

## РЕФЕРАТЫ

УДК 534.222.

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.001

**Ключевые слова:** автономные необитаемые подводные аппараты, гибридные подводные аппараты, супервизорное управление, подводное базирование роботов.

Матвиенко Ю.В., Костенко В.В., Щербатюк А.Ф., Ремезков А.В. РАЗВИТИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 4–14.

Перспективы создания подводных роботов – автономных и телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (АНПА, ТНПА) нового поколения связаны с разработкой технологий гибридных необитаемых подводных аппаратов (ГНПА), в которых интегрированы функции АНПА и ТНПА. Проблема состоит в значительном расширении технологических возможностей АНПА за счет оснащения их новыми инструментами, совершенствования систем бортового управления, вовлечения оператора в технологический процесс для оперативного контроля хода работ, порядка и условий выполнения принципиально новых технологических операций. ГНПА может выполнять широкий спектр бесконтактных работ, выходить к объекту обследования в соответствии с заданной программой, выполнять действия, связанные с формированием канала информационного обмена с постом управления, и далее выполнять контактные операции в супервизорном режиме. Первоочередные задачи создания гибридных аппаратов состоят в развитии функциональных свойств АНПА, включая:

- интеллектуализацию системы бортового управления,
- организацию супервизорного управления с включением оператора в процесс управления,
- расширение инструментального оснащения и оптимизацию конструктивных решений,
- организацию сетевых средств подводной навигации,
- организацию инфраструктуры подводного базирования аппарата при выполнении длительных работ по обслуживанию подводных добычных комплексов.

В работе показана принципиальная возможность создания ГНПА на основе робототехнических комплексов и их систем, созданных в ИПМТ ДВО РАН за последние годы.

УДК 629.584; 551.46.077

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.002

**Ключевые слова:** автономный подводный робот, буксируемый поплавко-ретранслятор, модуль радиосвязи, спутниковая навигационная система, гидроакустическая навигационная система с ультракороткой базой, информационно-измерительный модуль, динамическая модель движения.

Костенко В.В., Быканова А.Ю., Михайлов Д.Н., Мокева И.Г., Толстоногов А.Ю. ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ПРИВЯЗНОЙ СИСТЕМЫ АВТОНОМНОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА С ПОВЕРХ-

НОСТНЫМ МОДУЛЕМ РАДИОСВЯЗИ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 15–22.

Рассматривается технология измерения навигационно-пилотажных и динамических характеристик специализированной привязной системы автономного подводного робота (АПР), основная идея которой заключается в применении буксируемого по поверхности поплавка-ретранслятора, оборудованного средствами спутниковой навигации и радиосвязи с судовым постом управления. Специфика проблемы состоит в измерении вектора натяжения кабеля связи в точках его крепления к АПР и поплавку-ретранслятору и построении интегрированной информационно-измерительной системы, способной эффективно функционировать в режиме реального времени. Принятые в работе технические решения обеспечивают измерение и регистрацию основных параметров движения АПР с учетом влияния кабеля связи. Аппаратно-программные средства измерительного комплекса позволяют интегрировать в общий файл данные о скорости движения и географических координатах поплавка-ретранслятора с параметрами движения АПР, местоположение которого определяется гидроакустической навигационной системой. Элементная база комплекса обеспечивает заданную точность определения измеряемых параметров в диапазоне их изменения. С помощью разработанного алгоритма определяются проекции вектора натяжения кабеля на оси связанной системы координат аппарата и поплавок по измеренным углам отклонения соответствующих измерительных модулей от вертикали. Измеряемые параметры транслируются на накопитель бортового компьютера АПР, где они регистрируются в виде файла синхронизированных по времени данных с возможностью дальнейшей графоаналитической обработки и использования при параметрической идентификации модели динамики кабеля связи.

УДК 004.896+629.58+001.891.57

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.003

**Ключевые слова:** автономные необитаемые подводные аппараты (АНПА), контрольно-аварийная система (КАС), система управления, диагностирование, аппаратно-программные средства КАС.

