

УДК 629.127

**А.М. Маевский, В.Ю. Занин, С.А. Турсенев, И.Н. Иванова, А.А. Будников,
В.Н. Логачев**

**ОПЫТ ПРИКЛАДНОЙ ВЕРИФИКАЦИИ ТЕХНОЛОГИЙ ОПЕРАТИВНОЙ
ОКЕАНОЛОГИИ НА БАЗЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МРТС И МРТК
ГЛАЙДЕРНОГО ТИПА**

Развитие современных отечественных технологий в том числе робототехнических комплексов, является одним из приоритетных направлений научно-технического развития Российской Федерации. Особенное внимание сегодня выделяется задачам, связанным с освоением и исследованием внутренних и внешних морских акваторий. В статье приводится пример прикладной верификации морских робототехнических комплексов глайдерного типа для решения широкого комплекса задач, связанных с оперативным получением характеристик состояния морской среды. Описываются результаты, полученные в ходе проведения межведомственного опытно-исследовательского учения МЧС России «Безопасная Арктика-2023» и натурных экспериментов на Беломорской Биологической Станции имени Н.А. Перцова МГУ имени М.В. Ломоносова в морских полигонах акватории пролива «Великая Салма».

Автономный необитаемый подводный аппарат; подводные глайдеры, оперативная океанология.

**A.M. Maevskiy, V.U. Zanin, S.A. Tursenev, I.N. Ivanova, A.A. Budnikov,
V.N. Logachev**

**EXPERIENCE OF APPLIED VERIFICATION OF OPERATIONAL
OCEANOLOGY TECHNOLOGIES BASED ON DOMESTIC MRTS
AND GLIDER-TYPE MRTS**

The development of modern domestic technologies, including robotic systems, is one of the priority areas for the development of the Russian Federation. Particular attention today is given to tasks related to the development and research of internal and external marine areas. The article provides an example of applied verification of glider-type marine robotic systems for solving a wide range of problems related to promptly obtaining the state of the marine environment. The results obtained during the exercises of the Ministry of Emergency Situations of Russia "Safe Arctic-2023" and field experiments at the White Sea biological station of Moscow State University in the area of the Great Salma Strait are described.

Autonomous uninhabited underwater vehicle; underwater gliders, operational oceanology.

Введение. В период с 2010-х по 2020-е годы в области морской робототехники наблюдался значительный рост и комплексное развитие технологий, обеспечивающих проектирование и разработку не только единичных морских робототехнических систем, а и многофункциональных морских робототехнических комплексов (МРТК) гомогенного и гетерогенного состава. Основной фокус исследований был сосредоточен на повышении автономности, улучшения эффективности и функциональности уже имеющихся МРТК, придания им возможностей группового применения и резидентного базирования. Хорошим примером интенсивного и инновационного развития являются такие предприятия как:

◆ Cellula Robotics Ltd: Cellula Robotics шаг за шагом реализовала в линейке своих АНПА SOLUS (SOLUS-LITE, SOLUS-MR, SOLUS-LR, SOLUS-LR) возможность применения как основного энергоисточника водородных топливных элементов, доведя дальность хода АНПА в миссии до 5000 км, обеспечив модель использования «из порта – в порт» без задействования судов обеспечения. Отработав различные модульные полезные нагрузки, как сбрасываемые (рубежные гидроакустические станции), так и не отделяемой конструкции, позволяющие при исполь-

зовании вакуумного якорного устройства АНПА превращать его на длительный период в донную обсерваторию с возможностью оперативной передачи информации за счёт носимых радио- и радио-гидроакустических буёв (АНПА малого калибра) без прерывания процесса мониторинга в миссии [1].

