


Научная статья

УДК 551.46.083
EDN: XYGOUJ

Управление автономным подводным позиционным зондом-профилемером

О. Ю. Кочетов , А. Г. Островский

Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН, Москва, Россия
 *ok@noiselab.ru*

Поступила в редакцию 12.09.2025; одобрена после рецензирования 29.09.2025;
принята к публикации 28.01.2026.

Аннотация

Цель. Разработка современной системы управления автономным подводным аппаратом, предназначенным для проведения большой серии измерений вертикальных профилей параметров водной среды в автоматическом режиме на заякоренной станции с возможностью беспроводной передачи результатов в режиме квазиреального времени и удаленного управления – цель настоящей работы. *Методы и результаты.* Рассмотрен состав системы управления: электроника, встроенное программное обеспечение, программно-технические средства передачи данных и удаленного управления, а также пользовательское прикладное программное обеспечение. Приведены характеристики аппаратных компонентов. Подробно описаны структура, функциональные особенности и детали реализации программных компонентов. Предложен специализированный протокол для передачи данных большого объема через сеть сотовой связи.

Выводы. Разработана система управления подводным зондом-профилемером, в которой реализованы автоматические режимы работы, передачи данных и взаимодействия с пользователем. На базе этой системы создан автономный роботизированный носитель океанологических датчиков со встроенной лебедкой, названный «Винчи», который предназначен для регулярных измерений вертикальных профилей параметров водной среды от дна до поверхности раздела вода – воздух в акваториях морского шельфа, озерах и водохранилищах. В составе системы управления зондом-профилемером разработаны специальные программно-технические средства навигации и связи, что позволило впервые в отечественной практике решить задачу удаленного управления режимом мониторинга водной толщи, включая корректирование сроков и глубины измерений, а также состава передаваемых аппаратом информационных сведений в зависимости от погодных и иных условий.


Ключевые слова: оперативная океанология, автоматизация измерений, управление автономным подводным позиционным аппаратом, электроника, программное обеспечение, передача данных, удаленное управление


Благодарности: авторы выражают глубокую благодарность коллегам – Д. А. Швоеву, главному конструктору «Винчи», С. В. Волкову, разработчику электроники «Винчи», А. Г. Зацепину, научному руководителю ежегодной экспедиции ИО РАН «Черное море», в ходе которой осуществлялись испытания и опытная эксплуатация «Винчи». Работа подготовлена по материалам исследований в рамках темы государственного задания FMWE-2024-0024 при поддержке гранта РФФ № 23-17-00056.

Для цитирования: Кочетов О. Ю., Островский А. Г. Управление автономным подводным позиционным зондом-профилемером // Морской гидрофизический журнал. 2026. Т. 42, № 2. С. 323–341. EDN XYGOUJ.

© Кочетов О. Ю., Островский А. Г., 2026

Control System for a Moored Autonomous Underwater Profiler

O. Yu. Kochetov , A. G. Ostrovskii

Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
 ok@noiselab.ru

Abstract

Purpose. The purpose of the work consists in presenting the design and implementation of a modern control system for an autonomous underwater profiler intended to conduct a large series of measurements of the vertical profiles of aquatic environment parameters in an automatic mode at a moored station, and to provide wireless data transmission in quasi-real time and remote control.

Methods and Results. The following components of the tethered control system were considered: electronics, embedded software, software and hardware for data transmission and remote control, as well as the end-user application software. The hardware technical characteristics were presented. The structure, functional features and implementation details of software components were scrupulously described. A specialized communication protocol providing reliable transmission of large volumes of data via cellular networks was proposed.

Conclusions. A control system for an underwater profiling probe which implements automatic modes of operation, data transmission, and user interaction has been developed. This system served as a basis for constructing an autonomous robotic platform for oceanographic sensors with a built-in winch called “Winchi”. It is designed for regular measurements of vertical profiles of the aquatic environment parameters from the bottom to the water-air interface in the sea shelf areas, lakes, and reservoirs. Special software and hardware instruments for navigation and robust communication have been developed as a part of the probe-profiler control system; and for the first time in domestic practice, it made it possible to solve the problem both of remote reconfiguration of the water column monitoring mode including adjustment of the measurement time and depth, and the composition of the information transmitted by the device depending on weather and other conditions.

Keywords: operational oceanography, measurement automation, control of an autonomous underwater system, instrumentation electronics, embedded software, data transmission, remote control

Acknowledgments: The authors are very grateful to their colleagues: D. A. Shvoev, chief designer of “Winchi”; S. V. Volkov, electronics developer of “Winchi”; and A. G. Zatsepin, scientific director of the annual expeditions of IO RAS “Black Sea” during which the “Winchi” device was tested and trialed in operation. The study was carried out based on the research data obtained within the framework of state assignment of IO RAS FMWE-2024-0024 and with support of the RSF grant No. 23-17-00056.

For citation: Kochetov, O.Yu. and Ostrovskii, A.G., 2026. Control System for a Moored Autonomous Underwater Profiler. *Physical Oceanography*, 33(2), pp. 366-383.

Введение

Современные океанологические позиционные зонды-профилемеры представляют собой совершенные технические средства, используя которые исследователи получают качественно новую информацию о временной изменчивости вертикальных распределений гидрофизических, биоокеанологических и гидрохимических характеристик [1]. Автономные подводные аппараты данного класса устанавливаются на длительные сроки, иногда до нескольких месяцев, в ключевых географических точках акваторий. Их важным преимуществом является синхронность мультипараметрических измерений. При этом наибольший эффект достигается при исследовании мелкомасштабных процессов и тонкой структуры вертикальной стратификации водной толщи, особенно

верхнего деятельного слоя океана. Применение зондов-профилемеров, которые могут передавать данные измерений в оперативном режиме потребителю, превращается в увлекательное наблюдение с высокой степенью детализации за эволюцией и динамикой процессов в океане в реальном времени.

В процессе создания системы управления зонда-профилемера разработчикам нужно решить несколько задач, а именно:

- оптимизации с целью увеличения автономности работы от аккумулятора ограниченной емкости;

- обеспечения функциональной устойчивости в заданных режимах в течение всего периода постановки в условиях воздействия морских течений, поверхностных и внутренних волн;

- поддержания связи с оператором для обмена телеметрической информацией, данными измерений и приема команд для онлайн-диагностики состояния аппарата и модификации режима зондирования;

- системной интеграции нескольких измерительных каналов для разнородных океанологических датчиков от разных фирм-производителей, причем регистрирующая подсистема должна обеспечивать достаточную пропускную способность для работы с датчиками, которые обладают частотой опроса порядка 10 Гц;

- реализации беспроводного доступа к системе управления, в том числе в целях отладки, программирования и контроля.

