

УДК 551.46:626.02:331.45

**БИОФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ БЕЗОПАСНОСТИ ВОДОЛАЗОВ
ПРИ ПОДВОДНЫХ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЯХ****Яхонтов Б.О.***Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, e-mail: giper28@ocean.ru*

В статье обсуждаются биофизические аспекты безопасности водолазов при подводных океанологических исследованиях и в барокамерах. Очевидно, что в условиях гипербарии опасность исходит в основном от гипербарической рабочей среды. Показано, что главными факторами среды, действующими на организм водолаза и влияющими на его безопасность, являются: повышенное давление водной и газовой среды и его перепады, измененная дыхательная газовая среда, водная иммерсия и водолазное снаряжение. Под влиянием этих воздействий формируются неблагоприятные физические и физиологические факторы, которые влияют на функциональное состояние организма водолаза, его работоспособность, здоровье и в целом на безопасность. Минимизировать опасность и вредность этих факторов, за исключением давления *per se*, являющегося основой гипербарической среды, можно только за счет оптимизации, поддержания физиолого-гигиенических параметров среды в пределах допустимых величин. С учетом научной специфики водолазных работ обсуждается целесообразность и допустимость проведения океанологических исследований водолазами-исследователями, являющимися штатными научными работниками, имеющими профессиональную водолазную подготовку. Их рабочая функция – только проведение океанологических исследований *in situ*. На работу водолаза-исследователя в целях его безопасности, учитывая сравнительно невысокий уровень водолазной квалификации, должны налагаться определенные ограничения по глубине, задачам и режимам работы под водой. Главной целью обеспечения безопасности водолазов-исследователей при работе под водой является поддержание их жизнедеятельности, умственной и физической работоспособности на приемлемом уровне и сохранение здоровья.

Ключевые слова: океанологические исследования, безопасность водолазов, водолаз-исследователь, гипербарическая среда, факторы водной и газовой среды, контроль состояния водолаза, принципы обеспечения безопасности

**BIOPHYSICAL ASPECTS OF THE SAFETY
OF DIVERS DURING UNDERWATER OCEANOLOGICAL RESEARCH****Yakhontov B.O.***Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Moscow, e-mail: giper28@ocean.ru*

The article discusses the biophysical aspects of the safety of divers during underwater oceanological research and in pressure chambers. It is obvious that in hyperbaric conditions, the danger comes mainly from a hyperbaric working environment. It is shown that the main environmental factors acting on the diver's body and affecting his safety are increased pressure of the water and gas environment and its differences, altered respiratory gas environment, water immersion and diving equipment. Under the influence of these influences, unfavorable physical and physiological factors are formed that affect the functional state of the diver's body, his working capacity, health, and safety in general. It is possible to minimize the danger and harmfulness of these factors, with the exception of pressure *per se*, which is the basis of a hyperbaric environment, only by optimizing, maintaining the physiological and hygienic parameters of the environment within acceptable values. Taking into account the scientific specifics of diving operations, the expediency and permissibility of conducting oceanological research by research divers who are full-time scientists with professional diving training are discussed. Their working function is only conducting oceanological research *in situ*. In order to ensure the safety of a research diver, given the relatively low level of diving qualifications, certain restrictions should be imposed on the depth, tasks, and modes of operation under water. The main goal of ensuring the safety of research divers when working underwater is to maintain their vital activity, mental and physical performance at an acceptable level and preserve their health.

Keywords: oceanological research, safety of divers, diver-researcher, hyperbaric environment, factors of the water and gas environment, control of the diver's condition, safety principles

Безопасность водолазов при погружении, как в производственных, так и в научных целях, является важнейшим аспектом данной профессиональной деятельности, потому что человеку приходится работать во враждебной ему водной среде с большим комплексом опасных и вредных факторов, обусловленных повышенным давлением на глубине. Работы под водой сопровождаются преодолением сопротивления воды при любых локомоциях, а также сопротивлению дыханию, обусловленного водолазным дыхательным аппаратом

и повышенной плотностью сжатого воздуха или дыхательной газовой смеси (ДГС), что приводит к значительному повышению энерготрат организма. Аналогичные условия, за исключением водной иммерсии, имеют место и во время пребывания водолаза в барокамере при имитации глубин погружения. Эффект действия этих факторов на организм водолаза в значительной степени зависит от индивидуальной устойчивости к ним и тренированности. Но все равно полной адаптации человека к работе в таких условиях, вероятно, не происходит,