♦ Teledyne Technologies Incorporated: группа компаний Teledyne Technologies отличилась расширением модели использования АНПА глайдерного типа, отработав оперативное разворачивание мобильных робототехнических рубезей из АНПА глайдерного типа (линейка глайдеров типа Slocum корпорации Teledyne Marine [2]) с океанологическими, гидрофизическими, экологическими и акустическими датчиками и измерительными комплексами беспарашютным десантированием с вертолётных носителей. И запуском корпорацией Teledyne Energy Systems [3], Inc. в эксплуатацию донных автономных модульных (от 100 кВт/ч до 30 мВт/ч) энергетических станций на водородных топливных элементах (Subsea Supercap) для энергоснабжения донных инфраструктур различного назначения, включая станции подзарядки морской подводной робототехники резидентного базирования или модулей донных обсерваторий.

♦ Boeing: Boeing также активно участвовала в разработке морских робототехнических комплексов, в том числе беспилотных подводных аппаратов и систем беспилотного управления для военных и гражданских целей. Ярким примером развития морских робототехнических систем является разработка Boeing Echo Voyager и Boeing Echo Seeker [4] АНПА специализирующихся на выполнении миссий поиска и обнаружения. При этом значительное внимание уделено обеспечению двухзвенных технологий применения гетерогенных МРТК, в частности развитию проекта волновых глайдеров, поглощённой компании Liquid Robotics.

Развитие происходило не только в области АНПА «классической» архитектуры. Научно-исследовательские институты, межгосударственные программы и экспедиции активно развивали и использовали АНПА различных гибридных схем и комбинаций. Например, придавая АНПА глайдерного типа функционал дрейфующего, профилирующего буя по принципу буёв «Арго». Что в свою очередь ускорило развитие данного типа аппаратов для решения задач оперативной океанологии.

Актуальность применения подводных глайдеров для решения задач оперативной океанологии. Оперативная океанология играет ключевую роль в предоставлении оперативной информации о характеристиках состоянии морской среды. В область оперативной океанологии могут быть включены решения задач, связанных с морской безопасностью, экологическим мониторингом, прогнозированием погоды и климата, а также поддержанием эффективности морских транспортных операций и развитием морских ресурсов.

В период с 2017 по 2019 год Арктическая экспедиция (ORBIS) использовала группы подводных глайдеров (SeaGlider) для исследования арктического шельфа и скорости таяния льдов [5].

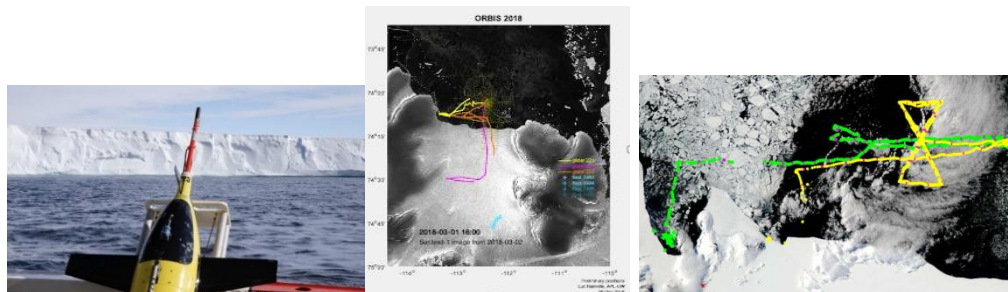


Рис. 1. Пример использования групп подводных глайдеров SeaGlider в Арктической экспедиции (ORBIS)

Программа «Ocean tracking Network» (OTN) [6] позволила собрать океанологические данные с более 69 000 км, пройденных при использовании глайдеров (Slocum). Одновременно с выполнением задач океанологического и экологического мониторинга и патрулирования, группы подводных глайдеров могут образовывать «мобильные робототехнические рубежи», формирующие зону пассивного акустического обзора и контроля, как это уже реализовано в разных национальных и международных проектах в целях контроля морских млекопитающих и уровней акустического загрязнения среды при судоходстве и морской добыче углеводородов.