В связи с этим задача создания системы управления зонда-профилемера должна решаться комплексно, учитывая взаимодействие всех (включая внешние) подсистем, объединенных на уровне программного обеспечения (ПО).

Основное назначение системы управления зонда-профилемера заключается в выполнении автономной миссии, которая представляет собой последовательность погружений и всплытий аппарата на определенные горизонты, от самого верхнего до самого нижнего и обратно, в заданные моменты времени. Измерения интересующих параметров морской среды проводятся во время движения, а собранные данные измерений должны передаваться удаленному оператору при каждом всплытии на поверхность воды. Объем и состав передаваемой информации может изменяться по командам оператора, принятым во время сеансов связи, когда аппарат находится в надводном положении. В ходе автономной работы под водой система управления зонда-профилемера выполняет действия для достижения запрограммированных показателей миссии, которые также могут корректироваться в удаленном режиме при всплытии аппарата.

Движение зондов-профилемеров может осуществляться по-разному, например за счет изменения собственной плавучести¹ или с помощью лебедки². Последний способ представляется предпочтительным, поскольку позволяет четче контролировать положение аппарата под водой.

¹ Mauritzen A., Lilleøkdal F. System and method for transmitting subsea parameters // US Patent US20240124099A1. 2024.

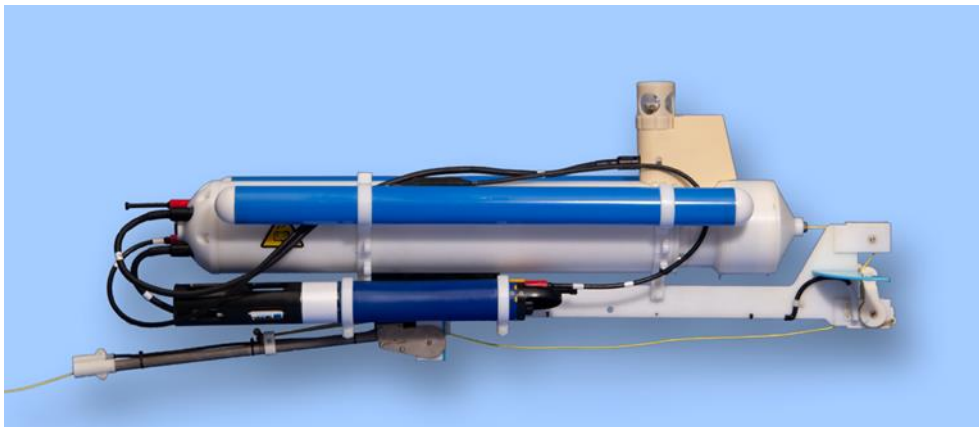
² Kawahara H., Nakamura T., Ohta J. Underwater rising/falling device // US Patent US9102390B2. 2014.

Цель настоящей работы – создание комплекса удобных, соответствующих современным требованиям программных средств для эффективного и надежного управления длительными автономными миссиями автоматического зонда-профилера. Разработанный комплекс состоит из трех основных компонентов ПО: встроенного, прикладного, а также для связи с зондом, передачи и хранения данных, мониторинга его состояния во время выполнения миссии и удаленного управления.

Зонд-профилимер «Винчи»

Первым в Институте океанологии (ИО) РАН автоматическим зондом-профилимером лебедочного типа стал аппарат, получивший название «Винчи» [2, 3], который уже успешно применяется для научных исследований в акваториях морского шельфа [2, 4] и во внутренних водоемах [5]. «Винчи» имеет положительную плавучесть и поэтому под водой натягивает трос с лебедки, нижний конец которого крепится к подводной опоре или донному якорю.

Конструктивно зонд-профилимер построен по схеме «тримаран» (рис. 1). Он состоит из трех цилиндрических корпусов, креплений и подвеса. На основном аппаратном корпусе крепятся кронштейны, которые несут боковые корпуса-поплавки. Два боковых поплавка меньшего диаметра разнесены по сторонам от среднего корпуса и немного приподняты. Основной корпус разделен на два отсека: сухой – для размещения аккумуляторной батареи, электропривода, электроники системы управления и океанологических датчиков; мокрый – для барабана лебедки с тросом.



Р и с. 1. Внешний вид зонда-профилера «Винчи»
F i g. 1. The “Winchi” profiler exterior

На среднем корпусе на креплениях снизу монтируются измерительные датчики, сверху установлен модуль связи и навигации. Под водой аппарат стремится сохранить горизонтальную ориентацию благодаря специально разработанному подвесу (рама с роликами, по которым протянут трос), направляющей трубке для троса, расположенной внизу на шарнире примерно под центром тяжести аппарата.

Схема постановки «Винчи» с гидроакустическим размыкателем представлена на рис. 2. Характерная глубина постановки определяется длиной троса и составляет 30–40 м. Результаты неоднократных испытаний в пресных водоемах и море показывают, что емкости встроенной аккумуляторной батареи хватает на 400–500 зондирований в зависимости от таких факторов, как глубина постановки, скорость течения и плотность воды.

