систолического артериального давления до 220 мм рт. ст.) при мощности 940 и 750 кгм/мин соответственно. При выполнении физической работы критической мощности под этим же давлением отмечено уменьшение ВЛ, повышение  $p_A\text{CO}_2$  до 60—73 мм рт. ст., увеличение  $\text{PO}_2$ , по сравнению со значениями в контрольных исследованиях, на 510—850 мл/мин (24,2—60,7 %).

Результаты изучения КОС крови при физической работе позволили подтвердить задержку CO<sub>2</sub> в организме, поскольку  $p_A\text{CO}_2$  до-

стигло 62—64 мм рт. ст. При этом физическая работа была прекращена. При этом уровне  $p_A\text{CO}_2$  крови снизился. В целом, изменения были незначительными, (2,1 МПа) не было. В ранее проведенных исследованиях при давлении 2,1 МПа были получены аналогичные результаты, свидетельствующие о том, что только пребывание в гипербарической среде не вызывает изменений в физическом состоянии человека. В некоторых случаях при длительном пребывании в гипербарической среде.

В связи с этим можно предположить, что длительное пребывание в гипербарической среде не вызывает изменений в физическом состоянии человека. В некоторых случаях при длительном пребывании в гипербарической среде.

которая согласуется с направлением, направленность согласующуюся.

Следует отметить, что при выполнении физической работы при давлении 2,1 МПа были получены аналогичные результаты, свидетельствующие о том, что только пребывание в гипербарической среде не вызывает изменений в физическом состоянии человека. В некоторых случаях при длительном пребывании в гипербарической среде.

стигло 62—64 мм рт. ст. Респираторный ацидоз, возникший после выполнения физической работы, был более выражен, чем в состоянии покоя. При плотности газовой среды 28,6 г/л рН артериализированной крови снизился у двух акванавтов до 7,265 и 7,290 соответственно. В целом, изменения КОС крови во время физической работы были значительными, полной компенсации при давлении свыше 21 ата (2,1 МПа) не наступало.

В ранее проведенных исследованиях при непродолжительном дыхании газовыми смесями плотностью до 25 г/л [15] получены единичные результаты, свидетельствующие о принципиальной возможности не только пребывания в таких условиях, но и кратковременного выполнения физической работы мощностью до 900 кгм/мин. Результаты наших исследований полностью подтвердили это предположение, и мнение некоторых авторов [1, 11] о том, что плотность не будет лимитировать пребывание человека на глубинах 1500—2000 м в гелио-кислородной среде.

В связи с тем, что в литературе нет сведений о влиянии длительного пребывания в газовой среде плотностью, превышающей 20 г/л, представленная работа впервые позволила показать возможность адаптации кардиореспираторной системы к столь тяжелым условиям. Возросшее сопротивление газовым потокам в дыхательных путях вызывало соответствующее снижение  $\dot{V}_{\max}$ , имеющее следующую зависимость от плотности газовой среды:

$$\dot{V}_{\max} = [7,46 * p^{\wedge}(-0,358)] \text{ л/с}, \quad (1)$$

которая согласуется с данными некоторых авторов [1, 2]. Аналогичную направленность изменений имели ФЖЕЛ<sub>1</sub> и индекс Тиффно, и МВЛ, согласующуюся с ранее полученными данными [12, 15, 16, 22]:

$$\text{ФЖЕЛ}_1 = [4,21 * p^{\wedge}(-0,238)] \text{ л}, \quad (2)$$

$$\text{ИТ} = [76,4 * p^{\wedge}(-9,203)] \%, \quad (3)$$

$$\text{МВЛ} = [159,4 * p^{\wedge}(-0,15)] \text{ л/мин}. \quad (4)$$

Следует отметить, что в первые сутки после компрессии  $\dot{V}_{\max}$  МВЛ, ФЖЕЛ<sub>1</sub> и ИТ были снижены на 27, 12, 9 и 9 % соответственно по сравнению со средними значениями этих показателей после 9-суточного пребывания в гипербарических условиях. В последующий период наблюдалось некоторое восстановление значений этих параметров. Такой характер изменений вентилаторной функции легких отмечался и ранее, но на меньших «глубинах» [14, 17]. ЖЕЛ, так же, как и в других исследованиях [2, 14], не претерпевала существенных изменений, хотя в первые сутки после компрессии наблюдалось ее снижение на 14,3 %. В начальный период пребывания в гипербарических условиях выявлено увеличение РО на 330—1 020 мл, которое затем возросло до 3 280 мл, что, очевидно, способствует преодолению резистивного сопротивления на выдохе и препятствует экспираторному коллапсу мелких бронхов [14]. Не противоречит литературным данным [5] и некоторое увеличение ВЛ в покое, обеспечиваемое более редким и глубоким дыханием [3, 13]. Рост потребления кислорода в покое от 0,3 до 0,5 л/мин по мере увеличения плотности газовой среды до 32 кг/м<sup>3</sup> объясняется необходимостью выполнения дополнительной работы на преодоление повышенного сопротивления дыханию [6, 13, 17]. Кроме этого, на ПО<sub>2</sub> оказывают влияние физические свойства газовой среды, в частности, ее теплопроводность. В первые сутки после окончания компрессии в состоянии относительного покоя  $p_2\text{CO}_2$  повышалось на 12,6—16,5 мм рт. ст., на 2-е сутки — на 10,0—13,6 мм рт. ст., на 3—9-е сутки пребывания в гиперических условиях — на  $(11,4 \pm 1,1)$  мм рт. ст. Повышение  $p_2\text{CO}_2$  отмечено также и другими исследователями [8, 18], но установить четкую зависимость  $p_2\text{CO}_2$  от плотности газовой среды не удалось. Разность между  $p_2\text{CO}_2$  и  $p_2\text{CO}_2$  была невелика, хотя и возраста-

ла на 2—3 мм рт. ст. Повышение  $p_a\text{CO}_2$  сопровождалось снижением рН до 7,312, т. е. респираторный ацидоз был частично компенсирован метаболическим алкалозом. Одной из причин респираторного ацидоза могло стать повышение  $p_i\text{O}_2$ . Установлено, что нормоксический уровень, начиная с десятикратного увеличения плотности газовой среды, не обеспечивает поддержания исходных значений  $p_a\text{O}_2$  и  $\text{SO}_2$ , хотя он может быть расценен как допустимый для состояния покоя [20]. С повышением плотности газовой среды от 12 до 28 кг/м<sup>3</sup>  $p_i\text{O}_2$  постепенно увеличивали от 170 до 220 мм рт. ст., что, по видимому, оправдано, так как такое давление обеспечивало достаточное поступление  $\text{O}_2$  в кровь, не вызывая дополнительных изменений КОС крови.

Большой интерес представляют результаты о состоянии кардиореспираторной системы во время физической работы в гипербарических условиях. В первые сутки после компрессии в экспериментах Н1-200 и Н2-250 на «глубинах» 200—250 м акванавты с трудом справились с физической нагрузкой мощностью 636 кгм/мин. В эксперименте Н3-400 на «глубинах» 100—350 м нагрузка аналогичной мощности, преодолеваемая на 2-е сутки после компрессии, сопровождалась менее выраженными изменениями кардиореспираторной системы. На 3—12-е сутки пребывания под повышенным давлением окружающей среды критическая мощность нагрузки снижалась от 1436 до 790 кгм/мин по мере увеличения плотности от 11,9 до 28,6 кг/м<sup>3</sup>. При этом высокое сопротивление дыханию снижало предельную мощность нагрузки. Кроме того, тренированность акванавтов также определяла максимальное значение физической нагрузки, преодолеваемой ими в неона-кислородной среде. Во время физической работы по преодолению нагрузки мощностью 383—636 кгм/мин в первые сутки после компрессии ВЛ у акванавтов повышалась, приближаясь к уровню МВЛ. На 2-е сутки ВЛ составляла уже 70—80 % уровня, наблюдаемого в первые сутки. По мере увеличения времени пребывания под повышенным давлением наблюдалось последующее снижение ВЛ. Увеличение энергозатрат на физическую работу зависело от плотности газовой среды и времени, прошедшего после окончания компрессии. В первые часы отмечалось повышение  $\text{PO}_2$  на 34—74 % с увеличением экспозиции — в среднем на 14 %. При плотности газовой среды 28,6 кг/м<sup>3</sup>  $\text{PO}_2$  возрастало по сравнению с нормобарическим уровнем на 25—50 %. При меньшей плотности газовой среды прирост  $\text{PO}_2$  был ниже [5, 18]. Альвеолярная вентиляция при физической работе мощностью 50—60 % критической может при этом не снижаться [19], что и подтвердилось в наших исследованиях. Однако АВ не обеспечивала возросший газообмен, в результате чего  $p_a\text{CO}_2$  повышалась в первые сутки после компрессии до 60,1—76,9 мм рт. ст., на 2-е сутки — до 50—60 мм рт. ст. и далее — при длительном пребывании под повышенным давлением — до 52—56 мм рт. ст., что не противоречит данным других авторов [7, 11, 13, 17].

