

ПОДВОДНЫЕ РОБОТЫ

От торпеды к робо-рыбе



— ВИКРАМ СИНГХ —

2026



Викрам Сингх

Подводные роботы. От торпеды к робо-рыбе

<https://litres.ru/74616689>

SelfPub; 2026

Аннотация

Подводные роботы давно перестали быть просто «торпедами с компьютером». Сегодня инженеры ищут новые формы движения, заимствуя идеи у рыб, глайдеров и мягких биологических систем. В книге «Подводные роботы: от торпеды к робо-рыбе» рассматривается эволюция автономных аппаратов — от классических AUV и подводных глайдеров до биомиметических робо-рыб с гибкими хвостами, искусственными мышцами, распределёнными датчиками и элементами искусственного интеллекта.

Особое внимание уделено плавучести, энергетике, навигации без GNSS, подводной связи, квантовым сенсорам, резидентным док-станциям, работе в роях и длительным автономным миссиям. Отдельная тема — поведение робота при встрече с неизвестным подводным объектом. Книга показывает, почему будущее подводной робототехники связано не с одной идеальной машиной, а с целой экосистемой специализированных автономных аппаратов.

Содержание

Вступление	4
Глава 1. Роботы уходят под воду	13
Человек под водой	16
Робот на кабеле	18
Пуповина подводного робота	20
Свобода без кабеля	22
Подводная торпеда с компьютером	24
Почему под водой так дорога энергия	26
Подводный планер	28
И связь тоже почти исчезает	31
Когда аппарат должен думать сам	32
Четыре семейства подводных машин	34
Почему торпеда — не идеальная рыба	35
Не копировать рыбу, а понять её	37
Главный враг — собственный шум	38
Плавательный пузырь как инженерная загадка	39
Когда недостаток становится частью управления	41
От машины к искусственному организму	42
Конец ознакомительного фрагмента.	44

Викрам Сингх

Подводные роботы. От торпеды к робо-рыбе

Вступление

Подводная робототехника долгое время развивалась по довольно понятной логике. Инженеры брали форму, хорошо зарекомендовавшую себя в торпедах и подводных лодках, устанавливали внутрь аккумуляторы, навигационное оборудование, сонары и компьютер, а затем постепенно увеличивали автономность аппарата. Так появились автономные подводные аппараты — Autonomous Underwater Vehicle (AUV), способные самостоятельно проходить десятки и сотни километров, строить карты дна, обследовать трубопроводы, искать объекты и выполнять научные измерения без постоянного управления с поверхности.

Такой подход оказался чрезвычайно успешным, и отказываться от него никто не собирается. Торпедообразный корпус хорошо обтекается водой, гребной винт остаётся простым и эффективным двигателем, а жёсткая конструкция позволяет разместить значительную полезную нагрузку. Однако по мере развития подводной робототехники стало всё

очевиднее, что не каждая задача требует именно такого аппарата. Если робот должен быстро пройти большое расстояние, классический AUV почти идеален. Но если ему необходимо медленно двигаться возле сложного объекта, работать среди кабелей, кораллов, сетей или морских животных, долго находиться на одной глубине, слушать океан, не заглушая собственными механизмами слабые сигналы, требования становятся совсем другими.

Именно здесь инженеры всё чаще начинают смотреть не на подводную лодку, а на рыбу.

На первый взгляд это кажется почти очевидным. Рыбы существуют в воде сотни миллионов лет и за это время приобрели огромное разнообразие способов движения, стабилизации и восприятия окружающей среды. Одни используют почти всё тело как гибкий движитель, другие концентрируют работу в хвостовой части, третьи управляют водой широкими грудными плавниками. Они способны резко менять направление, зависать возле препятствий, использовать вихри, чувствовать движение воды кожей и сохранять положение без постоянной работы мощных двигателей.

Однако биомиметика начинается не с того, что металлическому аппарату приделывают хвост и придают форму тунца. Простое копирование внешности почти ничего не даёт. Гораздо интереснее понять, какие физические принципы позволяют живой системе столь эффективно взаимодействовать с водой, а затем использовать эти принципы в ин-

женерной конструкции.

Именно поэтому эта книга называется «Подводные роботы: от торпеды к робо-рыбе». Речь идёт не о замене одного типа машины другим, а об изменении инженерного мышления. Классический AUV рассматривает воду главным образом как среду, сопротивление которой необходимо преодолеть. Биомиметический аппарат пытается использовать свойства самой воды — её давление, течение, вихри, подъёмную силу и взаимодействие с гибким телом.

Одним из наиболее интересных примеров такого подхода является плавательный пузырь. Для биолога это привычный орган многих костистых рыб, помогающий регулировать плавучесть. Для инженера газовая полость внутри подводного аппарата обычно выглядит скорее как источник неприятностей, потому что газ сжимается с увеличением глубины. Из-за этого меняется объём аппарата, нарушается нейтральная плавучесть, смещается центр плавучести и может возникнуть неустойчивость.