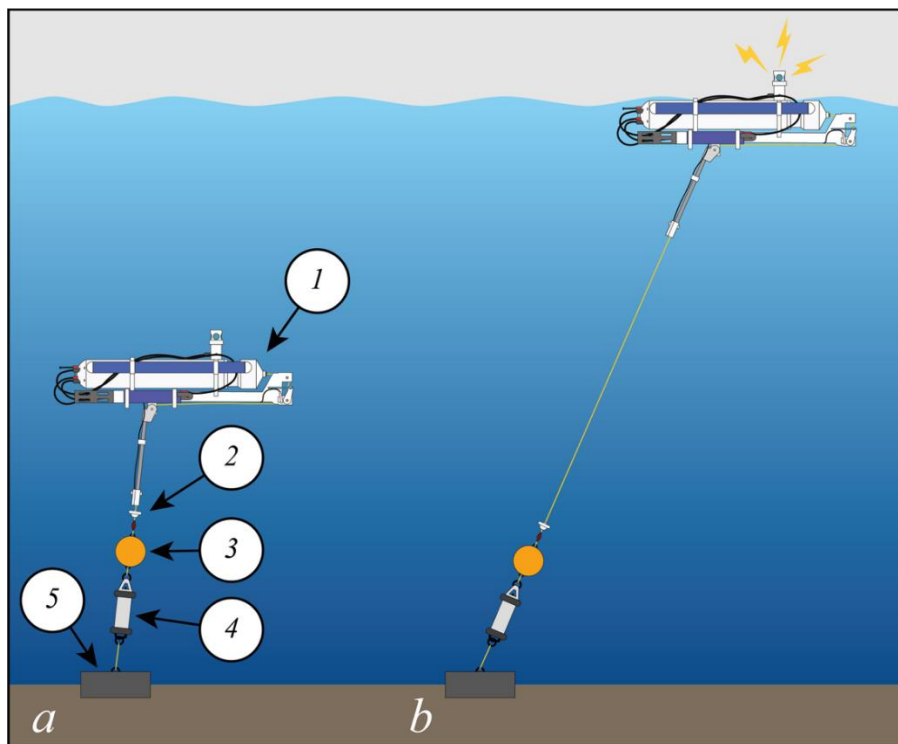
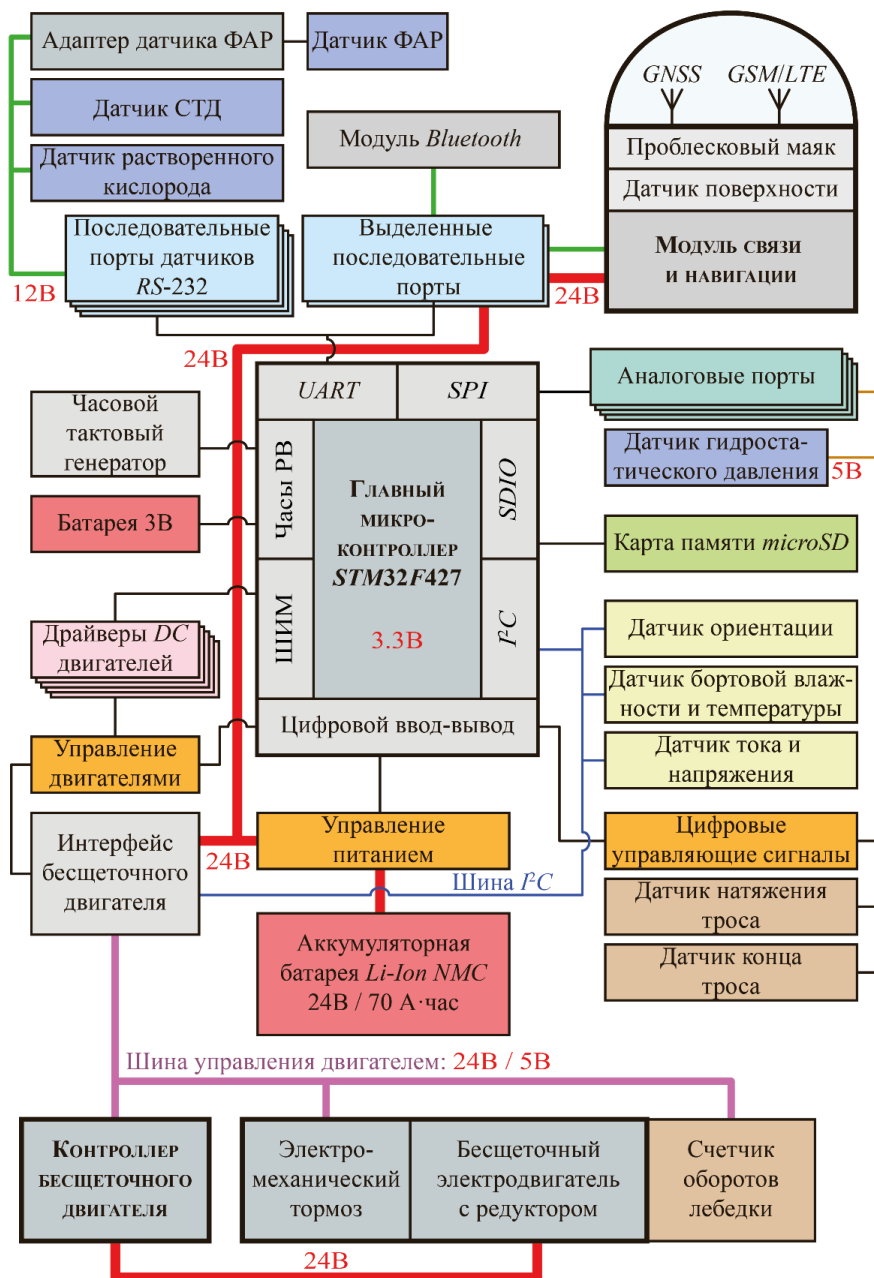


Рис. 2. Схема постановки зонда-профилера «Винчи»: *a* – парковочная позиция, *b* – передача данных на поверхности; 1 – зонд-профилимер; 2 – магнитный датчик конца троса; 3 – плавучесть; 4 – гидроакустический размыкатель; 5 – груз

Fig. 2. Scheme of the “Winchi” profiler deployment: *a* – parking position; *b* – data transmission at sea surface; 1 – the “Winchi” profiler, 2 – rope end magnetic sensor; 3 – underwater float; 4 – hydroacoustic release; 5 – weight

«Винчи» имеет положительную плавучесть около 30 Н и для всплытия с глубины на поверхность воды должен разматывать трос с барабана лебедки. Боковые корпуса-поплавки придают аппарату дополнительную остойчивость в надводном положении, обеспечивая подъем антенн связи над водой. По окончании сеанса связи «Винчи» переходит к погружению, для этого лебедка наматывает трос на барабан до тех пор, пока не получит сигнал от магнитного датчика конца троса, устанавливаемого над донной частью станции. Погружение является наиболее энергозатратной фазой движения аппарата. В парковочной позиции над дном «Винчи» переходит в режим ожидания с низким энергопотреблением до поступления сигнала активации от встроенных часов реального времени.



Р и с. 3. Функциональная схема аппаратного обеспечения зонда-профилера «Винчи»
 F i g. 3. Functional scheme of the “Winchi” profiler hardware

Последовательность действий погружение – сон – всплытие – передача данных называется рабочим циклом, а каждое действие – фазой рабочего цикла. Во время движения сквозь толщу воды аппарат проводит измерения различных параметров водной среды. Набор измеряемых параметров определяется установленными датчиками.

Система управления, которая описана ниже, разработана специально для зонда-профилера «Винчи». Разработка основана на оригинальной унифицированной аппаратно-программной платформе системы управления автономных подводных профилирующих аппаратов [6]. Со времени опубликования указанной работы как аппаратное, так и программное обеспечение были специально адаптированы для решения задачи управления автономным подводным зондом-профилером «Винчи» [6], как будет показано ниже.