Елисеенко Г.Д., Инзарцев А.В., Павин А.М. МНОГОУРОВНЕВАЯ РАСПРЕДЕЛЕННАЯ КОНТРОЛЬНО-АВАРИЙНАЯ СИСТЕМА АНПА // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 23–30.

Рассматриваются концепция и реализация контрольно-аварийной системы (КАС), которая направлена на повышение живучести автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) различного класса и назначения. Задача повышения живучести АНПА решается одновременно по нескольким направлениям: дублирование программных и аппаратных средств, а также обеспечение их взаимного согласованного (не противоречивого) функционирования. КАС создана на базе иерархической декомпозиции решаемых задач и включает в себя несколько уровней программного обеспечения, а также аппаратную часть. Программная часть КАС выполняет контроль целостности программного обеспечения, предстартовую диагностику,

мониторинг ошибок и аварий. Аппаратная часть КАС обеспечивает возможность обнаружения и подъема АНПА в случае выхода из строя его вычислительной системы. Ключевой особенностью предлагаемого подхода является «относительно независимое» поведение систем в различных режимах работы (как штатных, так и аварийных), а также способность КАС в максимальном объеме выполнять заложенную программу-задание (миссию). Рассматриваются различные сценарии поведения АНПА во время возникновения нештатных ситуаций.

УДК 626.02.008

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.004

**Ключевые слова:** подводный многозвенный манипулятор, подводный аппарат, идентификация, высокая точность, наблюдатель.

Филаретов В.Ф., Коноплин А.Ю., Зуев А.В., Красавин Н.А. МЕТОД СИНТЕЗА СИСТЕМ ВЫСОКОТОЧНОГО УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЯМИ ПОДВОДНЫХ МАНИПУЛЯТОРОВ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 31–37.

Представлена разработка метода синтеза комбинированных систем, обеспечивающих высокоточное управление перемещениями рабочих органов многозвенных манипуляторов, установленных на подводных аппаратах. Предложенный метод позволяет точно идентифицировать негативные моментные воздействия на выходных валы электроприводов манипуляторов, возникающие при их перемещениях в вязкой среде, а также моменты сухого и вязкого трений в этих приводах. При использовании этого метода вначале с помощью рекуррентного алгоритма решения обратной задачи динамики выполняется предварительный аналитический расчет внешних моментов, возникающих во всех степенях подвижности движущегося подводного манипулятора. Этот расчет является весьма приближенным вследствие сложности определения параметров реального взаимодействия с водной средой всех звеньев манипулятора и захваченного груза. Поэтому далее с использованием динамических моделей электроприводов каждой степени подвижности, включающих аналитически рассчитанные внешние моменты, строятся дополнительные диагностические наблюдатели. Эти наблюдатели с помощью формируемых ими невязок точнее определяют величины непредвиденных изменений моментов вязкого и сухого трения в самих электроприводах. Затем идентифицированные моментные воздействия на электроприводы всех степеней подвижности манипулятора точно компенсируются с помощью самонастраивающихся корректирующих устройств, обеспечивающих стабилизацию динамических свойств этих приводов на номинальном уровне. Выполнено численное моделирование системы, синтезированной с помощью разработанного метода для многозвенного манипулятора с кинематической схемой PUMA, рабочий орган которого перемещался по сложным пространственным траекториям. Результаты численного моделирования показали многократное повышение точности выполнения подводными манипуляторами различных технологических операций при использовании синтезированной системы.

УДК 551.466

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.005

**Ключевые слова:** внутренние волны, поверхностные проявления, диагностика плотности.

Александрин А.И., Ким В., Ярошук И.О. ДИАГНОСТИКА ПЛОТНОСТИ МОРСКОЙ ВОДЫ ПО ПОВЕРХНОСТНЫМ ПРОЯВЛЕНИЯМ ВНУТРЕННИХ ВОЛН // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 38–44.