Но именно здесь появляется центральная идея книги. То, что в традиционной конструкции считается недостатком, иногда можно превратить в часть системы управления. Если изменение объёма газовой камеры вызывает не только изменение плавучести, но и определённый момент относительно центра масс, а движущийся корпус при этом создаёт гидродинамическую подъёмную силу, возникает возможность пассивной стабилизации глубины. Часть работы, кото-

рую обычно выполняют насосы, рули и контроллер, начинает выполнять сама механика аппарата.

Это не означает появления «вечного» или полностью пассивного робота. Энергия всё равно необходима для движения, вычислений, связи, работы сенсоров и коррекции траектории. Однако принцип принципиально важен: хорошая подводная машина не должна постоянно бороться с собственной физикой. Конструкция может быть устроена так, чтобы естественные силы сами помогали сохранять устойчивое состояние.

Та же идея проходит через всю книгу. Мягкий хвост способен использовать собственную упругость вместо того, чтобы каждый его сегмент жёстко контролировался отдельным приводом. Гибкий плавник может одновременно создавать тягу, управлять направлением движения и смягчать контакт с препятствием. Искусственная боковая линия позволяет воспринимать локальное движение воды без постоянного использования активного сонара. Центральный генератор ритма может управлять периодическим движением значительно проще, чем система, рассчитывающая положение каждого элемента корпуса в каждую миллисекунду.

Постепенно подводный робот перестаёт быть просто герметичным контейнером с мотором и компьютером. Его форма, материал, распределение массы, плавучесть и упругость сами становятся частью алгоритма управления. В современной робототехнике такой подход иногда называют морфо-

логическими вычислениями: часть задачи решается не программой, а физическими свойствами тела.

Однако одной хорошей механики недостаточно. Аппарат должен понимать, где он находится, куда движется и что происходит вокруг него. Под водой исчезает привычная для наземной техники инфраструктура. Спутниковая навигация недоступна на глубине, радио работает крайне плохо, акустическая связь имеет небольшую скорость и значительную задержку. Поэтому подводная машина вынуждена быть гораздо самостоятельнее воздушного беспилотника или наземного робота.

Особое значение здесь приобретает навигация. Инерциальная система способна работать полностью автономно, но её ошибка постепенно накапливается. Доплеровский измеритель скорости DVL (Doppler Velocity Log) определяет скорость аппарата относительно морского дна по отражённым акустическим сигналам и позволяет существенно уменьшить накопление навигационной ошибки. Сонар помогает сопоставлять окружающий рельеф с картой, акустические маяки дают внешнюю коррекцию, а при периодическом всплытии аппарат может определить абсолютные координаты с помощью глобальной навигационной спутниковой системы GNSS (Global Navigation Satellite System), включающей GPS, ГЛОНАСС, Galileo и BeiDou.

В ближайшие годы к этому набору всё активнее будут добавляться квантовые технологии — атомные акселерометры,

гироскопы и сверхстабильные часы. Они не создадут магическую систему, которая всегда знает точные координаты, но могут значительно уменьшить дрейф автономной навигации там, где спутниковый сигнал принципиально недоступен.

Для океана это особенно важно. Автономный аппарат может работать подо льдом, на большой глубине или вдали от судов, где ошибка положения в несколько процентов от пройденного пути постепенно превращается в километры. Чем дольше миссия, тем ценнее становится любой способ сохранить точность без внешних ориентиров.

В книге будет рассмотрена и ещё одна задача, которая обычно остаётся в тени научных и инспекционных миссий, — перевозка важных грузов. Под водой редко требуется перевозить тонны груза с высокой скоростью, однако существуют совершенно другие сценарии: доставка датчика на удалённую станцию, транспортировка образца, запасного модуля, элемента оборудования или небольшого дорогого контейнера. В такой задаче на первый план выходит не максимальная скорость, а вероятность того, что аппарат действительно достигнет точки назначения, не потеряет навигацию, сохранит энергетический резерв и сможет выполнить точную стыковку.

Эта логика естественным образом приводит нас от отдельного робота к подводной инфраструктуре. Если аппарат может самостоятельно приходить к станции, заряжаться, передавать данные и получать новую задачу, необходимость ре-

гулярно поднимать его на корабль исчезает. Появляются резидентные AUV, способные месяцами находиться в рабочем районе. Затем возникают сети станций, между которыми могут перемещаться аппараты и грузы. Несколько роботов начинают помогать друг другу с навигацией и распределять задачи, а поверхность превращается лишь в один из уровней большой системы связи.