особенно на больших глубинах. Организм на эти воздействия вначале отвечает компенсаторными реакциями, позволяющими противостоять экстремальным факторам гипербарии. Истощение компенсаторных возможностей приводит к развитию патологических реакций. Регулярное, в течение трудовой деятельности, воздействие на организм водолаза необычных экстремальных факторов (многократно повышенное давление окружающей водной или газовой среды и измененная по всем параметрам дыхательная газовая среда и другие) неблагоприятно отражается на состоянии их здоровья и может приводить к профессиональным заболеваниям не только в период работы водолазом [1], но и в отдаленной перспективе в зависимости от стажа работы [2; 3], глубины и длительности пребывания под повышенным давлением на предельных глубинах [4].

Таким образом, любые водолазные работы по всем объективным критериям относятся к категории работ с опасными, тяжелыми и особо вредными условиями труда [5].

Очевидно, что при работах под водой полной безопасности водолаза быть не может, риск при работе на глубине неизбежен, он превышает риски по сравнению со многими другими профессиями. Уровень безопасности в таких условиях ограничивается объективными возможностями его достижения, потому что избавиться от действия опасных и вредных факторов при работе на глубинах нереально, в этом состоит специфика условий работы водолаза. Поэтому основная задача при обеспечении его безопасности – это минимизация воздействия на организм вредных и опасных факторов водной среды на глубине и факторов окружающей газовой среды в «сухих» условиях водолазной барокамеры. Конечно, при работе в гипербарической среде опасность исходит в основном от этой среды и в меньшей степени от рабочего процесса, или технологии выполнения работ. Минимизировать опасность и вредность факторов среды, за исключением давления *per se*, являющегося главной и неотъемлемой частью комплекса факторов гипербарической среды, можно только за счет оптимизации, поддержания физиолого-гигиенических параметров среды в пределах допустимых величин. Все это относится ко всем водолажным специализациям и трудовым функциям, включая проведение научных исследований на дне.

В условиях работы водолазов имеют место большое количество опасных и вредных факторов: биологических, физических, химических и психофизиологических. Их

можно объединить в одну обобщенную группу – биофизические.

Целью данной работы является обеспечение безопасности научных водолазов при проведении подводных океанологических исследований.

Материалы и методы исследования

Методы исследования – обобщение и анализ экспериментальных данных и многолетней практики водолазных погружений в научных целях, а также исследовательских работ в обитаемых подводных гипербарических системах. Исследования проводились в диапазоне глубин до 40 м на водолазных объектах Черного моря, а также в водолазных бассейнах и в «сухих» барокамерах при имитации различных глубин. В погружениях, кроме профессиональных водолазов, принимали участие научные работники, совмещающие свои основные рабочие должности с профессией водолаза. Использовались различные виды снаряжения, включающие дыхательные аппараты с открытым и замкнутым циклом дыхания сжатым воздухом и газовыми смесями, гидрокостюмы сухого и мокрого типов. При всех погружениях одной из главных задач была оценка уровня безопасности водолазов при действии на организм факторов водной и газовой среды (давление, состав ДГС, температура, влажность и другие). Контроль состояния водолазов осуществлялся страхующими водолазами с плавсредства обеспечения спусков и под водой.

Результаты исследования и их обсуждение

Результаты исследования и их анализ показывают, что главными факторами среды, влияющими на безопасность водолазов, являются: повышенное давление водной и газовой среды и его перепады, измененная дыхательная газовая среда, водная иммерсия и водолазное снаряжение (дыхательные аппараты и гидрокостюмы). Под влиянием этих воздействий формируется целый ряд неблагоприятных физических и физиологических факторов, которые прямо или опосредованно влияют на функциональное состояние водолаза, его работоспособность, здоровье и в целом на безопасность. Основными явно выраженными факторами и результатом их действия на организм являются:

- механическое влияние гидростатического давления водной среды на глубине, результат действия – обжим тела, неравномерное сжатие, сопротивление воды любым передвижениям, возможные баротравмы легких, уха и придаточных пазух носа;

- повышенная плотность дыхательной среды – повышение сопротивления и работы дыхания, нарушение вентилаторной функции легких, изменения дыхательного газообмена, перестройка работы речевого и слухового аппарата;

- повышенная теплоемкость, теплопроводность водной и газовой среды, влажность газовой среды – изменение терморегуляции в организме, теплообмена с возможным переохлаждением или перегревом;

- повышенное парциальное давление кислорода при дыхании сжатым воздухом и газовыми смесями – интоксикация кислородом;

- повышение содержания двуокиси углерода и вредных примесей в дыхательной газовой среде – интоксикации данными веществами;

- избыточное насыщение организма инертным газом и насыщение – развитие декомпрессионной болезни при неадекватном режиме подъема на поверхность;

- наркотическое действие азота при дыхании сжатым воздухом – развитие азотно-го наркоза при погружении.