Рассматривается проблема восстановления плотностной структуры моря на шельфе по проявлениям внутренних гравитационных волн на изображениях поверхности в поляризованном свете. По изображениям рассчитываются скорости распространения волн и их длины. Анализируются 17 случаев регистрации волн, проходивших через станции с вертикально расположенными датчиками температуры. Используется две модели вертикальной изменчивости плотности: однослойная с постоянной частотой плавучести и двухслойная с постоянной плотностью в слое. Анализируются точности решения прямых задач на основе сопоставления скоростей распространения волн, рассчитанных по профилям плотности и полученных по изображениям. Рассматриваются два варианта решения прямых задач: на основе решения задачи Штурма–Лиувилля и на основе уравнения Кортевега де Вриза. Демонстрируется возможность выбора модели среды по изменчивости скорости распространения волн на шельфе с меняющейся глубиной дна. Показывается, что при двухслойной модели среды с нижним слоем со значительно меньшей толщиной, чем у верхнего, оба подхода к решению прямых задач дают существенное занижение наблюдаемых скоростей распространения внутренних гравитационных волн.

УДК 534.222.2; 551.463.2

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.006

**Ключевые слова:** морская вода, пузырьки, газогидраты, газовые факелы, рассеяние, поглощение звука.

Буланов В.А., Корсков И.В., Соседко Е.В. О ПРИМЕНЕНИИ НЕЛИНЕЙНОГО РАССЕЯНИЯ ЗВУКА ДЛЯ ОЦЕНКИ СТРУКТУРЫ И РАЗМЕРНОГО СОСТАВА ГАЗОВЫХ ФАКЕЛОВ В МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 45–52.

Новые объекты в океане, подводные газовые факелы (ГФ), образованные газовыми пузырьками, выходящими из дна моря, повсеместно встречаются в районах выброса газов как из толщи донных осадков в различных районах океана, так и в районах выгрузки газа при таянии вечной мерзлоты в арктических морях, и к ним проявляется все больше внимания. Стандартное применение рассеяния звука позволяет обнаружить наличие ГФ в море, но не позволяет в полной мере корректно оценить функцию распределения пузырьков по размерам в факеле и поэтому возникают неопределенности с оценкой мощности выброса газов из моря. Обсуждаются возможности использования метода нестационарного и нелинейного рассеяния звука для получения информации о структуре и динамике подводных газовых факелов, образованных выходом газа из морского дна. Нелинейное рассеяние звука обусловле-

но высокой нелинейностью пузырьковых структур в воде. Нестационарное рассеяние звука возникает вследствие переходных процессов раскочки пузырьков под действием акустических импульсов, и оно ранее использовалось для изучения распределения пузырьков в приповерхностных слоях морской воды. В работе показано, что применение нелинейного нестационарного рассеяния на встречных пучках позволит проводить дистанционную спектроскопию пузырьков в газовых факелах и проводить корректные оценки газосодержания в факелах.

УДК 534.222.1.

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.007

**Ключевые слова:** акустическая дальнометрия, импульсный сигнал, антициклонический вихрь, метод нормальных волн, групповая скорость.

Сорокин М.А., Петров П.С., Каплуненко Д.Д., Степанов Д.В., Моргунов Ю.Н. ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СИНОПТИЧЕСКИХ ВИХРЕЙ НА ТОЧНОСТЬ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ АКУСТИЧЕСКОЙ ДАЛЬНОМЕТРИИ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 53–60.

Разработка систем акустической навигации и акустической дальнометрии в настоящее время является одной из наиболее актуальных практических задач акустики океана. В работе исследуется вопрос о влиянии крупномасштабных неоднородностей поля скорости звука в океане на точность решения задачи акустической дальнометрии. В качестве примера такой неоднородности нами выбран устойчивый антициклонический вихрь, наблюдающийся в южной части Японского моря в летний период. В работе проведены вычислительные эксперименты по исследованию влияния этого вихря на структуру звукового поля, формируемого на акустической трассе, проходящей через его центр, источником навигационных сигналов (ИНС), расположенным на шельфе. В ходе этих экспериментов по гидрологическим данным, полученным с помощью моделей глобальной циркуляции океана NEMO и ИВМ РАН, для этой трассы построена модель нерегулярного волновода «шельф–глубокий океан», после чего с помощью метода широкоугольных параболических уравнений выполнено моделирование акустического поля, формируемого ИНС в таком волноводе. Далее в работе также выполнен анализ модовой структуры этого поля, определены интервалы локализации различных модальных компонент сигнала и рассчитаны эффективные скорости распространения сигналов от ИНС на различных горизонтах приема, после чего исследовано влияние синоптического вихря на данные характеристики волновода. На основе этого анализа выполнены оценки влияния вихря на времена прихода сигналов от ИНС в точку приема, а также дополнительная погрешность решения задачи акустической дальнометрии, обусловленная этим влиянием. Результаты исследования показывают, что в рамках рассматриваемой методики решения задачи акустической дальнометрии даже относительно крупный неучтенный синоптический вихрь, ядро которого находится непосредственно на трассе, оказывает относительно слабое влияние на точность определения дальности (около 30 м для трассы протяженностью 300 км, или 0,01%).