Поэтому финальная часть книги посвящена уже не отдельной робо-рыбе, а целому океану автономных машин. В нём будут работать разные аппараты: быстрые винтовые AUV, медленные глайдеры, манёвренные робо-рыбы, стационарные станции и надводные ретрансляторы. Вероятно, ни одна конструкция не победит все остальные. Наоборот, подводная робототехника станет всё более разнообразной, а наиболее эффективные системы будут использовать разные типы машин для разных фаз одной миссии.

Есть в книге и более необычная линия рассуждений. Иногда автономная система может встретить объект или явление, которое она не способна классифицировать. Это может быть неизвестный аппарат, редкое животное, необычный акустический источник, ошибка сенсора или природный процесс. В качестве крайнего мысленного эксперимента можно даже представить встречу с неизвестной технологической системой, существование которой сегодня ничем достоверно не подтверждено.

Здесь важна не фантастическая гипотеза сама по себе,

а инженерный принцип. Хороший робот должен уметь работать с неопределённостью. Он не должен автоматически превращать неизвестный объект во врага или насильно относить его к ближайшему известному классу. Намного правильнее сохранить исходные данные, подтвердить наблюдение несколькими независимыми сенсорами, увеличить дистанцию и сообщить человеку, что система столкнулась с тем, чего не понимает.

Такой подход полезен даже в совершенно обычной миссии. Неожидаанное поведение датчика, новый объект на трассе трубопровода или неизвестный источник звука требуют той же научной осторожности: сначала измерение, затем проверка и только после этого объяснение.

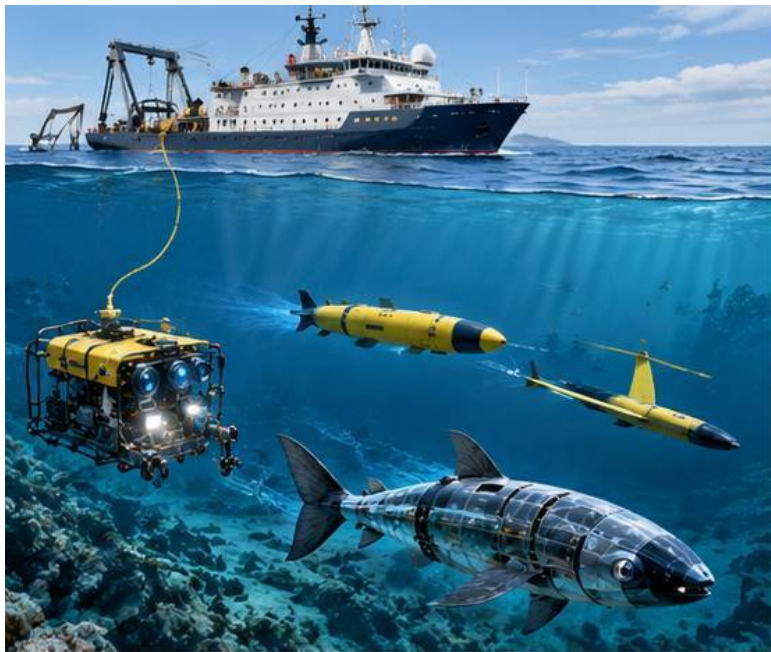
В конечном счёте эта книга посвящена не механической рыбе как эффектной технической игрушке. Она посвящена более широкому переходу — от машины, которая вынуждена постоянно бороться с океаном, к машине, конструкция которой начинает использовать свойства океана себе на пользу. От жёсткого корпуса — к управляемой гибкости, от постоянной тяги — к энергетически экономным режимам, от одного датчика — к распределённому восприятию, от дистанционного управления — к автономности, а от одиночного аппарата — к подводной роботизированной инфраструктуре.

Этот переход уже начался. Пока разные его элементы существуют в отдельных экспериментальных машинах, иссле-

довательских проектах и промышленных системах. Но постепенно они складываются в общую картину.

И если развитие продолжится в том же направлении, робо-рыба окажется не конечной точкой эволюции подводного робота. Она станет только промежуточным этапом на пути к машинам, которые смогут годами жить и работать в океане практически без постоянного присутствия человека.

Глава 1. Роботы уходят под воду



Океан занимает большую часть поверхности Земли, но в инженерном смысле остаётся одним из наименее освоенных пространств планеты. В 2026 году современными методами

было картографировано лишь около 28,7 % мирового океанского дна. И это при том, что спутники давно позволяют подробно наблюдать сушу, космические аппараты исследуют другие планеты, а беспилотные автомобили способны самостоятельно двигаться по городским улицам.

Причина такого парадокса проста: под водой перестают нормально работать многие технологии, к которым человек привык на поверхности. Радиоволны быстро затухают. Спутниковая навигация становится недоступной. Давление растёт примерно на одну атмосферу каждые десять метров глубины. Свет исчезает уже в верхних слоях океана, а на больших глубинах царит почти абсолютная темнота. Любая ошибка в герметизации корпуса может за считанные секунды уничтожить дорогостоящую электронику.