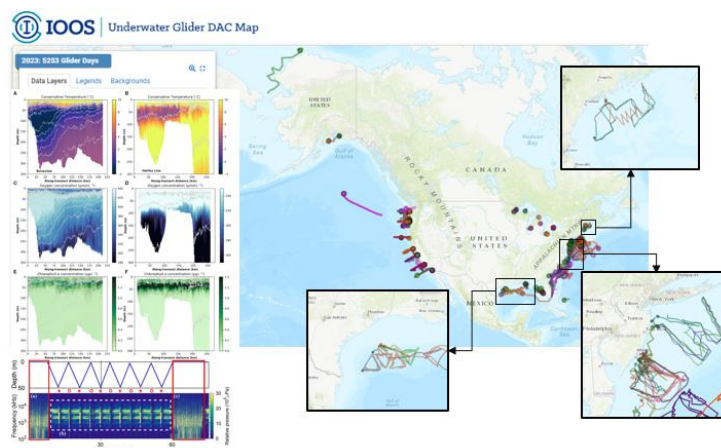


Рис. 2. Пример использования групп подводных глайдеров для формирования рубежей системы контроля и патрулирования прибрежных районов береговой линии США

Формирование рубежей из морских робототехнических систем и комплексов, обеспечивает надёжное оперативное освещение подводной обстановки, к примеру, в случае применения группы глайдеров как средства пассивного акустического мониторинга, данная группа исходя из получаемой ей же в процессе выполнения миссии, информации о таких параметрах как скорость звука, температура, солёность, электропроводимость среды с учетом их перемещения в назначенном диапазоне глубин, а также иных дополнительных факторов может самостоятельно принять решение и занять наиболее выгодную географическую позицию или тип формации с учётом конкретной лучевой картины распространения звука в акватории патрулирования. При этом, выполняя функции пассивного акустического мониторинга, глайдер за счет установленного модуля полезной нагрузки и бортового вычислительного устройства, способен не только записывать, но и анализировать полученную информацию, с возможностью непосредственно или с помощью сетевых радио-гидроакустических технологий сообщать в режиме близкому к режиму реального времени на береговой пункт управления о выявленных «аномалиях» (в трех мерном пространстве координат), что позволяет обеспечить своевременное реагирование так, к примеру, как реализовано в мобильном приложении Whale Alert [7] чтобы своевременно изменить курс судна для предотвращения столкновения с морскими млекопитающими.

Атлантическая лаборатория океанографии и метеорологии правительства США в 2022 году использовала группу SeaGlider для улучшения прогнозов ураганов с помощью наблюдений в верхних слоях океана. В том числе в составе группы были надводные робототехнические аппараты типа SailDrone [8].

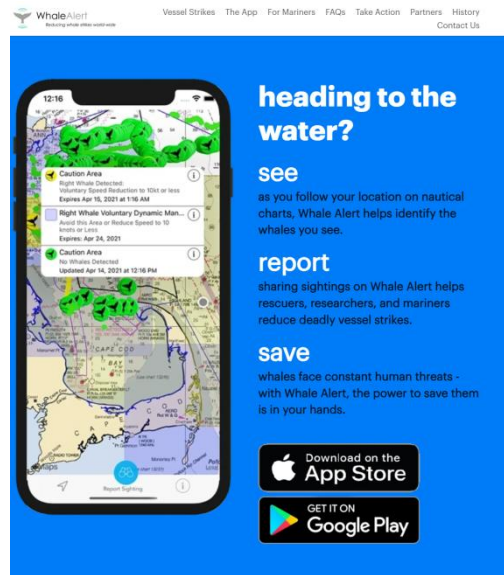


Рис. 3. Мобильное приложение Whale Alert для предотвращения столкновения с морскими млекопитающими