Эти факторы являются физиологическими препятствиями, которые человек должен преодолевать при погружении и работе на глубинах, избавиться от них на глубине нельзя. Под их влиянием и при возможном отклонении от соблюдения установленных правил работы под водой формируются опасные условия, приводящие к специфическим профессиональным заболеваниям и травмам водолазов.

Если при водолазных погружениях допустить разумный уровень риска, он должен быть оправдан эффективностью проведения любых работ под водой, в том числе научно-исследовательских. Оценка значения технологий водолазных погружений с учетом допустимого для водолаза риска показала существенное повышение эффективности подводных исследований при изучении океана и возможность поддержания при этом относительной безопасности водолаза-исследователя. Развитие данного методического направления исследований на доступных океанологу глубинах подтвердило эффективность водолазных методов исследований для повышения научного уровня разработок [6].

Под определением «водолаз-исследователь», или «научный водолаз» (по принятому в западных странах определению), в данном случае подразумевается рабочая функция водолаза – проведение океанологических исследований *in situ*. Это научный работник (ученый), имеющий профессиональную водолазную подготовку и ква-

лификацию «водолаз», что дает ему право проведения научных исследований под водой. Поэтому его задачи при работе на глубине должны быть ограничены научным наблюдением, экспериментом с применением донных приборов, сбором проб воды, грунта и других материалов, анализом обстановки под водой для личного контроля безопасности. Никаких других задач для водолаза-исследователя не должно предусматриваться, они должны решаться водолазами более высокой квалификации и другой специализации. К тому же реальность показывает, что среди научных работников водолаз относительно высокой квалификации – большая редкость. Естественно, что уровень квалификации водолаза-исследователя несравним с уровнем производственного, коммерческого, водолаза. Это совершенно разные специалисты по своим интересам, задачам и возможностям. Коммерческий водолаз любого уровня квалификации работать под водой эпизодически, по мере необходимости выполнения научной программы, что характерно для океанологических исследований, не будет по понятным причинам. Кроме того, он не обладает знаниями относительно предмета исследований. Однако при специальной научно-методической подготовке его эпизодическая работа в качестве исследователя в сложных подводных условиях, конечно, не исключается. Вместе с тем проведение океанологических исследований под водой научными водолазами при обеспечении их безопасности является научно и экономически оправданным и эффективным в диапазоне малых и средних глубин (до 12 и до 60 м по российской градации глубин). Конечно, при использовании для спусков дыхательных аппаратов типа «ребризера» с замкнутым циклом дыхания (CCR) газовыми смесями метод кратковременных погружений в автономном режиме может использоваться и для глубоководных спусков (более 60 м) в ограниченном диапазоне глубин [7], однако для океанологических исследований на больших глубинах его эффективность невысока в связи с необходимостью проведения в воде длительной декомпрессии. Поэтому при подводных научных исследованиях в пределах средних глубин вполне приемлемы технологии погружений с использованием автономных дыхательных аппаратов с открытым циклом дыхания (OCR) сжатым воздухом и газовыми смесями, а также аппаратов с замкнутым циклом дыхания (CCR) газовыми смесями. Эти типы водолазного снаряжения полностью соответствуют характеру и виду выполняемых работ при подводных океанологических исследованиях.

Методология обеспечения безопасности при научной работе под водой заключается в совокупном использовании рациональных принципов, технологий и методов погружений, а также требований нормативной документации по охране труда при проведении водолазных спусков и работ. Документация является основой системы обеспечения безопасности водолаза и должна включать требования к проведению водолажных работ, типичных для океанологических исследований в прибрежной зоне. Основными из них являются:

- установка, обслуживание и демонтаж донных приборов, станций и других устройств;
- выполнение под водой исследований *in situ*, экспериментов, измерений с применением специальных научных приборов и инструментов;
- сбор образцов грунта, воды, биологических и геологических материалов на глубине, картирование рельефа дна;
- проведение разметки и обустройства подводного научного полигона;
- наблюдение, подсчет и отлов для изучения представителей донной фауны специальными ловушками;
- обследование и подъем на поверхность изучаемых объектов и артефактов, подводная видеосъемка процессов и объектов исследований и другие работы.