Даже передача информации превращается в проблему. На поверхности беспилотник может отправлять оператору видео в реальном времени по радиоканалу. Подводный робот зачастую вынужден либо тянуть за собой кабель, либо пользоваться медленной акустической связью, либо вообще хранить собранные данные внутри себя до возвращения на поверхность. Поэтому история подводной робототехники — это не просто история уменьшения электроники и совершенствования программного обеспечения. Это история постепенного отказа от привычных технических решений и поиска машин, приспособленных именно к подводному миру. Первоначально инженеры пытались сделать под водой при-

мерно то же, что делали на поверхности: построить прочный корпус, установить двигатель, винт, рули и систему дистанционного управления. Позднее появились автономные аппараты, способные самостоятельно выполнять заранее заданную программу. Затем инженеры научились использовать изменение плавучести вместо постоянной работы двигателя. А сегодня всё чаще возникает ещё более радикальная идея: вместо того чтобы заставлять обычную машину бороться с водой, можно попытаться построить машину, которая использует свойства воды примерно так же, как это делают живые организмы.

Так подводная робототехника постепенно движется от механической торпеды к робо-рыбе.

Человек под водой

Первые этапы освоения глубин были непосредственно связаны с человеком. Водолазные костюмы, батисферы и пилотируемые подводные аппараты позволили исследователям увидеть мир, который прежде был недоступен. Одним из наиболее известных научных аппаратов стал американский **Alvin**, введенный в эксплуатацию в 1964 году. Он участвовал в исследованиях гидротермальных источников, глубоководных экосистем и в изучении обломков *Titanic*. Пилотируемый аппарат имеет очевидное преимущество: исследователь находится непосредственно возле объекта. Человек видит окружающее пространство, способен оценить необычную ситуацию и мгновенно изменить программу работ. Даже очень совершенная автоматика далеко не всегда способна заменить такую гибкость.

Но за это приходится платить. Для человека необходимо создавать прочную герметичную сферу, системы жизнеобеспечения, аварийные устройства, средства связи и спасения. Каждая дополнительная система увеличивает массу и стоимость аппарата. При погружении на километры давление воды становится огромным, поэтому корпус должен выдерживать колоссальные нагрузки. Кроме того, любой пилотируемый аппарат неизбежно ограничен требованиями безопасности экипажа. Логичным следующим шагом стало удаление

человека из самого аппарата.

Робот на кабеле

Так появились дистанционно управляемые подводные аппараты — **ROV**, от английского *Remotely Operated Vehicle*. ROV не обязан перевозить человека. Оператор остаётся на судне, а под воду опускается машина с камерами, прожекторами, двигателями, датчиками и, при необходимости, манипуляторами. Главная особенность ROV — кабель, соединяющий аппарат с судном. Через него можно передавать электрическую энергию, команды управления, телевизионное изображение и данные измерительных приборов. Благодаря этому аппарат способен работать под водой часами и даже сутками, не беспокоясь о разряде собственной батареи. Современный ROV напоминает не столько подводную лодку, сколько летающую платформу, только находящуюся в воде. Несколько электрических движителей позволяют перемещаться вперёд, назад, вверх, вниз и в стороны, зависать возле объекта и точно удерживать положение.

На аппарате можно установить роботизированные руки, резак, пробоотборники, камеры высокого разрешения, сонары и научные приборы. Именно ROV стали одним из главных рабочих инструментов морской нефтегазовой отрасли. Они способны обследовать трубопроводы, клапаны и подводные конструкции, выполнять простые ремонтные операции и работать там, куда отправлять водолаза слишком опас-

но. В океанографии такие аппараты позволяют исследователям видеть глубоководный мир практически в реальном времени. Кабель передаёт изображение на судно, а оператор управляет аппаратом с помощью джойстика. Одним из известных научных ROV стал **Jason**, созданный в Woods Hole Oceanographic Institution. Работы над системой начались в 1980-х годах. Прототип Jason Jr. участвовал в исследовании *Titanic* в 1986 году, а полноразмерный Jason впервые вышел в море в 1988 году.

ROV доказали, что человек вовсе не обязан физически находиться на глубине, чтобы выполнять там сложную научную и техническую работу. Но у этой идеи оказался серьёзный недостаток. Кабель одновременно является главным преимуществом и главным ограничением ROV.