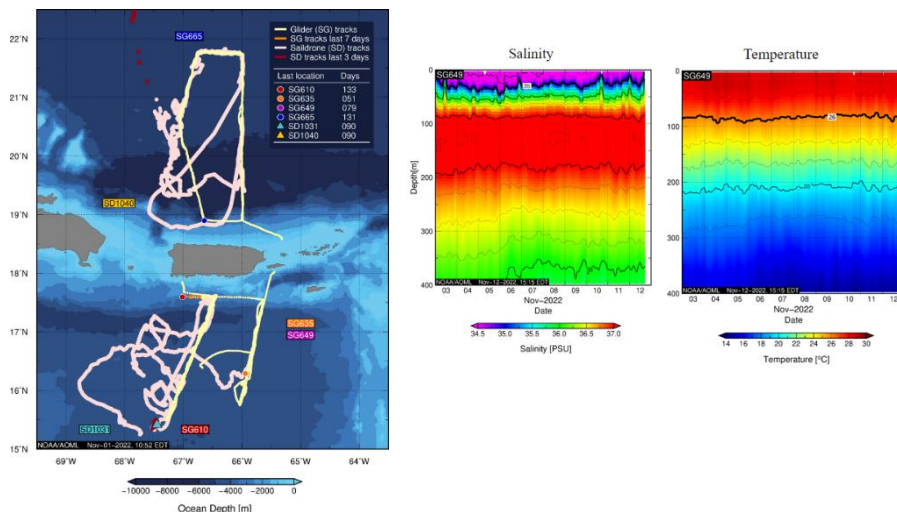


Рис. 4. Пример использования атлантической лабораторией океанографии и метеорологии правительства США в 2022 году групп подводных глайдеров SeaGlider для прогнозов ураганов

С 12 по 22 сентября 2022 года на португальской военно-морской базе Троя (к югу от Лиссабона) под руководством ВМС Португалии были проведены учения НАТО в которых использовалась группа подводных глайдеров SeaExplorer [9]. Четыре аппарата в общей сложности провели в море 67 дней, преодолев общую дистанцию 1771 км и совершив 1347 погружений для сбора данных за 21 день двух учений. Миссия подводного планера SeaExplorer проходила под контролем Морского центра передового опыта НАТО GEOMETOC, ответственного за быструю экологическую оценку (REA) этого района. Четыре машины парка были ос-

нащены как датчиком CTD (проводимость, температура и глубина), так и акустической решеткой из 8 гидрофонов AGLIMMS. Это позволило обеспечить оценку лучевого распространения в реальном времени, при этом каждый планер отправлял профили скорости звука при каждом всплытии.

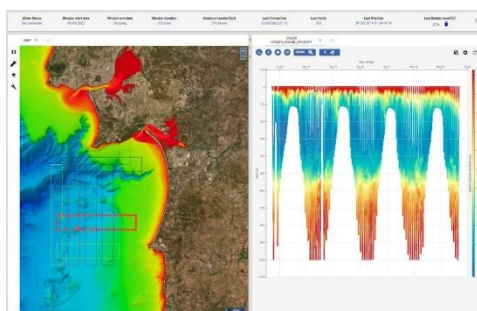


Рис. 5. Процесс планирования миссии и профили распространения скорости звука, полученные SeaExplorer

В 2023 году ВМС США продемонстрировали возможность развертывания подводного планера Teledyne Slocum с воздуха с использованием вертолета Sikorsky MH-53E Sea Dragon [10]. Эта разработка демонстрирует новую концепцию использования военно-морским флотом развертывания и эксплуатации подводных глайдеров Slocum.



Рис. 6. Фото процесса сброса Slocum глайдера с вертолета Sikorsky MH-53E Sea Dragon

Развитие технологий оперативной океанологии на базе отечественных МРТС и МРТК глайдерного типа. В Российской Федерации практической разработкой глайдеров занимаются научные команды ФГБОУ ВО СПбГМТУ и АО «НПП ПТ «Океанос». Тщательная проработка технологий и сопутствующих систем морской робототехники ведется более 10 лет [11–20]. За это время были разработаны ходовые стенды подводного и волнового глайдеров, которые прошли неоднократное апробирование различных конструктивных и программно-аппаратных решений, в первую очередь реализованных на базе отечественных компонентов и технологий, являясь своеобразным натурным полигоном «бэа-тестирования» для отечественных производителей.