Аппаратное обеспечение зонда-профилера

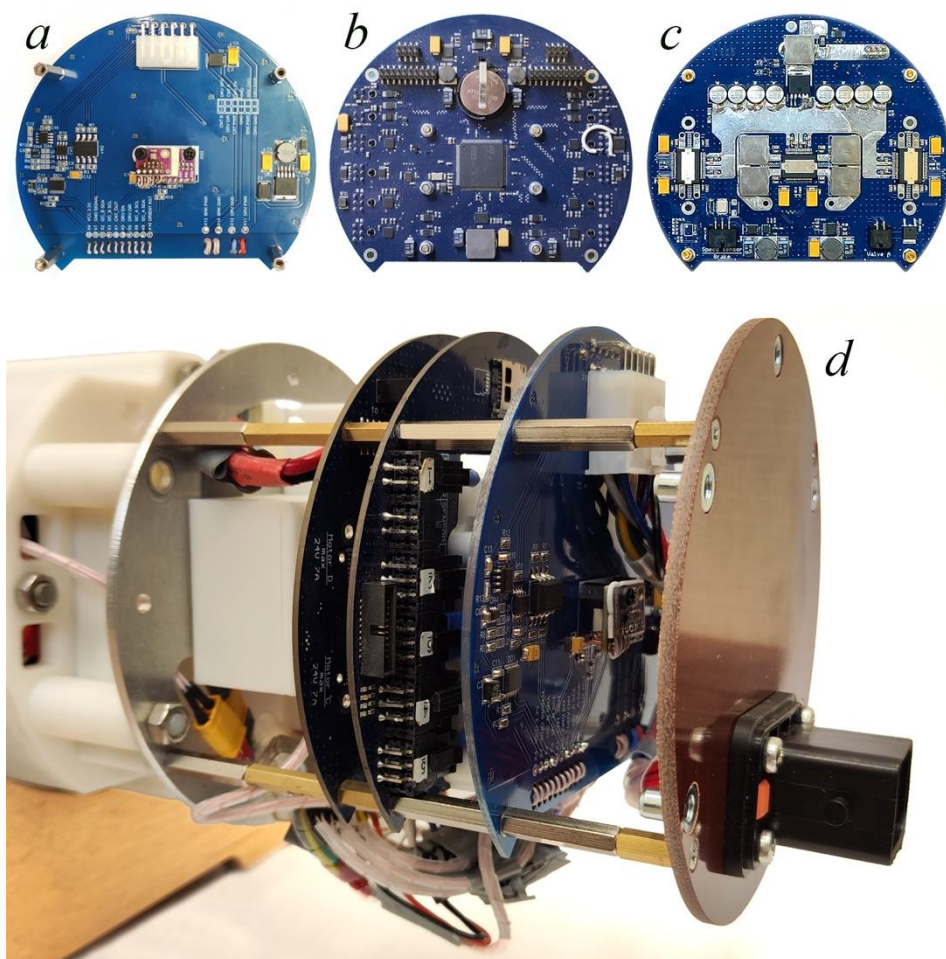
Основой аппаратно-программной платформы зонда-профилера «Винчи» является комплект управляющей электроники. Он состоит из двух модулей: главного процессорного модуля (ГПМ), который размещается внутри основного герметичного корпуса прибора, и модуля связи и навигации (МСН), который монтируется в отдельном небольшом герметичном корпусе снаружи и подключается к ГПМ кабелем. Печатные платы комплекта управляющей электроники были изначально спроектированы специально для использования в автоматических зондах-профилерах ИО РАН [6]. Технических возможностей этой электроники достаточно для создания на ее базе разнообразных устройств, включая океанский глайдер.

Последняя, четвертая версия комплекта аппаратного обеспечения была создана в 2025 г. Она хорошо зарекомендовала себя как по удобству монтажа и эксплуатации, так и по надежности работы. Функциональная схема аппаратного обеспечения показана на рис. 3.

Главный процессорный модуль. Данный модуль состоит из двух печатных плат – силовой и процессорной. К ним добавлена третья плата с дополнительными интерфейсами. Все платы объединяются в одну сборку (рис. 4), которая затем помещается в защитный пластиковый кожух с окнами для доступа к быстросъемному накопителю данных *microSD* и отладочному порту.

В качестве центрального процессора применен микроконтроллер общего назначения *STM32F427ZITx*. Это высокопроизводительный 32-разрядный *ARM*-процессор с большим объемом оперативной и флеш-памяти, который поддерживает различные периферийные устройства и интерфейсы.

Для управления подводным аппаратом ГПМ предоставляет возможности подключения до 6 двигателей постоянного тока, четырех аналоговых датчиков, четырех внешних измерительных инструментов через порты *RS-232*, двух цепочек *I²C* устройств. Для связи с прибором в ближнем поле предусмотрен беспроводной модуль *Bluetooth*, для дальней связи используется внешний модуль связи и навигации, который может предоставлять доступ в сеть *GSM/LTE* либо УКВ-радиоканал протокола *LoRaWAN*. Накопителем данных служит съемная карта памяти *microSD*, поддерживаются файловые системы *FAT32* и *ExFAT*. Также имеются цифровые линии ввода/вывода для дополнительных устройств и датчиков. Для питания ГПМ необходим источник с номинальным напряжением 24 В.



Р и с. 4. Печатные платы и сборка ГПМ: *a* – интерфейсная плата; *b* – процессорная плата; *c* – силовая плата; *d* – сборка ГПМ

F i g. 4. Main processing module (MPM) assembly and printed circuit boards (PCBs): *a* – interface PCB; *b* – processor PCB, *c* – power PCB, *d* – MPM assembly

Ценной особенностью ГПМ является возможность гибкого управления питанием периферийных устройств. Каждый потребитель энергии в системе может быть независимо выключен или включен. Это позволяет эффективно управлять энергопотреблением, создавая оптимальные конфигурации для различных режимов. Так, например, когда прибор находится на глубине, использовать средства беспроводной связи не представляется возможным, поэтому они полностью обесточиваются. Прочие потребители электроэнергии, даже маломощные, тоже могут быть отключены при необходимости. Благодаря этому реализован спящий режим, когда потребляемый аппаратурой ток снижается до значения менее 2 мА.

Модуль связи и навигации. Этот малогабаритный электронный модуль играет важнейшую роль в оперативной работе с зондом-профилемером. Его главной функцией является дальняя связь для передачи полученных в ходе работы прибора данных и приема управляющих команд от удаленного оператора. Возможность регулярной передачи данных позволяет просматривать полученные измерения и телеметрию в квазиреальном времени, а благодаря двусторонней связи становится возможным управлять поведением аппарата в оперативном режиме, изменяя при необходимости параметры заложенной в зонд программы автоматической работы.

