
МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ
ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 551.46.073(626.02)

РАЗВИТИЕ ГИПЕРБАРИЧЕСКИХ ТЕХНОЛОГИЙ
ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2016 г. Б. О. Яхонтов, Н. А. Римский-Корсаков

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва

e-mail: giper28@ocean.ru

Поступила в редакцию 19.01.2015 г.

Представлен анализ и обоснование эффективности использования водолазных и лабораторных гипербарических методов и технологий для океанологических исследований.

DOI: 10.7868/S0030157416010226

Водолазные спуски и работы как один из методов подводных исследований широко применяются во многих странах при изучении, освоении и эксплуатации океана. В России водолазные и лабораторные гипербарические технологии в научной сфере начали активно развиваться с середины шестидесятых годов прошлого столетия. В 90-х годах эти работы были приостановлены, однако научно-технический задел сохранился и может быть использован для повышения эффективности океанологических исследований.

В отличие от использования технических средств (подводные аппараты и роботы), реализующих методы наблюдений, измерений параметров среды и отбора проб, водолаз может выполнять под водой функцию лабораторного исследователя. Это важно при проведении биологических и химических исследований, поскольку транспортировка на поверхность проб воды и гидробионтов даже с относительно небольших глубин порождает проблему их биохимической и физико-химической трансформации. Морская вода и гидробионты содержат биологически активные газы и другие соединения. При подъеме образцов и организмов на поверхность изменяются физические параметры среды их обитания. Это приводит к “декомпрессионным расстройствам” у этих объектов, аналогичным нарушению режима декомпрессии водолаза. Неадекватная скорость снижения гидростатического давления при подъеме на поверхность приводит не только к газообразованию в тканевых структурах. При увеличении молярных объемов газов и биологических жидкостей изменяются межмолекулярные взаимодействия, функции биологических мембран, метаболизм в клетках и тканях, происходят другие сдвиги гомеостаза. Эти изменения противоположны тем, которые наблюдаются при гидрокомпрессии “поверхностных” организмов [6, 15].

В том же направлении, что и давление, при подъеме на поверхность на объекты действует и повышение температуры. Понятно, что на фоне такой трансформации результаты количественных измерений каких-либо параметров не могут быть корректными. Измерения должны выполняться *in situ*, то есть в среде обитания изучаемых объектов. Это непростая проблема, решение которой требует наличия специальной аппаратуры (газовых, химических и биохимических анализаторов, технических устройств и приспособлений), адаптированной для подводных условий. Такую работу может выполнять обученный водолаз или ученый, имеющий профессиональную водолазную подготовку.

Подводная среда на доступной человеку глубине может рассматриваться как лабораторное место для современного океанолога. Этот принцип соблюдается в ведущих зарубежных университетах, институтах и центрах, изучающих проблемы океана. С применением водолазных технологий выполняются исследования в области химии и биологии океана с использованием сложной аппаратуры, например, высокочувствительных подводных масс-спектрометров. Для этого из числа студентов, будущих океанологов, готовят водолазов профессионального уровня.

Единственным ограничением использования водолазных методов является глубина погружения, что связано исключительно с физиологическими лимитами организма, так как водолаз под водой или в барокамере находится под постоянным воздействием повышенного давления искусственной дыхательной среды, что приводит к функциональным сдвигам во всех системах организма [5, 7]. Разработанные методы водолазных спусков при наличии соответствующих технических средств и водолазного снаряжения позволяют работать на глубинах до 450–500 м. Но даже на

малых и средних глубинах (до 60 м), где эффективность водолазных методов наибольшая, океанологические исследования в России до настоящего времени проводились в небольшом объеме.

Целесообразность развития водолазных методов океанологических исследований была подтверждена в 1968–1974 гг. при реализации научной программы с использованием подводной лаборатории “Черномор” на глубинах до 30 м [3, 1, 9]. Водолазные погружения были признаны одним из методов океанологических исследований [8, 2]. Понимание значения водолазных спусков для повышения эффективности подводных исследований послужило толчком к развитию гипербарического направления и разработке новых технических средств.