Пуповина подводного робота

В технической литературе кабель, связывающий аппарат с судном, часто называют *tether* или *umbilical*— буквально «пуповиной». Название очень точное. Пока эта пуповина существует, робот практически не ограничен в энергии и постоянно связан с оператором. Но одновременно он остаётся привязанным к кораблю. Кабель имеет массу и гидродинамическое сопротивление. На большой глубине его длина может составлять несколько километров. Течения тянут его в сторону. Движение судна передаётся вниз. Возникает опасность зацепиться за скалу, металлическую конструкцию, затонувшее судно или другой объект.

Для уменьшения этих воздействий применяют сложные кабельные системы и промежуточные аппараты, но полностью избавиться от проблемы невозможно. Есть и другое ограничение: ROV почти всегда требует судна обеспечения. А океанографическое судно — дорогая машина. Ему необходим экипаж, топливо, техническое обслуживание. В результате каждый день работы глубоководного робота может фактически означать ещё и день работы большого корабля. Возникла очевидная мечта: а что, если убрать кабель? Тогда робот перестанет быть дистанционной рукой оператора и станет самостоятельной машиной. Так появился AUV— **Autonomous Underwater Vehicle**, автономный необитаемый

подводный аппарат.

Свобода без кабеля

AUV принципиально отличается от ROV. У него нет постоянной физической связи с оператором. Аппарат несёт источник энергии, компьютер, навигационные приборы и полезную нагрузку внутри собственного корпуса. Перед погружением ему задают район работы, маршрут и программу действий. Затем он уходит под воду самостоятельно.

На первый взгляд это кажется идеальным решением. Нет кабеля — нет сопротивления кабеля. Нет кабеля — нет опасности запутаться. Нет необходимости постоянно держать над аппаратом судно. Один корабль может выпустить AUV, заняться другими работами, а через несколько часов или суток принять его обратно. Но исчезновение кабеля немедленно создаёт целую группу новых проблем. Первая — **энергия**. ROV можно питать с поверхности. AUV должен везти весь запас энергии с собой. Вторая — **связь**. Передать огромный поток видео по обычному радио из-под воды нельзя. Третья — **навигация**. GPS работает только тогда, когда антенна может принимать сигналы спутников. После погружения робот должен определять своё положение другими средствами.

Четвёртая — **автономность принятия решений**. Если ROV неожиданно увидит препятствие, человек повернёт джойстик. Если то же самое произойдёт с автономным аппаратом, решение должен принять его компьютер. Таким обра-

зом, удалив один кабель, инженеры получили сразу несколько фундаментальных задач. Именно они определили развитие подводной робототехники на десятилетия вперёд.

Подводная торпеда с компьютером

Большинство классических AUV внешне действительно напоминают торпеду. Такой корпус выбран не из эстетических соображений. При движении в воде сопротивление становится одним из главных потребителей энергии. Обтекаемая вытянутая форма позволяет уменьшить потери и увеличить дальность хода. Внутри корпуса располагаются аккумуляторы, бортовой компьютер, навигационная система, датчики и электроника. В корме установлен электрический двигатель с гребным винтом. Рули позволяют изменять курс и глубину. Фактически перед нами маленькая автоматическая подводная лодка. Одним из известных семейств таких аппаратов стал **REMUS**, разработанный в Woods Hole Oceanographic Institution. Концепция начала формироваться в 1993 году, а первый аппарат был построен в 1995-м. Первые REMUS использовали акустические маяки, датчики течений, гидрологические приборы и гидролокатор бокового обзора. Позднее в систему вошли инерциальная навигация, GPS для работы на поверхности, спутниковая и беспроводная связь.

Подобная архитектура оказалась чрезвычайно успешной. AUV может двигаться над дном по параллельным маршрутам, подобно тому как сельскохозяйственная машина проходит поле полоса за полосой. Сонар постепенно строит кар-

ту рельефа. Камера фотографирует поверхность. Магнитометр ищет металлические объекты. Другие датчики измеряют температуру, солёность, концентрацию кислорода и химический состав воды.

Но торпедообразный AUV оптимален прежде всего тогда, когда он **движется**. Если требуется медленно обследовать сложную конструкцию, развернуться почти на месте или долго зависать возле одного объекта, достоинства такой схемы начинают превращаться в ограничения. Для этого приходится добавлять подруливающие двигатели. А каждый двигатель означает дополнительную массу, электронику, энергопотребление и шум.

Почему под водой так дорога энергия

Энергетика — одна из центральных проблем автономной подводной машины. На суше электромобиль сравнительно легко может остановиться и зарядиться. Беспилотник возвращается на аэродром. Подводный робот может находиться в сотнях километров от базы и на глубине нескольких километров. Поэтому каждый ватт становится ценным. Основные потребители энергии AUV хорошо известны:

- маршевый двигатель;
- подруливающие устройства;
- гидролокаторы;
- бортовой компьютер;
- камеры и освещение;
- навигационная система;
- связь;
- насосы и приводы систем регулирования плавучести.