Отмеченные во время субмаксимальных нагрузок изменения КОС крови по типу респираторного ацидоза [18, 20] обусловлены повышением  $p_a\text{CO}_2$  со значительным снижением рН до 7,265—7,290. Компенсации рН не наступало, по-видимому, из-за присоединения явлений метаболического ацидоза [19]. Проведена оценка допустимого значения  $p_i\text{O}_2$  при физической работе в гипербарических условиях. Для состояния относительного покоя было допустимо нормоксическое значение  $p_i\text{O}_2$ , но при физической работе  $p_a\text{O}_2$ , в этом случае снижалось на 13,7—22,0 мм рт. ст., а  $\text{SO}_2$  составляло 83—88 %. По-видимому, при плотности газовой среды 10, 20, 30 кг/м<sup>3</sup> минимальным можно считать значения  $p_i\text{O}_2$ , составляющие 175, 200, 235 мм рт. ст. соответственно, тогда как предшествующие рекомендации предусматривали более высокие значения  $p_i\text{O}_2$  [1, 2, 5, 16] при указанной плотности среды. Выполнение физической работы критической мощности было сопряжено с тем, что ВЛ достигала 99,2 % МВЛ, т. е. дальнейшее увеличение ВЛ было ограничено [11, 18]. Максимальная ВЛ может быть рассчита-

на с помощью при-  
сить определенног  
ся вентиляторным  
на существенный  
максимального з  
 $\text{PO}_{2\text{max}}$  начинало  
ной среды выше  
держке  $\text{CO}_2$  в орг  
газе повышалось

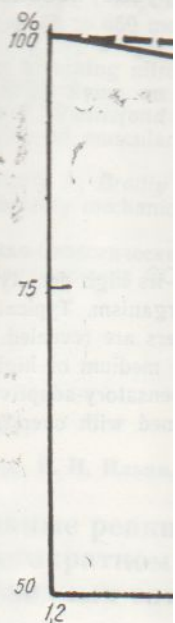


Рис. 2. Изменение относительной критической мощности (2).

$p_a\text{CO}_2$  при физиче  
76,9 мм рт. ст. О  
ВЛ от плотности г  
среды 9 кг/м<sup>3</sup> (1,1  
снизилась на 32—  
нейшем повышени  
ВЛ продолжало с  
пике нагрузки дос  
ного содержания  
высоком уровне. Ч  
барических услови  
поставлении резул  
внешнего дыхания  
снижением  $\text{PO}_{2\text{ma}}$   
(рис. 2; по оси аб  
нат — относительн

Таким образом  
в гипербарически  
кардиореспираторн  
кислорода в поко  
обогащенной кисл  
риовенозная разни  
нутный объем кров  
снижаются паралл

проводилось снижением частично компенсированного респираторного ацидоза и нормоксический уровень газовой среды, не  $p_{A}O_2$  и  $SO_2$ , хотя он могостояния покоя [20]. С по28 кг/м<sup>3</sup>  $p_{i}O_2$  постепенно-видимому, оправдано, так поступление  $O_2$  в кровь, крови.