УДК 551.46.077:629.584

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.008

**Ключевые слова:** автономный необитаемый подводный аппарат (АНПА), навигационная система, система управления движением, распознавание гидролокационных изображений.

Боровик А.И. СИСТЕМА НАВИГАЦИИ АНПА, ОСНОВАННАЯ НА РАСПОЗНАВАНИИ ИСКУССТВЕННЫХ МАРКЕРОВ НА АКУСТИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 61–65.

Рассматривается навигационная задача, решение которой состоит в повышении точности определения координат автономного необитаемого подводного аппарата (АНПА) путем детектирования размещенных на дне объектов на гидролокационных изображениях. В качестве распознаваемых объектов используются специально спроектированные маркеры с заданными технологическими характеристиками. Алгоритмы размещения маркеров в рабочей акватории и движения аппарата обеспечивают гарантированное обнаружение маркеров гидролокаторами бокового или секторного обзора. Навигационный алгоритм интегрирован в систему управления АНПА и работает в режиме реального времени.

УДК 534.222.

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.009

**Ключевые слова:** акустика океана; метод нормальных волн; теория возмущений; неоднородность батиметрии.

Захаренко А.Д., Петров П.С., Трофимов М.Ю. О ВОЗМУЩЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ МОД НЕОДНОРОДНОСТЯМИ БАТИМЕТРИИ В МЕЛКОМ МОРЕ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 66–69.

Моделирование распространения звука в акустике океана может выполняться с использованием теории нормальных волн. При наличии в решаемой задаче неоднородностей батиметрии большая часть вычислительного времени тратится при этом на расчет модовых функций и волновых чисел в нескольких поперечных сечениях исследуемого волновода. Значительную часть этого времени можно сэкономить, используя для расчета указанных величин теорию возмущений. В работе строится теория возмущений решения задачи Штурма–Лиувилля для модовых функций и волновых чисел, вызванных вариациями глубины моря. Данный вопрос может быть сведен к классической задаче о возмущении потенциала в стационарном уравнении Шредингера путем определенной замены переменных. В работе в явном виде приводятся формулы теории возмущений первого и второго порядков для модовых функций и волновых чисел. Представлен пример использования этих формул и выполнен анализ их точности. Описанный подход позволяет значительно повысить вычислительную эффективность моделирования распространения звука в нерегулярных волноводах мелкого моря при сохранении того же уровня точности, что достигается при отдельном решении задачи Штурма–Лиувилля в каждом поперечном сечении.

УДК 551.46

DOI: 10.37102/24094609.2020.34.4.010

**Ключевые слова:** побережье Камчатки, Авачинский залив, дистанционное зондирование, цветение микроводорослей, цвет моря, температура поверхности океана, вихревые структуры.

Пичугин М.К., Гурвич И.А., Хазанова Е.С., Салюк П.А. НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ОКЕАНОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ОСЕННЕГО ЦВЕТЕНИЯ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ У ЮГО-ВОСТОЧНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ КАМЧАТКИ // Подводные исследования и робототехника. 2020. № 4 (34). С. 70–73.