Особенно интересен первый пункт. Сопротивление воды быстро растёт с увеличением скорости. Поэтому попытка заставить аппарат двигаться значительно быстрее приводит к резкому увеличению требуемой мощности. Возникает неприятное противоречие. Большая скорость позволяет быстрее обследовать территорию, но быстрее разряжает ба-

тарею. Малая скорость экономит энергию, однако некоторые системы управления начинают работать менее эффективно, а время выполнения миссии растёт. Инженеры начали искать способы двигаться под водой, тратя меньше энергии на постоянную работу двигателя. Одно из самых необычных решений оказалось удивительно простым: иногда винт вообще не нужен.

Подводный планер

Так возникли подводные глайдеры. Их принцип сильно отличается от обычного AUV. Глайдер изменяет собственную плавучесть. Став немного тяжелее вытесняемой воды, он начинает медленно погружаться. Крылья преобразуют часть вертикального движения в горизонтальное. Затем аппарат изменяет объём или перераспределяет внутреннюю жидкость, становится немного легче воды и начинает подниматься. Крылья снова превращают вертикальное движение в поступательное.

В результате траектория напоминает длинную пилу: вниз и вперёд; вверх и вперёд; снова вниз и вперёд. Маршевый винт при этом может вообще отсутствовать. Такой аппарат чрезвычайно медленный, но ему не нужно непрерывно вращать мощный гребной винт. Именно поэтому глайдеры способны выполнять очень длительные океанографические миссии. Здесь впервые особенно ярко проявился принцип, который станет одним из главных для всей этой книги: **не обязательно преодолевать физику среды силой — иногда выгоднее заставить саму физику выполнять часть работы.** Глайдер использует плавучесть и гидродинамическую подъёмную силу вместо постоянной тяги двигателя. Это уже шаг от традиционной машины к конструкции, в которой окружающая вода становится частью механизма

движения.

Под водой нет
GPS

Энергия — не единственная проблема AUV. Не менее сложна навигация. На поверхности аппарат может всплыть, принять сигнал спутников и точно определить координаты. Под водой спутниковый сигнал недоступен. Поэтому используются несколько методов одновременно. **Инерциальная навигационная система** измеряет ускорения и угловые движения аппарата и на их основе рассчитывает изменение координат. Но даже небольшие ошибки датчиков постепенно накапливаются. **DVL — Doppler Velocity Log** измеряет скорость аппарата относительно морского дна с помощью эффекта Доплера. **Глубиномер** определяет давление и позволяет оценивать глубину. **Магнитометр** помогает определить направление относительно магнитного поля Земли.

Акустические маяки позволяют вычислять положение аппарата по времени прохождения звукового сигнала. На небольших расстояниях может применяться навигация относительно объектов дна. Современные системы объединяют данные нескольких датчиков. Бортовой компьютер непрерывно вычисляет наиболее вероятное положение машины. Но ошибка полностью не исчезает. Чем дальше аппарат находится под водой без внешней коррекции, тем сложнее точно знать, где именно он оказался. Для подводного робота вопрос «где я?» гораздо труднее, чем для автомобиля

или воздушного беспилотника.

И связь тоже почти исчезает

Вторая фундаментальная особенность подводного мира — трудность связи. Обычные радиосистемы, мобильные сети и Wi-Fi под водой практически неприменимы на значительных расстояниях. Поэтому для дальней связи используют звук. Акустический модем может передавать команды и данные через толщу воды. Но возможности такого канала несопоставимы с привычными наземными сетями. Скорость передачи невелика, задержки велики, качество связи зависит от температуры, солёности, глубины, рельефа дна и множества других факторов. Передать несколько команд возможно. Передавать непрерывный поток видео высокого разрешения уже гораздо сложнее.

Поэтому настоящий автономный робот должен уметь работать **без постоянного разговора с человеком**. Это принципиальное отличие от многих наземных беспилотников, которые формально могут называться автономными, но фактически почти непрерывно остаются частью большой радиосети. Под водой сети может не быть. Робот остаётся один.

Когда аппарат должен думать сам

Представим простую миссию. AUV должен пройти вдоль подводного кабеля и проверить его состояние. На карте указан маршрут. Компьютер знает начальные координаты. Сонар обнаруживает кабель. Но затем ситуация меняется. Часть кабеля скрылась под осадком. Возникло сильное течение. Перед аппаратом появилась скала. Один из датчиков начал выдавать сомнительные значения. Запас энергии оказался меньше расчётного. ROV в такой ситуации спасает оператор. AUV должен решить проблему самостоятельно. Он может изменить маршрут. Снизить скорость. Перейти на другой датчик. Прервать миссию. Начать всплытие. Или попытаться продолжить обследование.