В процессе выполнения задачи аппараты способны накапливать и обрабатывать массивы данных, получаемых от многопараметрических зондов различного назначения. На момент 2023 года АО «НПП ПТ «Океанос» на ходовом стенде подводного глайдера одновременно использует такие отечественные измерительные комплексы как многопараметрический гидрохимикофизический зонд

«AquaPro STDplus» бренда «Наесо» [21] и прямой измеритель скорости звука серии «Гидра» компании НПФ «Экран», что служит прямой иллюстрацией последствий введения санкций не дружественными странами, так как ещё в 2020 году такой возможности не было и в основном применялась импортная сенсорика.

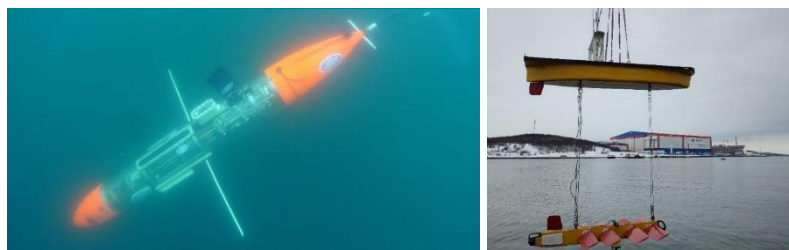


Рис. 7. Подводный глайдер и волновой глайдер производства АО «НПП ПТ «Океанос» и СПбГМТУ



Рис. 8. Экспериментальный образец отечественного блока датчиков многоканальной гидрохимикофизической измерительной системы ("NAECO") установленный на подводном глайдере из состава гетерогенной группы МРТК

Разработанные МРТК и МРТС прошли опытную верификацию в ходе проведения межведомственного опытно-исследовательского учения сил и средств единой системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций в Арктической зоне Российской Федерации («Безопасная Арктика 2023») в апреле 2023 года для решения опытно - исследовательской задачи по мониторингу радиационной обстановки в зоне условной аварии на атомном ледоколе в г. Мурманск. Учения проходили в Кольском заливе (среднее колено). В виду сложной гидрометеорологической обстановки и сильных течений до 0.8 м/с (что в несколько раз превышает среднюю скорость перемещения подводного глайдера) перед группой глайдеров была поставлена задача прямолинейного тракторного мониторинга относительно района условного ЧС Учения проходили в акватории Кольского залива (среднее колено). Особенностью данной акватории является повышенная стратификация среды (разброс значений солёности от 25 до 34 промилле и скорость поверхностного течения до 0.8 м/с).

Результат проведенных исследований показали принципиальную работоспособность применения МРТК состоящего из подводного и волнового глайдера для мониторинга и обследования подводных потенциальных опасных объектов (ППОО).

В ходе выполнения миссии были архивированы данные на бортовые самописцы, получаемые с модулей полезной нагрузки, для последующей обработки и анализа на пункте обеспечения и контроля МРТК. По гидроакустическим и радиоканалам (высокоскоростные гидроакустические OFDM модемы с функцией УКБ

позиционирования СПБГМТУ и стандартные радио модемы LoRaWAN и Wi-Fi) велась оперативная передача телеметрической и навигационной информации с глайдеров, а также избранные данные полезной нагрузки (гидростатическое давление с подводного глайдера). По результатам миссия составила 20 циклов погружения/всплытия (для подводного глайдера). Пройденная дистанция по заданной траектории в составе группы 500 м. Средняя путевая скорость 0,25 м/с. Максимальная глубина погружения достигала 18 м. Требуемый результат был достигнут как фактор учёта при формировании миссии гидрологических условий на акватории и заложенных конструктивных особенностей ходового стенда подводного глайдера, позволивших применить изменяемые в ходе погружения углы планирования, кратно превышающие типовые и обеспечивающие перемещение глайдера в условиях воздействия течений.