Модуль оснащен собственным микроконтроллером *STM32F103RETx*, ресурсов которого достаточно для эффективной работы с модемом *GSM/LTE Quectel-EC21* и управления остальными периферийными устройствами (рис. 5).

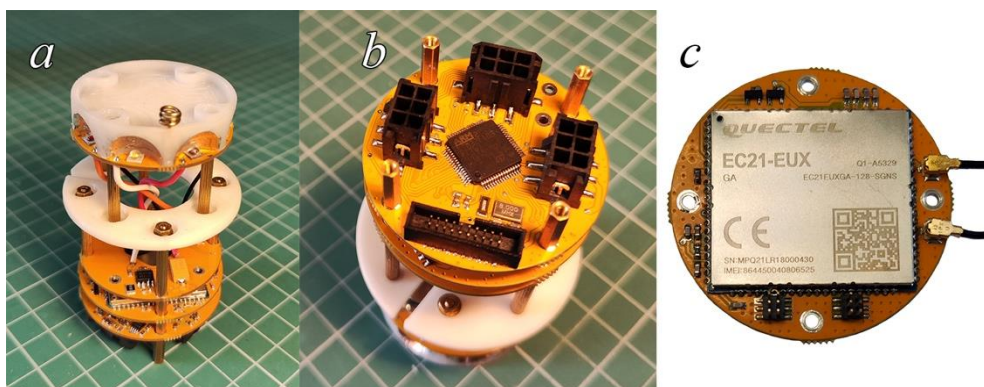


Рис. 5. Электроника МСН: *a* – сборка модуля; *b* – процессорная плата; *c* – модем

Fig. 5. Communication and navigation module (CNM) electronics: *a* – module assembly; *b* – processor PCB; *c* – PCB modem

Помимо средств связи модуль содержит датчик электропроводности среды, который позволяет определить момент подъема антенн над поверхностью воды при всплытии. Также модуль обеспечен приемником *GNSS*, благодаря которому определяются географические координаты аппарата в надводном положении. Эта информация передается в составе телеметрии и используется для автоматического оповещения, если расстояние от точки постановки до текущего местоположения аппарата превысит заданное пороговое значение.

Для облегчения визуального поиска во время подъемных работ модуль имеет встроенный светодиодный проблесковый маяк с излучателями белого и красного цвета, который расположен в верхней части модуля под прозрачным защитным колпаком.

Структура системы управления зонда-профилемера «Винчи»

Разработка эффективной системы управления зонда-профилемера «Винчи» включала в себя четыре базовых блока, которые определялись назначением прибора, а их содержание модифицировалось по результатам натурных испытаний. Мы рассматриваем их как четыре основания системы управления:

- архитектура ядра,
- поведение,
- связь,
- интерфейсы пользователя.

Под архитектурой ядра понимается устройство встроенного ПО, которое исполняется микропроцессорами комплекта управляющей электроники и полностью определяет поведение аппарата в автоматическом режиме.

Поведением аппарата называется набор алгоритмов действий, которые аппарат выполняет для достижения целей каждой фазы рабочего цикла.

Связь включает в себя определение протокола передачи данных и набор серверного ПО, которое обеспечивает функции приема данных, хранения и доступа к полученным данным, а также генерирования и отправки команд удаленного управления.

Интерфейсами пользователя является прикладное ПО для пользовательских устройств, например ПК или смартфона, с помощью которых выполняются обслуживание, диагностика и программирование аппарата перед постановкой, а также контроль за ходом автоматической работы и удаленное управление.

Архитектура ядра системы управления. Построение надежной, устойчивой архитектуры ядра системы управления – ключевой этап разработки. Поскольку с самого начала работы над ядром планировалось создание на его базе различных зондов-профилемеров, отличающихся по конструкции, принципам движения и логике поведения, было решено разработать универсальное встроенное ПО, позволяющее минимизировать затраты на доработку под конкретный тип аппарата. Такая архитектура представляет собой двухуровневую структуру. Нижний уровень образован программными функциональными модулями, каждый из которых решает свою ограниченную задачу и либо очень слабо связан с остальными модулями, либо не имеет таких связей вовсе. На верхнем уровне находится главный логический модуль (ГЛМ), который согласует работу функциональных модулей и содержит в себе специфичные для конкретного типа изделия логику и функционал.

Набор функциональных модулей является универсальным, т. е. подходит для обеспечения работы любого зонда-профилемера, который может быть построен на базе этого ядра системы управления. Он включает в себя следующие модули:

- модуль конфигурации,
- модуль состояния,
- модуль движения,
- модуль ведения журнальных файлов,
- модуль автоматической работы,
- модуль внешних коммуникаций,
- модуль работы с измерительными инструментами,
- модуль управления питанием.

Рассмотрим кратко назначение каждого модуля.

Модуль конфигурации – обеспечивает хранение конфигурационных параметров в энергонезависимой памяти, обновление их значений и доступ к ним.

Модуль состояния – осуществляет регулярный опрос набора встроенных датчиков, таких как измеритель потребляемого тока и напряжения батареи, внешнего давления, ориентации аппарата и прочих. Модуль осуществляет приведение измеренных величин к удобным для работы единицам, фильтрацию, сглаживание данных, предоставляет доступ к результатам и формирует пакеты данных комплексного описания состояния аппарата для журнального файла и передачи в приложение пользователя.

Модуль движения – обеспечивает работу с двигателями и контроль перемещения аппарата в пространстве. Для зонда-профилемера это в основном движение в вертикальной плоскости, поэтому базовой функцией модуля является команда «Движение к заданной глубине», при выполнении которой он сам определяет, какие двигатели и в каком режиме следует задействовать, а затем определяет момент, когда движение следует остановить.

Модуль ведения журнальных файлов – охватывает весь спектр операций со встроенным накопителем данных: от открытия файла и записи или чтения данных до форматирования носителя.

Модуль автоматической работы – планировщик, определяющий последовательность фаз и субфаз рабочего цикла и частоту выполнения циклов.

Модуль внешних коммуникаций – включает в себя все операции связи как в ближнем поле, так и в дальнем, определение протоколов передачи данных, валидацию команд управления и передачу их для исполнения на верхний уровень системы, в ГЛМ. Также в рамках модуля внешних коммуникаций определено встроенное ПО модуля связи и навигации.

Модуль работы с измерительными инструментами – содержит набор драйверов внешних измерительных инструментов и их конфигурацию. Главными задачами модуля является включение, инициализация, получение данных и передача их модулю ведения журнальных файлов, а также выключение и обесточивание измерительных инструментов по окончании сеанса измерений.

Модуль управления питанием – позволяет включать и выключать питание периферийных устройств по запросу.