аты о состоянии кардиор-работы в гипербариче-прессии в экспериментах-кванавты с трудом спра-6 кг/мин. В эксперимен-а аналогичной мощности,и, сопровождалась менее-ной системы. На 3—12-е-нем окружающей средыот 1436 до 790 кг/минкг/м<sup>3</sup>. При этом высокое-ую мощность нагрузки.е определяла максималь-аемой ими в неоне-кисло-т по преодолению на-е сутки после компрес-сь к уровню МВЛ. На 2-е-наблюдаемого в первыеия под повышенным дав-ВЛ. Увеличение энерго-отности газовой среды и-ессии. В первые часы от-тичением экспозиции — в-ты 28,6 кг/м<sup>3</sup>  $PO_2$  возр-нем на 25—50 %. При-был ниже [5, 18]. Аль-те мощностью 50—60 %], что и подтвердилось в-чивала возросший газо-первые сутки после ком-— до 50—60 мм рт. ст.-вышенным давлением —-даным других авторов.

агрузок изменения КОС-обусловлены повыше-7,265—7,290. Компенса-соединения явлений ме-а допустимого значения-условиях. Для состояния-ическое значение  $p_{i}O_2$ ,е снижалось на 13,7—По-видимому, при плот-ным можно считать зна-рт. ст. соответственно,усматривали более вы-ной плотности среды.ощности было сопряже-дальнейшее увеличение- может быть рассчита-

на с помощью приведенной выше зависимости [15]. АВ не могла превы-сить определенного значения и, следовательно, газообмен ограничивал-ся вентиляторными возможностями. Потребление кислорода, несмотря на существенный прирост [17], в большинстве случаев не могло достичь максимального значения [14]. У хорошо подготовленных акванавтов  $PO_{2max}$  начинало достоверно снижаться при плотности неоне-кислород-ной среды свыше 20 кг/м<sup>3</sup>. Недостаточный прирост АВ приводил к за-держке  $CO_2$  в организме. Парциальное давление  $CO_2$  в альвеолярном газе повышалось до 60—70 мм рт. ст. [11, 19]. По нашим результатам,

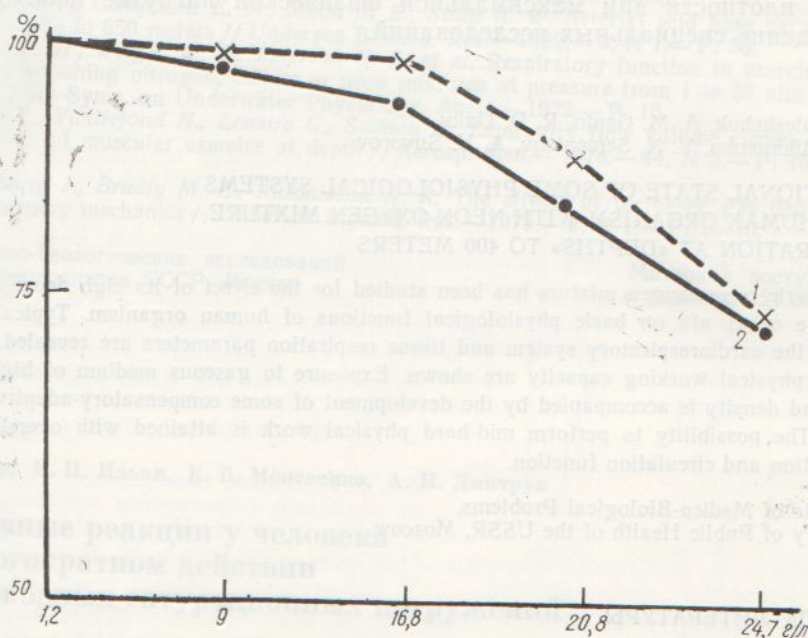


Рис. 2. Изменение относительного значения (%) минутного объема крови (1) на уровне критической мощности физической нагрузки и максимального потребления кислорода (2).