Были разработаны требования к береговому гипербарическому комплексу для имитации глубин океана и к судовым глубоководным водолажным комплексам (ГВК) для работы на больших глубинах. Эти требования были реализованы в 1970–1980-х гг. при создании комплекса для длительного пребывания акванавтов на имитированных глубинах до 450 м (ГКК-ДП350/450), НИС “Витязь”, НИС “Гидробиолог” и “Акванавт-2”, оборудованных ГВК, а также подводного аппарата “Осмотр” с отсеком для выхода водолазов в воду на глубинах до 200 м. В 1984 г. в барокамерах комплекса ГКК-ДП350/450 в имитационном погружении впервые в нашей стране была достигнута глубина 450 м. В 1986 г. в этом комплексе были проведены уникальные эксперименты по изучению возможности пребывания и работы человека на глубинах до 400 м при дыхании кислородно-неоновыми смесями [10]. При этом плотность смеси более чем в 25 раз превышала плотность воздуха при нормальном давлении и соответствовала глубине примерно 2000 м при дыхании легкой кислородно-гелиевой смесью. Даже в таких жестких условиях не было обнаружено неожиданных функциональных изменений в организме испытуемых.

Опыт работы водолазов-исследователей в барокамерах и под водой обеспечил эффективные океанологические исследования в Атлантике и Средиземном море на глубинах до 210 м с использованием ГВК на НИС “Витязь”. Этими работами был успешно завершён этап апробации водолазных методов океанологических исследований.

Для дальнейшего развития этого научно-методического направления была подготовлена “Программа изучения экологии и придонного слоя шельфа Черного и Азовского морей с применением водолазной техники и подводных аппаратов”. В программе сформулированы проблемы экологии придонной области шельфа, и пути их решения с использованием водолазных методов. Основными исследованиями, для вы-

полнения которых используются водолазные методы, являются:

- изучение геоэкологии шельфа и морских берегов;
- исследование процессов обмена веществ на границе вода–дно, процессов переноса и биотурбации осадков на глубинах шельфа;
- изучение роли донного населения в формировании экологической обстановки на шельфе;
- исследования шельфовых и прибрежных зон, донной растительности, роли макрофитов в прибрежных экосистемах;
- поиск и отбор образцов для исследования ценных представителей морской флоры, содержащих биологически активные вещества;
- изучение состояния морских экосистем в условиях антропогенного воздействия.

При этом необходимость применения водолазного труда обосновывается следующими требованиями:

- прицельная установка, обслуживание и демонтаж исследовательских буев, донных приборов и станций, седиментационных ловушек, реперных штоков и других устройств;
- выполнение ручных инструментальных исследований и измерений *in situ* с применением специализированных приборов и аппаратов;
- отбор проб и образцов донного грунта и придонной воды;
- наблюдение, подсчет и отлов представителей донной фауны и планктона;
- обследование техногенных подводных объектов;
- подводная фото-, видео- и телевизионная съемка.

Находясь непосредственно вблизи исследуемого объекта, водолаз-исследователь может корректировать программу и методику исследований в зависимости от обстановки, сложившейся в ходе эксперимента. В крупных зарубежных научных центрах (Вудсхолский океанографический Институт (США), Японское агентство морских и геологических наук и технологий (Jamstec) и другие) водолазные технологии при океанологических исследованиях занимают значительное место в научных программах работ на малых и средних глубинах. В США все подводные исследования проводятся так называемыми “научными водолазами” в соответствии с “Руководством по безопасности водолазных спусков” (“Diving Safety Manual”, Woodshole Oceanographic Institution, Revision 3, 2010).

Современные технологии водолазных спусков основаны на двух методах:

- кратковременного погружения (КП – частичное насыщение тканей организма инертным

газом, составляющим основу дыхательной смеси), когда время декомпрессии зависит от времени пребывания водолаза при данном повышенном давлении;

– длительного пребывания (ДП – полное насыщение тканей организма инертным газом) в условиях повышенного давления, при этом время декомпрессии не зависит от длительности пребывания при данном повышенном давлении.