Именно здесь понятие «робот» становится намного важнее понятия «подводный аппарат». Автономность означает не просто отсутствие кабеля. Она означает способность машины оценивать ситуацию и выбирать действия. По мере развития вычислительной техники это различие становится всё более заметным. Ранний AUV в основном выполнял заранее записанную программу: пройти до точки А, затем до точки В, повернуть, пройти следующую линию и всплыть. Современный аппарат постепенно превращается в систему, способную анализировать данные непосредственно во время миссии.

Например, робот может обнаружить необычный объект на сонарном изображении и самостоятельно изменить маршрут, чтобы рассмотреть его подробнее. В перспективе такие системы должны научиться действовать почти так же, как опытный исследователь: не только выполнять план, но и понимать, когда обнаружено нечто, ради чего стоит от этого плана отклониться.

Четыре семейства подводных машин

К началу XXI века сформировалось несколько основных типов подводных аппаратов.

Тип	Связь с оператором	Основное преимущество	Главное ограничение
Пилотируемый аппарат	человек находится внутри	максимальная гибкость решений	стоимость и безопасность экипажа
ROV	постоянный кабель	энергия и управление в реальном времени	зависимость от кабеля и судна
AUV	автономная работа	свобода движения	ограниченный запас энергии и связь
Глайдер	автономная работа	чрезвычайно высокая продолжительность миссии	малая скорость и ограниченная маневренность

Ни один тип не является абсолютной заменой остальных. ROV превосходит для ремонта оборудования. AUV удобен для картографирования. Глайдер незаменим для длительного мониторинга больших районов океана. Пилотируемый аппарат остаётся важным инструментом сложных исследований, где непосредственное восприятие человеком имеет особую ценность. Но одновременно всё заметнее становится ещё одно направление. Оно пока не укладывается полностью ни в одну из традиционных категорий.

Почему торпеда — не идеальная рыба

Большинство AUV создавались по логике подводной лодки или торпеды. Прочный корпус. Электрический двигатель. Гребной винт. Рули. Аккумулятор. Эта архитектура прекрасно работает и ещё долго будет использоваться. Но если посмотреть на живой океан, возникает очевидный вопрос. Почему почти ни одно быстро плавающее морское животное не использует вращающийся винт? Рыба изгибает тело. Тунец работает хвостом. Скаты создают волну огромными грудными плавниками. Угорь заставляет изгиб проходить вдоль всего тела. Медуза периодически изменяет форму своего купола. Природа решает задачу движения в воде совсем иначе. Это не означает, что природа автоматически создаёт лучший механизм для любой инженерной задачи. Гребной винт чрезвычайно эффективен и технологичен.

Но живая система обладает качествами, которые особенно интересны для автономной робототехники. Она может быть тихой. Она способна резко менять направление. Гибкое тело лучше переносит столкновения. Плавники одновременно создают тягу и управляют движением. Нет открытого быстро вращающегося винта, на который могут намотаться водоросли, леска или сеть. Наконец, животное использует не один

отдельный движитель, а взаимодействие всего тела с окружающей водой. Именно поэтому исследователи всё чаще обращаются к **биомиметике**— созданию технических систем, использующих принципы, найденные в живой природе.

Не копировать рыбу, а понять её

Слово «биомиметика» иногда создаёт неправильное впечатление. Кажется, будто инженер должен внимательно рассмотреть рыбу и изготовить её механическую копию. На самом деле задача гораздо интереснее. Роботу совершенно не обязательно иметь чешую, жабры или точно повторять скелет животного. Важно понять принцип. Почему определённая форма тела уменьшает сопротивление? Как изгиб хвоста создаёт тягу? Почему положение плавников обеспечивает устойчивость? Как рыба сохраняет глубину? Как она воспринимает движение воды? Какие функции выполняет плавательный пузырь? После этого биологический механизм можно реализовать совершенно другими техническими средствами.

Мышцу заменит электропривод. Нервную систему — микроконтроллер. Органы чувств — набор электронных датчиков. Хрящ — эластичный полимер. Но физический принцип взаимодействия с водой может остаться тем же. Так появляется не механическая копия животного, а новая инженерная машина.

Главный враг — собственный шум

Особенно привлекательна биомиметика для задач, где робот должен не просто находиться под водой, а **слушать океан**. Обычный электродвигатель создаёт вибрации. Редуктор создаёт вибрации. Насос создаёт вибрации. Гребной винт возбуждает воду и при определённых режимах может создавать кавитационный шум. Для многих инженерных задач это не критично. Но представим аппарат, задача которого — регистрировать слабые сигналы китообразных, наблюдать за поведением рыб или работать в составе чувствительной гидроакустической системы. Тогда робот начинает слышать прежде всего самого себя. Получается почти анекдотическая ситуация: мы отправляем машину слушать океан и снабжаем её набором механизмов, которые мешают ей слушать.