Поскольку выполнение океанологических исследований под водой в целом не является работой высокой сложности и носит эпизодический характер, это требует от водолаза-исследователя, согласно профессиональному стандарту, минимум 4-го, начального, профессионального уровня квалификации, навыков пользования определенными типами водолазного снаряжения, владения методиками подводных исследований с применением специальных приборов, инструментов и устройств, знаний изучаемых морских дисциплин [8]. Но эти особенности научной работы водолаза-исследователя не должны снижать общий уровень требований безопасности, принятых для всех уровней квалификации водолазов [9]. Принимая во внимание сравнительно невысокую квалификацию, небольшой опыт работы под водой и независимо от типов используемого автономного водолазного снаряжения, погружения водолазов-исследователей из числа научных работников в целях их безопасности следует проводить «в нормальных и усложненных условиях по результатам оценки рисков» [9, п. 137]. Эти условия относятся к гидрологическим и метеоро-

логическим параметрам на рабочей акватории. Глубину спусков целесообразно ограничивать 30 метрами. Это глубина, при которой начинаются небезопасные проявления азотного наркоза при дыхании сжатым воздухом. Большие глубины допустимы для водолазов более высокой квалификации. Но во всех случаях необходимо учитывать установленную для водолаза при ежегодных медицинских обследованиях и указанную в личной книжке водолаза глубину, реальный уровень его квалификации и опыта (количество часов пребывания под водой и характер выполнявшихся работ) и планируемую для использования дыхательную газовую смесь.

Все спуски, независимо от технологии погружений, должны проводиться с напарником, выполняющим функцию страхующего водолаза, и предпочтительно по бездекомпрессионным режимам. Если используется «смесевой» дыхательный аппарат с замкнутым циклом дыхания типа «ребризер», спуски научных водолазов в целях повышения их безопасности следует проводить без смены ДГС под водой.

Наибольшая безопасность водолазов обеспечивается комплексной системой, включающей не только меры защиты от опасных и вредных факторов среды, но и в целом охрану научной работы водолаза на глубинах (рис.). Она должна базироваться, как и общепринятая система, на нормативно-правовых, технических, организационных, медико-биологических и психофизиологических принципах [10].

В системе мер и принципов обеспечения безопасности водолазов-исследователей целесообразен и контроль их состояния, несмотря на присутствие вблизи страхующего водолаза. Такой контроль может осуществляться с обеспечивающего спуск судна или маломерного плавсредства путем голосовой связи с водолазом по кабельным линиям или гидроакустическому каналу, видеоконтроля, регистрации у водолаза физиологических параметров и передачи сигнала на поверхность с обработкой в реальном времени. Полезна и регистрация этих параметров на твердом носителе с последующей обработкой данных на компьютере. В этом случае прибор работает по принципу «черного ящика».

Главной целью обеспечения безопасности водолазов-исследователей при работе под водой является поддержание их жизнедеятельности, умственной и физической работоспособности на приемлемом уровне и сохранение здоровья.



Структурная схема комплексной системы обеспечения безопасности водолазов-исследователей

Во время пребывания в «сухих» условиях барокамеры при повышенном давлении принципы обеспечения безопасности водолазов остаются неизменными, хотя их реализация упрощается по причине отсутствия водной иммерсии и наличия возможности оперативного принятия мер по оказанию помощи водолазам и нормализации параметров среды обитания, которая, как было отмечено выше, является основным источником опасности. Однако при длительном пребывании в барокамере водолазного комплекса с использованием для дыхания искусственной дыхательной газовой среды безопасность водолазов становится зависимой и от технической системы жизнеобеспечения. Функционирование этой системы направлено на формирование, изменение и поддержание на заданных уровнях в диапазоне допустимых значений физиолого-гигиенических параметров дыхательной среды и микроклимата в замкнутом объеме барокамеры: парциальных давлений кислорода и двуокиси углерода, температуры, относительной влажности, содержания вредных микропримесей в пределах ПДК, скорости движения газовой среды в камере. Эти параметры и создающиеся ими условия обитания являются жизненно важными, их поддержание в допустимых значениях определяет уровень безопасности независимо от целей пребывания (научные

или производственные) при повышенном давлении в барокамере.