$p_{A}CO_2$  при физической работе критической мощности достигало 59,2—76,9 мм рт. ст. Особого внимания заслуживает зависимость  $p_{A}CO_2$  и ВЛ от плотности газовой среды. Уже при плотности неоне-кислородной среды 9 кг/м<sup>3</sup> (1,1 МПа) при максимальной физической нагрузке ВЛ снизилась на 32—45 %, а  $p_{A}CO_2$  достигло 60—63 мм рт. ст. При дальнейшем повышении давления и плотности неоне-кислородной среды ВЛ продолжало снижаться по экспоненциальной кривой, а  $p_{A}CO_2$  на пике нагрузки достигало 70—73 мм рт. ст. При этом за счет повышенного содержания кислорода в газовой среде  $p_{A}O_2$  поддерживалось на высоком уровне. ЧСС и МОК на пике максимальной нагрузки в гипербарических условиях были меньше, чем в нормобарических. При сопоставлении результатов о характере изменений различных параметров внешнего дыхания и кровообращения отмечается тесная связь между снижением  $PO_{2max}$  и МОК и ростом плотности газовой среды (рис. 2: по оси абсцисс — плотность газовой среды, г/л; по оси ординат — относительные значения показателей, % исходных значений).

Таким образом, повышение плотности дыхательной газовой среды в гипербарических условиях создает дополнительную нагрузку на кардиореспираторную систему, приводящую к увеличению потребления кислорода в покое и при физической работе. При этом в среде, обогащенной кислородом (0,23—0,3 ата, или 0,023—0,03 МПа), артериовенозная разница по кислороду практически не изменяется, а минутный объем крови и частота сердечных сокращений на пике нагрузки снижаются параллельно уменьшению плотности дыхательной смеси.

Можно предполагать, что одним из возможных механизмов такого снижения МОК является повышенное сопротивление дыханию, особенно выраженное на выходе за счет динамического сжатия мелких бронхов. Высокое сопротивление дыханию на выдохе и увеличение продолжительности выдоха приводят к созданию избыточного внутригрудного давления, превышающего внутригрудное давление на вдохе. Повышение внутригрудного давления в свою очередь затрудняет возврат крови к сердцу и лимитирует минутный объем кровообращения. Для выяснения причин снижения значения этого показателя в газовой среде высокой плотности при максимальной физической нагрузке необходимо проведение специальных исследований.

I. P. Poleshchuk, A. M. Genin, R. D. Unku,  
A. E. Mikhnenko, V. N. Sementsov, A. V. Suvorov

# FUNCTIONAL STATE OF SOME PHYSIOLOGICAL SYSTEMS OF A HUMAN ORGANISM WITH NEON-OXYGEN MIXTURE RESPIRATION AT «DEPTHS» TO 400 METERS

Hyperbaric neon-oxygen mixture has been studied for the effect of its high density under pressure of 41 ata on basic physiological functions of human organism. Typical changes of the cardiorespiratory system and tissue respiration parameters are revealed. Changes in physical working capacity are shown. Exposure to gaseous medium of high pressure and density is accompanied by the development of some compensatory-adaptive reactions. The possibility to perform mid-hard physical work is attained with overstrain of respiration and circulation function.