Эти методы основаны на физиологических принципах построения методики спуска (компрессия), работы на грунте (работоспособность) и выхода на поверхность (декомпрессия). Физиологические проблемы решены фундаментальной и прикладной наукой в США, Франции, России, Великобритании и в других странах.

Водолазные спуски методом КП осуществляются из условий нормального давления воздушной среды. Время работы водолаза под водой в зависимости от глубины погружения может находиться в пределах от нескольких минут до нескольких часов. Метод реализуется с использованием водолазного снаряжения трех типов:

– дыхательные аппараты с открытой схемой дыхания сжатым воздухом (выдох в воду) – рабочие глубины до 60 м;

– вентилируемое воздухом шланговое снаряжение (гидрокombineзон со шлемом) – рабочие глубины до 60 м;

– дыхательные аппараты с замкнутой схемой дыхания газовыми смесями (ребризеры), обеспечивающие спуски в автономном режиме на глубины приблизительно до 100 м.

Экспериментальные спуски и исследования показали, что для научных целей наиболее эффективной, экономичной и безопасной является методика спусков в автономном режиме с использованием ребризеров, в которых обеспечивается автоматическое поддержание заданного парциального давления кислорода (PO_2) во всем диапазоне рабочих глубин, а также регулировка состава дыхательных газовых смесей и их смена во время работы под водой.

Принципиально важным приложением к данной методике является возможность расчетов режимов спусков, и в частности декомпрессии, с помощью подводного компьютера. За счет этих технических инноваций достигается высокая автономность и мобильность, резкое сокращение расхода газов, времени декомпрессии по сравнению со спусками на сжатом воздухе. Увеличивается время работы на грунте, улучшается теплообмен между организмом и водной средой за счет поступления на вдох подогретой и увлажненной газовой смеси. В целом – это прогрессивный метод кратковременных погружений, позволяющий водолазу эффективно работать на глубинах свы-

ше шестидесяти метров, то есть в зоне глубоководных спусков [12, 13]. Положительные результаты апробации методики позволяют утверждать, что она может стать основной при погружениях в научных целях. Между тем, ее специфика (практически абсолютная автономность) предъявляет повышенные требования к самоорганизации и уровню квалификации водолаза.

Однако эффективность погружений в автономном режиме, как и в целом метода КП, снижается при спусках на глубины свыше примерно 100 м, так как время декомпрессии возрастает до неприемлемых величин, и КПД такого спуска становится низким. Это определяет необходимость перехода на метод ДП, при котором время декомпрессии не зависит от времени пребывания на данной глубине.

Водолазный спуск методом длительного (до нескольких недель) пребывания под повышенным давлением отличается от метода кратковременного спуска тем, что во время ДП ткани организма водолаза полностью насыщаются инертным газом (азотом, гелием) в зависимости от его парциального давления в дыхательной среде. Находясь в условиях “насыщения”, водолаз может практически в любое время выходить в воду для работы из жилой барокамеры судового водолазного комплекса, используя водолазный колокол, или из подводной лаборатории, установленной на грунте, и возвращаться на место без декомпрессии, потому что давление при этом не изменяется. Декомпрессия проводится один раз по завершении всех исследовательских работ под водой. Естественно, что абсолютное время декомпрессии при этом методе в несколько раз превышает время декомпрессии после работы методом КП. Однако это более чем компенсируется эффективностью метода ДП, поскольку декомпрессия занимает малую долю общего времени пребывания под водой. Ученые Вудсхолского океанографического института (США), используя этот метод, в последние годы по несколько суток работали под водой на глубинах до двадцати метров в подводной лаборатории “Aquatius”, которая принадлежит NOAA.

Существующие режимы компрессии, декомпрессии, труда, отдыха и реабилитации позволяют водолазам работать на больших глубинах ежедневно в сменном режиме по 4–6 часов с общей длительностью пребывания под повышенным давлением порядка месяца. Метод ДП, реализуется главным образом с использованием судовых водолазных комплексов, а также в исследовательских береговых комплексах (симуляторах), в которых по фактору давления имитируются глубины океана. В начале семидесятых годов прошлого столетия видные отечественные ученые океано-

логи отмечали эффективность судовых комплексов для океанологических исследований [4].