Все встроенное ПО ядра системы управления написано на языке программирования C++. Этот объектно-ориентированный язык обеспечивает механизмы расширения и модификации функционала ядра системы управления, поэтому адаптация встроенного ПО под особенности конструкции и логики поведения разрабатываемого аппарата не сопряжена с необходимостью переписывать значительные объемы программного кода. Фактически ядро представляет собой так называемый фреймворк, в котором низкоуровневые и общие для платформы операции скрыты от разработчика слоем программного интерфейса.

Описанная структура программных модулей оказалась достаточно удачной и не претерпела существенных изменений за все время разработки проекта.

Контроль движения. Функционирование автоматического зонда-профилемера подразумевает безопасное безаварийное перемещение под водой в полностью автоматическом режиме. Для этого система управления должна контролировать текущее положение прибора в пространстве, состояние электропривода лебедки, длину троса на барабанах лебедки, а также учитывать высоту

волн на морской поверхности. Система управления анализирует соответствующие данные и принимает решения о действиях, необходимых для достижения цели текущей фазы рабочего цикла, используя заложенные в нее алгоритмы. Составление и отладка таких алгоритмов является важнейшей задачей. Опыт разработки зонда-профилемера показал, что для функциональной устойчивости критически важна информация о влияющих на движение аппарата параметрах, которую дают специализированные датчики различных подсистем, прежде всего лебедки и ее электропривода. Можно выделить две критические точки рабочего цикла, где наиболее вероятно возникновение аварийной либо ведущей к прекращению автоматической работы нештатной ситуации. Это точки, в которых система управления должна принять решение об остановке, т. е. моменты достижения поверхности воды при всплытии и парковочной позиции при погружении. На поверхности воды критически важным параметром является натяжение троса. Если оно ослабляется либо пропадает вовсе, то исчезает и сила, которая вытягивает освободившийся трос из пространства вокруг барабана лебедки. Продолжение размотки в этом случае неизбежно приводит к образованию на тросе петель и далее – к перехлесту троса на барабане. После этого трос уже начнет наматываться на барабан, несмотря на то что двигатель вращается в направлении размотки. На начальном этапе морских испытаний отказ такого рода встречался наиболее часто. Это происходило из-за некорректного определения границы вода – воздух по показаниям специального датчика электропроводности при выходе аппарата на морскую поверхность. Чтобы граница вода – воздух определялась надежно в динамически изменяющихся условиях, был разработан адаптивный алгоритм оценки электропроводности среды, который использует данные встроенного в прибор датчика внешнего давления для определения состояния «в воде», когда прибор заглублен в диапазоне 2,5–5 м. Измеренная в этом положении электропроводность принимается за референсную, и переход к состоянию «в воздухе» оценивается относительно этого значения.

Для безаварийной работы в условиях провисания троса лебедки был разработан датчик натяжения. Он представляет собой качающийся подпружиненный рычаг с роликом для троса, магнитом и датчиком Холла. При ослаблении натяжения троса пружина отодвигает рычаг с магнитом от датчика, и система управления останавливает вращение электропривода барабана лебедки.

Второй критической точкой рабочего цикла является остановка в парковочной позиции. Во время первых испытаний прибора решение об этом принималось по показаниям счетчика оборотов барабана лебедки. Учитывая тот факт, что коэффициент растяжения у используемого троса по спецификации 1 %, подсчет количества оборотов должен был бы давать хорошую оценку длины вытравленного троса. Однако на практике оказалось, что, во-первых, из-за разного натяжения в условиях изменяющегося течения плотность укладки троса на барабане могла существенно различаться, что приводило к разному количеству оборотов при полностью намотанном тросе. Во-вторых, накапливалась ошибка измерения длины вытравленного троса при большом числе оборотов барабана лебедки. В результате, работая в автоматическом режиме, аппарат чаще всего не доходил до точки максимально достижимой глубины, а это уменьшало рабочий диапазон зонда-профилемера.

Для решения задачи остановки в парковочной позиции был создан и интегрирован в конструкцию «Винчи» магнитный датчик конца троса. Он представляет собой залитый в полиуретан магнит в пластиковом корпусе, который крепится на самом конце троса, и датчик Холла, расположенный на конце направляющей трубки троса под корпусом аппарата. При достижении конца троса магнит сближается с датчиком, и система управления получает сигнал, по которому немедленно останавливает намотку. Применение датчика конца троса позволило отказаться от остановки по достижению счетчиком оборотов установленного предельного значения и всегда погружаться до максимально возможной глубины.

Передача данных. Вопрос о выборе канала связи для обмена данными со всплывшим зондом-профилемером уже в недалеком будущем, скорее всего, потеряет нынешнюю актуальность, и наиболее рациональным станет использование спутниковой связи, работающей через терминалы, сравнимые по своим характеристикам с современными терминалами для сетей сотовой связи. Но в настоящий момент приходится делать выбор между тремя доступными вариантами: локальной радиосвязью типа *LoRaWAN*, сетью *GSM/LTE* и спутниковой связью, например *Iridium* или «Гонец». Чтобы сделать обоснованный выбор, нужно кратко рассмотреть особенности данных, которые передает зонд-профилемер «Винчи». Типичный профиль, измеренный зондом, содержит около 100 Кбайт данных. К этим данным добавляются журнальные файлы и телеметрия. В результате полный объем данных, которые аппарат может передать на каждом цикле, составляет около 500 Кбайт. Для экономии энергии и трафика применяется сжатие, в результате полный пакет данных содержит около 300 Кбайт. Это большой объем для передачи с автоматического устройства. Существующие решения для спутниковой связи, например *Iridium SBD*, предназначены для редкого отправления сообщений с максимальной длиной до 300 байт, и стоимость такой связи высока. Радиоканал типа *LoRa* хоть и привлекает своей надежностью, но достижимая скорость передачи в нем тоже довольно низкая, около 200–300 байт/с. Кроме того, локальный радиоканал подразумевает необходимость развертывания в месте проведения работ инфраструктуры по приему сообщений от зонда – мачты с антенной, приемника, сервера, системы бесперебойного питания. Передача данных по сети сотовой связи *GSM/LTE* даже в относительно медленном режиме 3G может осуществляться со скоростью порядка 10 Кбайт/с, стоимость трафика низкая, а сеть того или иного оператора доступна практически везде, где постоянно живут люди.