Рис. 9. Гетерогенная группа МРТК в составе подводного и волнового глайдера в процессе решения задач межведомственных опытно-исследовательских учений МЧС «Безопасная Арктика 2023»

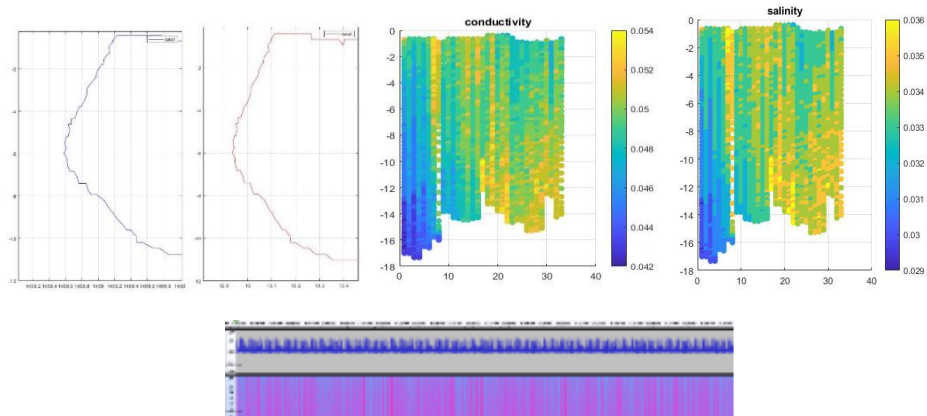


Рис. 10. Данные с модулей полезной нагрузки подводного глайдера полученные в результате решения задач межведомственных опытно-исследовательских учений МЧС «Безопасная Арктика 2023» (градиенты распределений параметров солености и электрической проводимости в ходе выполнения миссии)

Решение задачи океанологического/экологического мониторинга за счет применения подводного глайдера было апробировано совместно с сотрудниками МГУ им. М.В. Ломоносова в районе Беломорской биологической станции (ББС) МГУ имени Н.А. Перцева в п. Приморский. В акватории пролива «Великая Салма» – полигона «Острова Крестовые». Для верификации со стороны МГУ использовался «образцовый» многопараметрический зонд RCM 9 LW», производства Aanderaa Data Instruments AS (Норвегия) (кафедры физики моря и вод суши МГУ). Снятие данных (станции) проходили с научно-исследовательского судна (НИС) «Студент МГУ».

В данной работе подводному глайдеру было необходимо пройти по ключевым путевым точкам образцового гидрологического разреза морского натурального полигона «Острова Крестовые» Чернореченской губы Белого моря, тем самым повторив разрез, предварительно (за час до старта миссии) выполненный сотрудниками кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ и ЦМИ МГУ с борта научно-исследовательского судна ББС МГУ «Студент МГУ». Точки всплытия подводного глайдера обозначены зеленым цветом, точки движения НИС «Студент МГУ» фиолетовым (рис. 12).



Рис. 11. Подводный глайдер и НИС «Студент МГУ» при решении задач морской геологоразведки, экологических исследований и мониторинга



Рис. 12. Траектории движения подводного глайдера и точки снятия станций НИС «Студент МГУ» при решении задач морской геологоразведки, экологических исследований и мониторинга

В результате эксперимента подводный глайдер совершив сделал 26 циклов погружения/всплытия в коридоре глубин от 0 до 30 метров, со средней скоростью 0,3 м/с. Общая линейная дистанция миссии составила 850 м. Время выполнения 2,5 ч. Полученные данные по изменению температуры, скорости звука, электрической проводимости, солёности и их сопоставление с данными полученными с НИС «Студент МГУ» представлены на рис. 13.