Судовые глубоководные водолазные комплексы (ГВК), которые размещаются стационарно в помещениях судна под палубой или на палубах, имеют оборудованные для многосуточного проживания жилые камеры, которые через переходную камеру или отсек стыкуются с водолазным колоколом. Колокол используется для спуска водолазов к месту работ на глубину, на которой давление равно давлению в жилых отсеках барокамера. В связи с равенством давлений водолаз может работать на данной глубине и возвращаться в жилой отсек без декомпрессии.

Эффективность судовых ГВК и метода ДП стала очевидной, когда комплекс фирмы Dräger (ФРГ), на судне “Stephaniturm” использовался в 1981 г. при водолазных работах по подъему золота с затонувшего на глубине 245 м крейсера “Эдинбург”. Высокоэффективными показали себя вышеупомянутые российские НИС “Гидробиолог” с ГВК на 100 м и НИС “Витязь” с ГВК на 250 м, а также зарубежные НИС с водолазными комплексами. Крупнейшие современные норвежские суда с ГВК, работающие в северных морях (“AcergyNavila” с ГВК фирмы Dräger на 24 водолаза для глубин 400 м и “Skandi Arctic” с ГВК на 24 водолаза для глубин 350 м), способны обеспечивать решение любых производственных и научных задач под водой.

Не менее эффективными при использовании в научных целях являются береговые ГВК. Это — многофункциональные барокамерные комплексы, в которых имитируются не только глубины по фактору давления, но и водолазные спуски. В гидробарокамерах крупных зарубежных береговых комплексов имитируются арктические и тропические условия, а также течения и соленость воды в целях изучения влияния этих факторов на подводные технические устройства, аппаратуру и биофизические процессы в водной среде [14]. Следует отметить, что все мировые достижения в области глубоководных водолазных погружений были научно отработаны и апробированы именно в береговых водолазных комплексах: по глубине — 701 м (СОМЕХ, Франция), по длительности пребывания на глубинах 100, 200, 300 и 500 м соответственно 40, 35, 30 и 15 суток (40 ГосНИИ МО СССР).

Кроме водолазных методов, для океанологических исследований эффективным является метод имитации глубин в лабораторных гидробарокамерах. Этот метод позволяет изучать влияния гидростатического давления на морские объекты (биологические, геологические и другие) и проводить испытания габаритных приборов и аппаратов. Специально для фундаментальных исследований создаются гидробарокамеры, в которых

имитируются глубины, даже превышающие океанские, а также гипербарические аквариумы для изучения флоры и фауны на имитированных глубинах. Фирма Comex (Франция) изготавливает небольшие камеры на давления до 3000 атмосфер, в том числе специально для фундаментальных биологических исследований. В Южном отделении ИО РАН имеется гидробарокамера, рассчитанная на давление, соответствующее глубине 9000 м [11]. Внутренний диаметр камеры составляет 800 мм, длина внутренней рабочей части — 5000 мм.

В России, как и во всем мире, гипербарические технологии в настоящее время развиваются в основном в производственной сфере, на объектах разведки и освоения ресурсов континентального шельфа, в сфере спасения людей и экипажей подводных судов на внутренних морях, а также оказания помощи аварийным судам. Такие службы имеются во многих министерствах, ведомствах и компаниях. Наиболее крупные и оснащенные — в МЧС России (поисково-спасательные формирования в Федеральных округах), в Министерстве транспорта РФ (ФГБУ “Госморспасслужба России”), в Министерстве обороны РФ (ВМФ — НИИ, поисковые аварийно-спасательные службы на флотах). В распоряжении производственных водолазов и спасателей имеются (или строятся) современные суда с водолазными, в том числе глубоководными, комплексами, оснащенными отечественным и зарубежным оборудованием и снаряжением, мобильные и береговые многофункциональные комплексы. Большинство технических и технологических разработок выполняются и реализуются отечественными специализированными компаниями (“Алмаз”, “Лазурит”, “Тетис-про”, “Дайвтехносервис” и другие).