На данном этапе для передачи данных с «Винчи» была выбрана сотовая связь, это определило компоненты аппаратуры подсистемы передачи данных. Ее основой стал модем *Quectel-EC21*, у которого есть встроенный стек протоколов *TCP/IP* и богатый функционал для связи с удаленными устройствами через сеть Интернет. Это значительно облегчает задачу использования модема под управлением микроконтроллеров, ресурсы которых весьма ограничены по сравнению с обычными персональными компьютерами. Наиболее ценной для наших задач особенностью данного модема стало наличие так называемого «прозрачного» режима передачи данных. Этот режим включается после установления связи с удаленным сервером, и модем отправляет серверу весь поток данных, который поступает от управляющего микроконтроллера модуля связи. Все дан-

ные, полученные в ответ от сервера, наоборот, передаются управляющему микроконтроллеру без какой-либо обработки. Таким образом удается достичь максимально возможной пропускной способности, однако есть ограничение на скорость последовательного порта, через который подключен модем. Кроме того, *Quectel-EC21* обладает встроенным приемником сигналов *GNSS*, который используется для отслеживания местоположения прибора.

Следующим вопросом, который пришлось решить при создании подсистемы передачи данных для «Винчи», стал выбор средств для обеспечения бесперебойного круглосуточного приема сообщений от множества этих зондов. Подходящим решением оказался виртуальный выделенный сервер, работающий в коммерческом дата-центре. При невысокой стоимости за все время проведения испытаний с передачей данных такая виртуальная машина продемонстрировала отличную надежность, ни разу не став причиной сбоев. Тем не менее вследствие увеличения требований к объемам хранимых данных запланирован запуск отдельного физического выделенного сервера на собственной серверной площадке ИО РАН. Сервер работает под управлением ОС *Linux*.

Наиболее сложной проблемой, решенной в рамках подсистемы передачи данных аппарата «Винчи», стала разработка специализированного протокола уровня приложения (по модели *OSI* [7]), который обеспечивает эффективную работу в условиях нестабильного канала связи. Использование сотовой связи в морских условиях на автономном подводном аппарате, который не обладает высокой мачтой для размещения антенн, а работает фактически с поверхности воды, значительно отличается от обычного применения в условиях города. Типичной ситуацией в этом случае является захлестывание антенны волной, в результате чего связь нарушается. Иногда, если базовая станция сотовой сети расположена далеко, даже дождь или туман могут значительно ухудшить качество связи. Поэтому важно передавать данные так, чтобы постоянные разрывы соединения не приводили к необходимости повторять передачу заново. Кроме того, поскольку модем использует собственный встроенный стек протоколов *TCP/IP*, внешняя управляющая система не имеет возможности контролировать процессы, происходящие на транспортном уровне. По этой причине нет возможности использовать механизм контроля доставки сообщений, который встроен в транспортный протокол *TCP*. Это означает, что отправка данных в модем вовсе не гарантирует доставку этих данных до сервера, а значит, нужен отдельный механизм подтверждения доставки каждого отправленного пакета.

Исходя из этих соображений, был сформирован протокол передачи данных, названный *WPro*, в котором все отправляемые зондом файлы разбиваются на фрагменты. Каждый фрагмент содержит заголовок с метаданными, однозначно определяющими, какому участку в каком файле этот фрагмент принадлежит. Так сервер получает возможность собирать входящие файлы по кусочкам и отслеживать, каких фрагментов еще не хватает. Получив фрагмент, сервер отправляет аппарату подтверждение, а тот, в свою очередь, переходит к передаче следующего фрагмента только после получения подтверждения от сервера. При нормально работающей связи этот протокол создает минимальную дополнительную нагрузку на пропускную способность канала, но в условиях нестабильного соединения позволяет свести повторы передач к минимуму при гарантии доставки данных в полном объеме.



Рис. 6. Внешний вид главного экрана приложения оператора «Винчи»
 Fig. 6. Screenshot of the "Winchi" Operator Application

Другой особенностью протокола является использование наблюдения, сделанного во время испытаний: если аппарат смог установить соединение с сервером, то в большинстве случаев он успевает передать около 2–3 Кбайт данных до того, как связь прервется. Поэтому сразу после подключения «Винчи» передает наиболее ценные данные: телеметрию и результаты проведенных измерений в низком разрешении. Если после этого соединение прервется, то оставшиеся данные помещаются в очередь и будут переданы при наступлении более благоприятных условий.

Передача зонду управляющих команд работает аналогичным образом: сервер повторяет отправку команды до тех пор, пока не получит подтверждение от аппарата. Это гарантирует, что каждая команда будет доставлена.

Необходимость использования специализированного протокола определила состав серверного ПО. Главным компонентом является написанный на языке C++ сетевой сервис, который принимает входящие соединения, производит аутентификацию подключенного аппарата и взаимодействует с ним по протоколу *WPro*. Для распаковки и расшифровки полученных файлов, а также для генерирования команд созданы специальные утилиты.

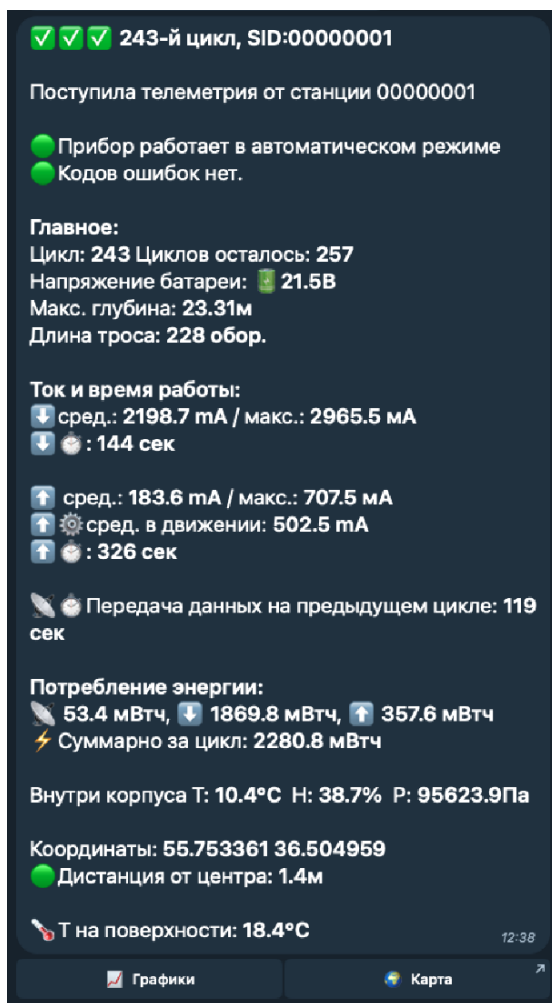
Пользовательские интерфейсы. Взаимодействие пользователя с зондом-профилемером происходит как в режиме обслуживания, так и во время автоматической работы. Для этого необходимы разные программные инструменты.