Заключение

Проблема безопасности человека, работающего под водой, является главной, независимо от того, водолаз ли это, работающий в условиях многократно повышенного окружающего давления и дыхания измененной газовой средой, или гидронавт, находящийся на глубине в замкнутом объеме подводного аппарата при нормальном давлении с дыхательной средой, близкой к обычной. Конечно, водолаз подвержен прямому влиянию на организм большего количества и большей мощности биофизических факторов, что позволяет характеризовать условия его работы как более опасные и вредные. Воздействие на организм этих факторов неблагоприятно отражается на состоянии здоровья водолаза и может приводить не только к травмам и профессиональным заболеваниям в период работы, но и к отдаленным последствиям патологического характера. В этом состоит опасность и вредность водолазной деятельности независимо от её целей (производственные или научные). Однако при погружениях в научных целях, в частности для проведения океанологических исследований, проблема осложняется тем, что в роли водолаза выступает штатный научный работник, имеющий начальную

профессиональную водолазную подготовку. Естественно, что уровень его водолазной квалификации и опыта в среднем невысок, поэтому обеспечение безопасности выходит на первый план. В этой связи на работу водолаза-исследователя вполне обоснованно должны налагаться определенные ограничения по глубине, газовому составу дыхательной смеси, режимам погружений и работы под водой. Поскольку опасность исходит в основном от среды обитания и в меньшей степени от рабочего процесса, основная задача при обеспечении безопасности научного водолаза – это минимизация действия на организм вредных и опасных факторов при работе в условиях гипербарии. Это может быть достигнуто за счет строгого контроля состояния водолаза и поддержания биофизических параметров дыхательной газовой смеси или среды обитания в пределах допустимых значений и, конечно, при соблюдении всех режимов спуска, работы под водой или в барокамере, а также декомпрессии. Безопасность водолаза-исследователя должна обеспечиваться комплексной системой мер защиты, базирующейся не только на специфических условиях научной работы под водой, но и на общепринятых принципах и мерах обеспечения безопасности.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИО РАН (тема № 0128–2021–0011).

Список литературы

1. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. Водолазные спуски до 60 метров и их медицинское обеспечение. М.: Слово, 2003. 696 с.
2. Евстропова Г.Н., Габриджанов В.А., Соколов Г.М., Яхонтов Б.О., Котляров В.И. Развитие патологии у водолазов в процессе профессиональной трудовой деятельности // Индифферентные газы в водолазной практике, биологии и медицине: материалы Всероссийской конференции. Москва: Слово, 2000. С. 53–59.
3. Смолин В.В., Соколов Г.М., Павлов Б.Н. Водолазные спуски до 60 метров и их медицинское обеспечение. 4-е изд., перераб. и доп. М.: Слово, 2013. 608 с.
4. Чумаков А.В. Длительное пребывание человека на предельных глубинах: взгляд на изменения функциональных систем акванавтов с позиции патофизиологии критических состояний // Клиническая патофизиология. 2016. Т. 22. № 4. С. 118–123.
5. Единые правила безопасности труда на водолазных работах. Часть 1. Правила водолазной службы. РД 31.84.01–90. М.: Моркнига, 2022. 304 с.
6. Яхонтов Б.О. Водолазные методы океанологических исследований // Океанология. 2021. Т. 61. № 3. С. 491–497.
7. Черкашин С. В. Методики профессиональных водолазных спусков в автономном режиме // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2013): материалы XIII Международной научно-технической конференции. Москва: АПР, 2013. Т. 2. С. 262–265.
8. Профессиональный стандарт. Водолаз. // Утв. Приказом Минтруда РФ 31.10. 2017. №765н. Рег.№1095. [Электронный ресурс]. URL: docs.cntd.ru (дата обращения: 16.05.2022).
9. Правила по охране труда при проведении водолазных работ. Утв. Приказом Минтруда России от 17.12.2020 № 922н. М.: Моркнига, 2022. 232 с.
10. Яхонтов Б.О. Обеспечение безопасности водолазных спусков при океанологических исследованиях // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2019): материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции. Москва: ИД Академии Жуковского, 2019. Т. 2. С. 142–146.