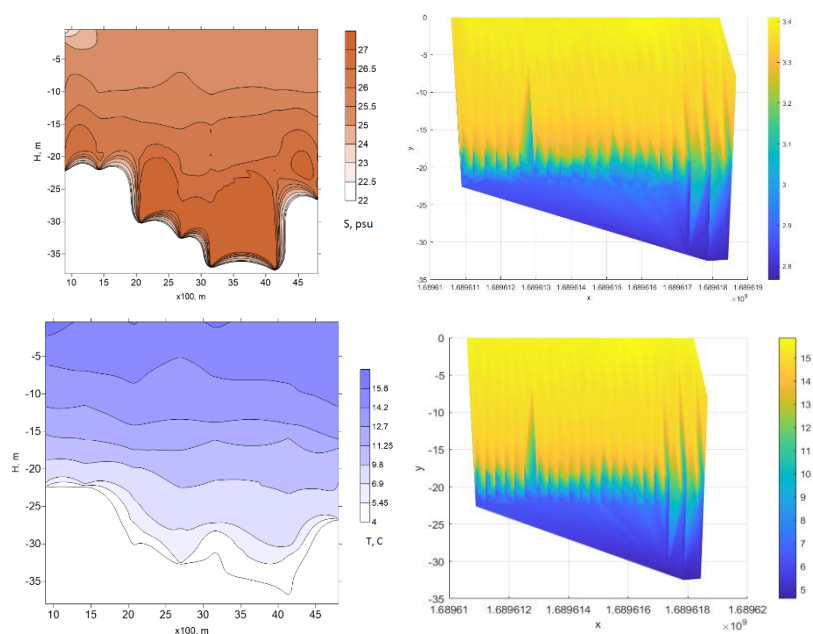


Рис. 13. Данные по изменению температуры, скорости звука, электрической проводимости и солёности воды полученные НИС «Студент МГУ» и отечественным блоком датчиков многоканальной гидрохимикофизической измерительной системы ("NAESCO") установленным на корпусе подводного глайдера

Следует отметить, что на подводный глайдер в процессе движения было оказано внешнее воздействие – мощное подводное течение (проходящего перпендикулярно заданной траектории перемещения из пролива Нильмогуба), которое не было учтено на этапе формирования миссии. Морской натурный полигонного эксперимент по результатам анализа фактической траектории перемещения глайдера, а также полевой и камеральной обработки данных по образцовому разрезу и разрезу, произведённому глайдером, выполненному ЦМИ МГУ признан успешным с подтверждением заявленных характеристик носителем и полезной нагрузкой, их качества и достаточности для заявленных целей.

Заключение. Проведенная работа демонстрирует уникальные возможности применения подводных и волновых глайдеров, а также их групп как систем способных функционировать в экстремальных средах. Такие группы МРТК предоставляют возможность оперативного реагирования на чрезвычайные ситуации, такие как аварии на морских платформах и объектах подводной инфраструктуры, влекущие за собой загрязнение воды и природные катастрофы. Группа способна автономно патрулировать и собирать данные в реальном времени тем самым позволяя оперативно определять и контролировать распространение опасных веществ и моментально реагировать на угрозы для окружающей среды.

Полученные результаты прикладной верификации свидетельствуют о применимости АНПА типа «глайдер» для решения задач обеспечения морской геолого-разведки, океанологических, экологических исследований и мониторинга подводных потенциально опасных объектов. Полученные результаты полностью соответствуют образцовым многолетним данным Центра Морских Исследований МГУ и исследователей кафедры физики моря и вод суши факультета МГУ.