Разработано ПО для диагностики, проведения испытаний и обслуживания прибора, а также для программирования автоматического режима работы – приложение оператора. Это приложение на языке *Java* для персонального компьютера с графическим интерфейсом пользователя. Язык *Java* позволяет приложению быть кроссплатформенным и работать без перекомпиляции во всех наиболее распространенных операционных системах: *Windows*, *Linux* и *MacOS*.

Главный экран приложения содержит индикаторы для отображения всех подсистем зонда (рис. 6).

Второй программный инструмент служит для взаимодействия с прибором во время автоматической работы. В ходе разработки зонда-профилемера «Винчи» этот инструмент прошел эволюцию от специализированного веб-сайта до так называемого *Telegram*-бота. Оказалось, что сервис, предоставляемый мессенджером *Telegram*, хорошо подходит для решения оперативного оповещения о происходящих событиях, таких как сеансы связи с поднявшимся на поверхность прибором (рис. 7).

В доставляемых программой-ботом сообщениях можно применять форматирование и пиктограммы-эмодзи, облегчающие восприятие телеметрической информации. Кроме телеметрии бот «Винчи» умеет формировать изображения графиков с поступившими данными низкого разрешения. Этого достаточно для оперативного мониторинга работы, но имеется также и возможность обратной связи. Пользователи, внесенные в список администраторов системы, могут сформировать команды управления зондом прямо в интерфейсе мессенджера *Telegram*. Программа-бот написана на языке *Python* и работает на том же сервере, который принимает поступающие от аппарата данные.



Р и с. 7. Пример сообщения о сеансе связи с аппаратом «Винчи» в Telegram-боте
 F i g. 7. Screenshot of Telegram Messenger App. displaying the “Winchi” telemetry report

Для полноценного доступа к оперативно получаемым данным, включая подробные журнальные файлы и данные измерений полного разрешения, используется сервис *SFTP* с надежной аутентификацией и шифрованием.

Данные скачиваются на персональный компьютер исследователя, где обрабатываются удобным инструментарием, например ПО *MATLAB* или *Octave*. Раскодированные файлы хранятся в формате *CSV*, что делает возможным их обработку практически в любой среде для работы с данными.

Испытания системы управления зондом-профилемером «Винчи»

За время разработки зонда-профилемера «Винчи» начиная с 2017 г. было создано «с нуля» несколько опытных образцов аппарата. Главным движущим процессом разработки стали натурные испытания. Каждый новый опытный образец сначала испытывался в пресноводных водоемах, таких как оз. Глубокое на биостанции Института проблем экологии и эволюции РАН [5]. Условия

озера, максимально приближенные к условиям в бассейне, но при этом позволяющие установить аппарат на глубину около 30 м, дали возможность проверить различные идеи и решения, относящиеся как к конструкции, так и к системе управления.

Морские испытания проводились в ежегодных экспедициях «Черное море» ИО РАН на шельфе в двух районах – у Геленджикской бухты и у м. Утриш [3]. В результате силами небольшой команды разработчиков были созданы полнофункциональный зонд-профилемер «Винчи» и базовая аппаратно-программная платформа системы управления.

С 2024 г. зонд-профилемер «Винчи» успешно работает в бухте Витязь в Японском море на морской экспериментальной станции «Мыс Шульца» ТОИ ДВО РАН [4].

Заключение

В ИО РАН создана оригинальная подводная система для позиционного мониторинга на морском шельфе, которая начинает применяться для решения задач оперативной океанологии.

Система управления обеспечивает надежную автоматическую работу аппарата и предоставляет удобные программные средства для полного спектра операций с ним: диагностики, обслуживания, контроля выполнения миссии, удаленного управления, а также для оперативной работы с результатами измерений в квазиреальном времени.

Получаемый опыт эксплуатации прибора задает вектор дальнейшего развития системы управления в основном в плане улучшения пользовательских интерфейсов, расширения команд управления прибором и поддержки новых внешних измерительных датчиков. В ближайших планах стоит задача создания мобильного приложения для смартфонов и планшетов и расширения функциональности *Telegram*-бота.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Moored automatic mobile profilers and their applications / D. F. Carlson [et al.] // *Advances in Marine Robotics* / Ed. G. Oren. LAP Lambert Academic Publishing, 2013. P. 169–206.
2. Automated Tethered Profiler for Hydrophysical and Bio-Optical Measurements in the Black Sea Carbon Observational Site / A. G. Ostrovskii [et al.] // *Journal of Marine Science and Engineering*. 2022. Vol. 10, iss. 3. 322. EDN ITVPXR. <https://doi.org/10.3390/jmse10030322>
3. Автономный зонд-профилемер «Винчи» / Д. А. Швоев [и др.] // *Подводные исследования и робототехника*. 2024. Т. 50, № 4. С. 67–77. EDN UCUGWU. https://doi.org/10.37102/1992-4429_2024_50_04_07
4. Fine-Scale Measurements of Hydrophysical and Bio-Geo-Optical Properties by the Autonomous Moored Profiling Probe Winchi in the Waters of the Coastal Zone of the Northwestern Sea of Japan / P. A. Salyuk [et al.] // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2025. Vol. 25, iss. 5. ES5015. EDN TRUCUQ. <https://doi.org/10.2205/2025es001064>
5. Применение роботизированного подводного аппарата для лимнологических исследований (на примере озера Глубокого, Рузский округ, Московская область) / А. Г. Островский [и др.] // *Водные ресурсы*. 2025. Т. 52, № 3. С. 161–173. EDN SYCAFI. <https://doi.org/10.31857/S0321059625030134>
6. Унифицированная аппаратно-программная платформа системы управления автономных подводных профилирующих аппаратов / О. Ю. Кочетов [и др.] // *Подводные исследования и робототехника*. 2018. Т. 25, № 1. С. 59–66. EDN UTGUCG.

7. Day J. D., Zimmermann H. The OSI reference model // Proceedings of the IEEE. 1983. Vol. 71, iss. 12. P. 1334–1340. <https://doi.org/10.1109/PROC.1983.12775>

Об авторах:

Кочетов Олег Юрьевич, научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), **ORCID ID: 0000-0002-8413-6030**, **ResearcherID: L-4624-2016**, **Scopus Author ID: 0000-0002-8413-6030**, **SPIN-код: 3564-2154**, ok@noiselab.ru

Островский Александр Григорьевич, ведущий научный сотрудник, Институт океанологии им. П. П. Ширшова РАН (117997, Россия, г. Москва, Нахимовский проспект, д. 36), кандидат географических наук, **ORCID ID: 0000-0002-5906-0361**, **ResearcherID: E-4315-2014**, **Scopus Author ID: 7006130192**, **SPIN-код: 4668-1119**, osasha@ocean.ru