Деятельность по развитию водолазного дела в России координируется Межведомственной комиссией по водолазному делу при Морской коллегии при Правительстве РФ. Это указывает на значимость развития данного технологического направления.

Для изучения и освоения ресурсного потенциала российского континентального шельфа и обеспечения безопасности морской деятельности России необходима современная научная основа, без которой водолазные технологии не могут активно развиваться. Подводная среда — это специфическая, враждебная среда для человека. Эффективная и безопасная работа в этой среде возможна лишь с учетом физиологических возможностей человека и при наличии современных технических средств. Эта проблема должна решаться в рамках научного направления по гипербарическим технологиям.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Айбулатов Н.А. Океанологические исследования из обитаемых подводных лабораторий // Океанология. 1972. Т. 12. № 1. С. 144–154.
2. Айбулатов Н.А. Вижу дно. М.: Наука, 2006. 172 с.
3. Айбулатов Н.А., Монин А.С., Ястребов В.С. Подводные эксперименты “Черномор” // Океанология. 1970. Т. 10. № 4. С. 729–732.
4. Айбулатов Н.А., Николаев В.П. Некоторые соображения о применении гипербарических устройств в изучении Мирового океана и результаты океанологических исследований из подводной лаборатории “Черномор” // Подводные медико-биологические исследования. Киев: Наукова думка, 1975. С. 176–186.
5. Зальцман Г.Л., Кучук Г.А., Гургенидзе А.Г. Основы гипербарической физиологии. Л.: Медицина, 1979. 319 с.
6. Крисс А.Е. Жизненные процессы и гидростатическое давление. М.: Наука, 1973. 272 с.
7. Куренков Г.И., Яхонтов Б.О., Сыровегин А.В. и др. Действие гипербарической среды на организм человека и животных. Вып. “Проблемы космической биологии”. М.: Наука, 1980. Т. 39. 259 с.
8. Монин А.С. Институт океанологии им. П.П. Ширшова Академии наук СССР. Океанология. БСЭ. 3-е изд. М.: Советская энциклопедия, 1974. Т. 18. С. 1010–1013.
9. Подражанский А.М., Ростарчук М.А., Стефанов Г.А. Марш “Черномора”. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 187 с.
10. Полещук И.П., Генин А.М., Унку Р.Д. и др. Функциональное состояние некоторых физиологических систем организма человека при дыхании неокислородной смесью на глубинах до 400 метров // Физиологический журнал АН Украинской ССР. 1991. Т. 37. № 4. С. 3–11.
11. Скалацкий О.Н., Скалацкий Н.О. 900-атмосферная тест-камера Южного отделения Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Матер. XII Междунар. конфер. “Современные методы и средства океанологических исследований” (МСОИ-2011). М., 2011. Т. 2. С. 222–224.
12. Черкашин С.В. Глубоководные водолазные спуски методом кратковременных погружений // Журн. наука и транспорт. 2011. № (спецвыпуск 2011). С. 70–73.
13. Черкашин С.В. Глубоководные водолазные спуски в автономном режиме. Перспективы развития // Подводные технологии и средства освоения Мирового океана. М.: Издательский дом “Оружие и технологии”, 2011. С. 518–527.
14. Яхонтов Б.О. Технологии глубоководных водолазных спусков // Нептун. Водолазный проект. 2012. № 4. С. 24–31.
15. MacDonald A.G. Hydrostatic pressure physiology // The Physiology and Medicine of diving. Third Edition / Eds. Bennett P.B., Elliott D.H. London: Bailliere Tindal, 1982. P. 157–188.

Development of Hyperbaric Technologies of Oceanologic Researches**B. O. Yakhontov, N. A. Rimsky-Korsakov**

The analysis and substantiation of scientific efficiency of diving and laboratory hyperbaric methods and technologies of oceanologic researches is presented.