Отработаны технологии группового управления и взаимодействия МРТС и МРТК глайдерного типа в составе волнового и подводного глайдера. Разработано отечественное программное обеспечение, позволяющее организовать комплексную работу внутренних и внешних систем МРТК и проводить постобработку больших массивов данных.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. <https://www.cellula.com/solus-family> (дата обращения: 04.03.2024).
2. <https://www.teledynemarine.com/brands/webb-research/slocum-glider> (дата обращения: 04.03.2024).
3. [https://www.teledynees.com/en-us/Subsea-Power/Documents/Subsea%20Supercharger%C2%AE/SEA%20FLOOR%20BROCHURE%204.1%20\(EMAIL%20QUALITY\).pdf](https://www.teledynees.com/en-us/Subsea-Power/Documents/Subsea%20Supercharger%C2%AE/SEA%20FLOOR%20BROCHURE%204.1%20(EMAIL%20QUALITY).pdf) (дата обращения: 04.03.2024).
4. <https://www.boeing.com/defense/autonomous-systems/echo-voyager> (дата обращения: 04.03.2024).
5. <https://iop.apl.washington.edu/project.php?id=orbis> (дата обращения: 04.03.2024).
6. <https://oceantrackingnetwork.org/> (дата обращения: 04.03.2024).
7. <https://www.whalealert.org/>.
8. <https://www.navalnews.com/event-news/euronaval-2022/2022/10/seaexplorer-glider-proves-its-worth-during-nato-exercises/> (дата обращения: 04.03.2024).
9. <https://www.navalnews.com/event-news/cne-2023/2023/06/us-navy-tests-air-deployment-of-underwater-glider/> (дата обращения: 04.03.2024).
10. <https://www.aoml.noaa.gov/hurricane-glider-project/> (дата обращения: 04.03.2024).
11. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка легкого интервенционного автономного необитаемого подводного аппарата в целях использования в подводных резидентных системах // Матер. XIV Всероссийской научно-практической конференции и X молодежной школы-семинара «Управление и обработка информации в технических системах». – Ростов-на-Дону; Таганрог: Изд-во ЮФУ, 2019. – С.83-98.
12. Занин В.Ю., Маевский А.М. и др. Разработка элементов подводных робототехнических резидентных систем на примере отечественного автономного необитаемого подводного аппарата интервенционного класса и сопутствующих технологий // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2019 года. – 2019. – С. 14-22.
13. Маевский А.М., Гайкович Б.А. Разработка морских робототехнических комплексов с перспективой применения в качестве резидентной робототехники, на примере проектной работы по разработке линейки АНПА «Глайдер – Гибридный Глайдер – I-AUV» Комплексные исследования Мирового океана. Материалы IV Всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Севастополь, 22-26 апреля 2019 г. – Севастополь: ФГБУН МГИ. – Режим доступа: http://mhi-ras.ru/news/news_201904151055.html, свободный, 2019. – С. 395-398.
14. Маевский А.М., & Гайкович Б.А. Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // Вести газовой науки. – 2019. – 2 (39). – С. 29-40.
15. Маевский А.М., Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Рыжов В.А. Разработка схем применения и систем управления гетерогенными группами морских роботов // Сб. материалов 31-ой международной научно-технической конференции "Экстремальная робототехника", ЦНИИ РТК, Санкт-Петербург, Сентябрь 2020. – С. 171-173.
16. Маевский А.М., Турсенев С.А., Смирнов А.С. Робототехника в мониторинге глубин // Гражданская оборона. – 2022. – С. 42-44.

17. Занин В.Ю., Кожемякин И.В., Маевский А.М. Использование морской робототехники в задачах оперативной океанографии. Отечественный и зарубежный опыт // Морские информационно-управляющие системы. – 2020. – № 1 (17). – С. 39-49.
18. Маевский А.М., Занин В.Ю., Турсенев С.А. Групповое применение подводных планеров в задаче мониторинга подводных потенциально-опасных объектов на примере ликвидации аварийных разливов нефти // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере (Problems of technosphere risk management). – 2021. – № 3 (59). – С. 20-28.
19. Маевский А.М., Морозов Р.О., Горелый А.Е. Разработка сценариев применения мультиагентного комплекса робототехнических систем в задачах оперативной океанографии // Морские Технологии. – 2021. – С. 10-15.
20. Маевский А.М., Печайко И.А., Турсенев С.А. Применение морских робототехнических комплексов для мониторинга и анализа потенциально опасных подводных объектов // Научно-аналитический журнал проблемы управления рисками в техносфере (Problems of technosphere risk management). – 2021. – № 2 (58). – С. 32-39
21. https://naeco.ru/measurement_equipment/gfhp-system/ (дата обращения: 04.03.2024).