Institute of Medico-Biological Problems,  
Ministry of Public Health of the USSR, Moscow

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anthonisen N. B., Bradley M. E., Vorosmarty J., Linaveaver P. C. Mechanics of breathing with helium oxygen and neon-oxygen mixtures in deep saturation diving // 4th Symp. on Underwater Physiol / Ed. C. J. Lambertsen.— New York. Acad. press.— 1971.— P. 339—345.
2. Bennett P. B., Elliot D. H. The Physiology and Medicine of diving.— Istborn : Bailiere Tindall.— London, 1982.— 672 p.
3. Bennet P. B. Some physiological measurements diving human saturation diving to 1500 ft // 3rd International conference on Hyperbaric and Underwater Physiology / Ed. X. Fructus.— Paris.— 1972.— P. 33—34.
4. Blumberg K. Oxygen toxicity // Arch. Kreislaufocch.— 1940.— P. 203—232.
5. Camporesi E. M., Salzano J. V., Moon R. E., Stolp B. W. Arterial  $pO_2$  and exchange at 46,7 and 65,6 ata // Undersea Biomed. Res.— 1982.— 9, N 1.— P. 35.
6. Camporesi E. M., Moon R. E., Stolp B. W., Salsano J. V. Ventilatory response to exercise diving simulated deep diving. Exercise bioenergetics and gas exchange // Proc. Int. Symp.— 1980.— P. 287—296.
7. Dwyer J., Saltzeuman M. A., Bryan R. Maximal physical work capacity of man at 43.4 ata // Undersea Biomed. Res.— 1977.— 4, N 14.— P. 359—372.
8. Gelfand R., Peterson R. The effects on  $CO_2$  reactivity of breathing crud neon, helium and nitrogen at high pressure // 5th Symp. on Underwater Physiology / Ed. Lambertsen C. J.— Bethesda : FASEB, 1976.— P. 603—615.
9. Halldac K. Human respiratory control at high ambient pressures and inspired gas densities // Dtsch. Arch. Med.— 1951.— N 198.— P. 71—90.
10. Карпман В. Л. Динамика сердечного сокращения при гипертонической болезни / Кардиология.— 1961.— N 4.— С. 74—84.
11. Lambertsen C. J. Collaborative investigation of limits of human tolerance to prosumization with helium, neon and nitrogen. Simulation of density equivalent to helium—oxygen respiration at depth to 2000, 3000, 4000 and 5000 feet to sea water // 5th Symp. on Underwater Physiology.— Bethesda : FASEB, 1976.— P. 34—48.
12. Lanphier E. N. Pulmonary function / The physiology and medicine of diving and compressed air work. 2 ed.— London.— 1975.— P. 102—154.
13. Morrison J. B., Bennet P. B., Barnert E. E. P., Eaton W. J. Physiological studies during a deep simulated oxygen—helium dive to 1500 feet // 4th Symp. on Underwater Physiology / Ed. Lambertsen C. J.— Bethesda : FASEB, 1976.— P. 3—20.
14. Onta Y., Arita H., Nakayama H. et al. Cardiopulmonary function and maximal aerobic power diving 14—day saturation dive at 31 ata (Seadragon IV) // 7th Symp. on Underwater Physiology.— Bethesda, 1981.— P. 209—222.

15. Peterson R. E., Wright W. se gas mixtures an high derwater Physiology / Ed.
16. Spaur W. N., Raymond L. chanical, natchemical in or 198.
17. Schaefer K. E., Cerey C. A exchange during saturation seawater // 5th Underwater 370.
18. Salzano J. V., Stolp B. W. 7th Symp. on Underwater P
19. Salzano J. V., Camporesi A ters at depth to 650 meters
20. Strocus R. H., Wright W. subjects breathing nitrogen solute // 5th Symp. on Und
21. Varena P., Vieillefond H., ventilation of muscular ex 166.
22. Vorosmarty J., Bradly M. on pulmonary mechanics //

Ин-т медико-биологических  
М-ва здравоохранения СССР,

УДК 612.(204.1)

С. А. Гулярь, В. Н. Ильин, Е.

## Адаптивные реакции при многократном де глубоководных сатур

Оценка изменений дыха  
торных газов показала,  
фазные изменения и пе  
стояния акванавтов. Ус  
дрома, который харак  
дыхания и кровообра  
бронхиальной проходим  
снижением физической  
ции коры надпочечни  
резистентности. На осн  
водников выявлены зак  
заключение о нарастан  
тиляторной функции ле  
кратном действии сатур  
ные значения показате  
лазов. На основании  
водолазных нормативов  
подходы к технологи  
спусков и коррекции  
акванавтов.