Отсюда возникает идея максимально тихого аппарата. Убрать редукторы. Уменьшить число насосов. Отказаться от постоянно работающих подруливающих винтов. Использовать плавные деформации гибкого корпуса и плавников. Но здесь инженеры сталкиваются с новой трудностью. Обычная рыба — не просто хорошо обтекаемый объект с хвостом. Это сложная динамическая система.

Плавательный пузырь как инженерная загадка

Особое место в этой системе занимает плавательный пузырь костистых рыб. На первый взгляд идея кажется почти идеальной для робота. Внутри корпуса имеется газовая полость. Изменяя её объём, можно изменять среднюю плотность аппарата и тем самым регулировать плавучесть. Не нужно постоянно тратить энергию на вертикальную тягу. Робот словно превращается в маленький подводный аэростат. Но именно здесь обнаруживается физический парадокс. С увеличением глубины давление растёт. Газ сжимается. Объём пузыря уменьшается. Вытесняется меньше воды. Сила Архимеда уменьшается. Аппарат начинает тонуть ещё сильнее. При подъёме происходит обратное. Давление падает.

Газ расширяется. Плавучесть увеличивается. Аппарат начинает всплывать ещё быстрее. Простая газовая полость оказывается не стабилизатором, а потенциальным источником неустойчивости. Живая рыба имеет сложные физиологические механизмы, позволяющие управлять количеством газа. Механический робот такими возможностями от природы не обладает. Поэтому долгое время инженерный подход был очевиден: если естественная система нестабильна, нужно добавить насос, клапан, балластную камеру и электрон-

ный регулятор. То есть снова компенсировать физику активным устройством. Но существует и другой путь. Не бороться с изменением объёма пузыря. Использовать его.

Когда недостаток становится частью управления

Представим, что изменение объёма газовой полости не только меняет плавучесть, но и немного изменяет положение аппарата. При погружении робот наклоняет нос вверх. При подъёме — вниз. Если аппарат при этом движется вперёд, изменение угла атаки создаёт гидродинамическую силу. При слишком большом погружении эта сила направляет машину вверх. При избыточном подъёме — вниз. Получается необычная система: **глубина изменяет давление; давление изменяет объём; объём изменяет дифференциал; дифференциал изменяет угол атаки; набегающий поток создаёт корректирующую силу.** То, что первоначально выглядело источником неустойчивости, при правильной конструкции может стать частью обратной связи.

Для классического инженера подобная идея выглядит почти подозрительно. В системе нет мощного исполнительного механизма, который непрерывно измеряет ошибку и силой возвращает аппарат на заданную глубину. Часть регулирования выполняет сама механика аппарата во взаимодействии с водой. Именно эта идея станет центральной темой следующих глав.

От машины к искусственному организму

История подводной робототехники показывает любопытную последовательность. Сначала человек погружался под воду сам. Затем оставил своё тело на поверхности, но сохранил кабель управления. Потом разрезал кабель и передал машине простую программу. Затем научил её самостоятельно ориентироваться. Следующим шагом стало использование плавучести вместо непрерывной работы двигателя. Теперь начинается новый этап: сама конструкция робота постепенно становится частью системы управления. Гибкое тело может менять гидродинамику. Плавник становится одновременно движителем и рулём. Эластичная полость реагирует на давление. Материал конструкции способен накапливать и возвращать энергию деформации.

Датчики перестают быть отдельными приборами и могут распределяться по всей поверхности корпуса. Программное управление всё теснее соединяется с механическими свойствами машины. Граница между корпусом, движителем, датчиком и регулятором начинает размываться. Это уже совсем другая инженерная философия. Классическая подводная машина старается заставить воду подчиниться работе механизмов. Биомиметическая машина пытается сделать

свойства воды частью собственного устройства. И именно поэтому путь от ROV и торпедообразного AUV к робо-рыбе — не просто изменение внешнего вида. Это переход от одной архитектуры к другой. От аппарата, который существует **вопреки среде**, к аппарату, который работает **вместе со средой**.

В следующей главе мы разберём физику этого взаимодействия: плавучесть, давление, центр масс, центр плавучести, гидродинамическое сопротивление, крен и дифферент. Без этих понятий невозможно понять, почему подводный робот сохраняет равновесие — или внезапно его теряет.

Конец ознакомительного фрагмента.

Текст предоставлен ООО «Литрес».

Прочитайте эту книгу целиком, [купив полную легальную версию](#) на Литрес.

Безопасно оплатить книгу можно банковской картой Visa, MasterCard, Maestro, со счета мобильного телефона, с платежного терминала, в салоне МТС или Связной, через PayPal, WebMoney, Яндекс.Деньги, QIWI Кошелек, бонусными картами или другим удобным Вам способом.