В работе демонстрируются возможности оптических наблюдений со спутников Sentinel-2, 3 для изучения связанных физических и биологических процессов в поверхностном слое океана. Рассматривается конкретный пример применения системы наблюдения для случая интенсивного осеннего цветения фитопланктона у юго-восточного побережья Камчатки в сентябре 2020 г. В Авачинском заливе цветение водорослей проявлялось в виде областей с высокой концентрацией хлорофилла-а, придавая морской поверхности соответствующий темно-зеленый оттенок. На композитном изображении с разрешением 10 м из-за выраженных спектральных различий на морской поверхности выделялись скопления водорослей, организованные в сложные системы мезомасштабных и субмезомасштабных взаимодействующих вихревых структур. По данным реанализа ERA5 установлено, что среднемесячная температура поверхности океана (ТПО) акватории Авачинского залива в сентябре 2020 г. показала положительную аномалию с максимумом ТПО (12,0°C) за последние 42 года при климатической норме 10,4°C. Допускается, что при сохранении тенденции роста в ближайшие годы этот максимум будет превышен.

## ABSTRACTS

**Key words:** autonomous underwater vehicles, hybrid underwater vehicles, supervisory control, underwater robot deployment.

Matvienko Yu.V., Kostenko V.V., Scherbatyuk A.F., Remezko A.V. DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGICAL POTENTIAL OF AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLES // Underwater Investigation and Robotics. 2020. No. 4 (34). P. 4–14.

Prospects of designing autonomous and remotely operated underwater vehicles (AUV and ROV) of the new generation rely on developing hybrid autonomous and remotely-operated vehicles (ARV), which combine functions of AUV and ROV. It is necessary to expanse significantly AUV's technological capabilities by equipping it with new instruments, upgrading onboard control systems, involving operators in the technological process for real-time control of work progress, and execution order and conditions of novel technological operations. ARV is capable of performing a wide specter of contactless operations: approach the target of research according to the stated program, perform operations related to establishing a

data exchange channel with control station, and then carry out contact operation in supervisory mode. Priority tasks of hybrid vehicles designing consist of the development of AUV's functional properties, including:

- intellectualization of onboard control systems;
  - provision of supervisory control involving an operator in control flow;
  - expansion of instrumentation and optimization of structural solutions;
  - providing a network means for underwater navigation;
  - providing an infrastructure for underwater deployment while carrying out long-term missions on the maintenance of underwater mining complexes.
- Work demonstrates a principal achievability of designing an ARV based on robotic complexes and their systems developed in the IMTP FEB RAS for the past years.

**Key words:** autonomous underwater robot, tethered retranslation buoy, radiocommunication module, satellite positioning system, ultrashort baseline underwater acoustic positioning system, information and measuring module, motion dynamic model.

Kostenko V.V., Bykanova A.Yu., Mikhailov D.N., Mokeeva I.G., Tolstonogov A.Yu. TECHNOLOGY FOR MEASURING THE MOTION PARAMETERS OF THE TETHERED SYSTEM OF AN AUTONOMOUS UNDERWATER ROBOT WITH A SURFACE RADIO COMMUNICATION MODULE // Underwater Investigation and Robotics. 2020. No. 4 (34). P. 15–22.

The work considers the technology for measuring the navigational, control, and dynamic parameters of the specialized tethered system of an autonomous underwater robot (AUR). Its main idea is to use a towed surface retranslation buoy equipped with means of satellite positioning and radiocommunication with the vessel control station. The questions at issue are measuring the vector of communication cable tension in points of its attachment to AUR and retranslation buoy, synthesis of an integrated information-measuring system capable of efficient real-time operation. Decisions made in work provide measuring and registration of key parameters of AUR motion concerning communication cable influence. Hardware-software means of measurement complex allow merging in one file the data of movement speed and geographical coordinates of retranslation buoy with AUR movement parameters. At the same time, the AUR location is determined by an underwater acoustic positioning system. The element base of the complex provides the stated measurement accuracy of parameters in their variation range. The developed algorithm determines the projections of cable tension vector on the axes of a vehicle-buoy fixed coordinate system according to measured angles deviation from vertical position of corresponding measuring modules. The AUR onboard computer's storage records the measured parameters as a time-synchronized file with a possibility of further graphic-analytical processing and parametric identification of the communication cable dynamic model.

**Key words:** autonomous underwater vehicles, emergency control system, control system, diagnostic, hardware-software means of ECS.