## Введение

Особенностью ответных  
понентов гипербарическ  
стем, испытывающих по

Е С. А. ГУЛЯР, В. Н. ИЛЬИН,

15. Peterson R. E., Wright W. B. Pulmonary mechanical functions in man breathing dense gas mixtures at high ambient pressure—predictive Studies III // 5th Symp. on Underwater Physiology / Ed. Lambertsen C. J.—Bethesda: FASEB, 1976.—P. 67—77.
16. Spaur W. N., Raymond L. W., Knott M. M. et al. Dyspnea in divers at 49.5 ata. Mechanical, natchemical in origin // Undersea Biomed. Res.—1977.—4, N 2.—P. 183—198.
17. Schaefer K. E., Cerey C. R., Dougerty J. N. Pulmonary function and respiratory gas exchance during saturation-exursion diving to pressures equivalent to 1000 feet of seawater // 5th Underwater Physiology.—New York: Acad. press.—1971.—P. 357—370.
18. Salzano J. V., Stolp B. W., Moon R. E., Camporesi E. M. Exercise at 47 and 66 ata // 7th Symp. on Underwater Physiology.—Bethesda, 1981.—P. 181—196.
19. Salzano J. V., Camporesi E. M., Moon R. E., Stolp B. W. Arterial acid base parameters at depth to 650 meters // Undersea Biomed. Res.—1982.—9, N 1.—P. 36.
20. Strocus R. H., Wright W. B., Peterson R. E. et al. Respiratory function in exercising subjects breathing nitrogen, helium or neon mixtures at pressure from 1 to 37 atm absolute // 5th Symp. on Underwater Physiology. Abstr.—1972.—P. 16.
21. Varenne P., Vieillefond H., Lenaire C., Saimon G. Expiratory flow volume curves and ventilation of muscular exercise at depth // Aerosp. Med.—1974.—44, N 2.—P. 161—166.
22. Vorosmarty J., Bradly M. E., Antonisenn N. R. The effects of increased gas density on pulmonary mechanics // Undersea Biomed. Res.—1975.—2, N 1.—P. 1—10.

Ин-т медико-биологических исследований  
М-ва здравоохранения СССР, Москва

Материал поступил  
в редакцию 21.03.91

УДК 612.(204.1)

С. А. Гуляр, В. Н. Ильин, Е. В. Моисеенко, А. И. Дмитрук

### Адаптивные реакции у человека при многократном действии глубоководных сатурационных погружений

Оценка изменений дыхания, кровообращения и транспорта респираторных газов показала, что длительное действие гипербарии вызывает фазные изменения и переход на новый уровень функционального состояния акванавтов. Установлено наличие постдекомпрессионного синдрома, который характеризуется лабильностью основных параметров дыхания и кровообращения, угнетением газообмена, нарушениями бронхиальной проходимости, ослаблением насосной функции сердца, снижением физической работоспособности на фоне торможения функции коры надпочечников и ослабления неспецифической иммунорезистентности. На основании обследования 145 водолазов-глубоководников выявлены закономерности динамики реадaptации и сделано заключение о нарастании неблагоприятных тенденций со стороны вентиляторной функции легких и насосной функции сердца при многократном действии сатурационных погружений. Установлены нормативные значения показателей внешнего дыхания для контингента водолазов. На основании тенденций сдвигов в межспусковой период и водолазных нормативов физиологически обоснованы некоторые новые подходы к технологии медицинского обеспечения глубоководных спусков и коррекции неспецифической профессиональной патологии акванавтов.

#### Введение

Особенностью ответных реакций организма на стрессорное действие компонентов гипербарической среды является фазность измерений систем, испытывающих первыми действие измененной газовой и водной

© С. А. ГУЛЯР, В. Н. ИЛЬИН, Е. В. МОИСЕЕНКО, А. И. ДМИТРУК, 1991

ISSN 0201-8489. Физиол. журн. 1991. Т. 37, № 4