

УДК 004.94:656.052+681.51  
EDN: LUAMJL

А.М. Маевский

Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ БЕЗОПАСНОСТИ И НАДЕЖНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ГРУППЫ БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИМИТАЦИОННОГО КОМПЛЕКСА МОДЕЛИРОВАНИЯ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ

**Объект и цель научной работы.** Целью исследования является разработка мультиагентного комплекса моделирования, позволяющего учитывать особенности взаимодействия группы агентов в морской среде со статическими препятствиями.

**Материалы и методы.** Для реализации имитационного комплекса и создания математических моделей применялись программные пакеты Matlab, графические библиотеки языка программирования Python. Для визуализации использовался графический движок Gazebo, входящий в состав операционной системы ROS (Robotic Operation System).

**Основные результаты.** Представлен принципиально новый алгоритм построения характеристической модели глобального поля течений, учитывающих параметры интенсивности и направленности течений. Применение этого алгоритма в морской навигации открывает новые перспективы для обеспечения безопасности и эффективности движения судов в различных гидрологических сценариях. Модель обеспечивает возможность цифрового прогнозирования течений, что позволяет судам выбирать оптимальные маршруты и минимизировать временные затраты. Суда, оснащенные этим алгоритмом, способны эффективно преодолевать преграды, такие как течения, блуждающие льды и другие внешние гидродинамические воздействия. Разработанная модель предоставляет информацию об интенсивности и направленности течений в узкостях и каналах, что существенно облегчает процесс навигации и уменьшает риски столкновения.

**Заключение.** Представлен процесс разработки системы локального планирования группы и формирования единого поля видимости, определяющий политику реконфигурации агентов группы морских робототехнических комплексов на основе данных от системы технического зрения (СТЗ) на локальном уровне. Проведено имитационное моделирование перемещения группы агентов в сценах со статическими препятствиями. Описан подход к формированию области взаимодействия группы на основе имеющихся ограничений системы связи.

**Ключевые слова:** морские беспилотные транспортные объекты, безэкипажное судно, система планирования, течения, морская робототехника, системы управления.

*Автор заявляет об отсутствии возможных конфликтов интересов.*

UDC 004.94:656.052+681.51  
EDN: LUAMJL

A.M. Maevskiy

St. Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

## FORECASTING THE SAFETY AND RELIABILITY OF MOVEMENT OF A GROUP OF UNMANNED VESSELS USING A SIMULATION COMPLEX FOR MODELING MULTI-AGENT SYSTEMS

**Object and purpose of research.** The purpose of the study is to develop a multi-agent modeling complex that allows taking into account the peculiarities of the interaction of a group of agents in the marine environment with static obstacles.

*Для цитирования:* Маевский А.М. Прогнозирование безопасности и надежности движения группы безэкипажных судов с использованием имитационного комплекса моделирования мультиагентных систем. Труды Крыловского государственного научного центра. 2024; 1(407): 179–188.

*For citations:* Maevskiy A.M. Forecasting the safety and reliability of movement of a group of unmanned vessels using a simulation complex for modeling multi-agent systems. Transactions of the Krylov State Research Centre. 2024; 1(407): 179–188 (in Russian).

**Materials and methods.** To implement the simulation complex and create mathematical models, Matlab software packages and graphic libraries of the Python programming language were used. For visualization, the Gazebo graphics engine included in the ROS (Robotic Operation System) operating system was used.

**Main results.** The article presents a fundamentally new algorithm for constructing a characteristic model of the global current field, taking into account the parameters of the intensity and direction of currents. The application of this algorithm in maritime navigation opens up new prospects for ensuring the safety and efficiency of ship movement in various hydrological scenarios. The model provides the ability to digitally predict currents, which allows ships to effectively choose optimal routes and minimize time costs. Vessels equipped with this algorithm are able to effectively navigate obstacles such as currents, wandering ice and other hydrodynamic challenges with greater accuracy and anticipation. The developed model provides information about the intensity and direction of currents in narrows and channels, which significantly facilitates the navigation process and reduces the risk of collision.

**Conclusion.** The process of developing a system for local group planning and the formation of a single field of visibility is presented, which determines the policy for reconfiguring the agents of the MRTK group based on data from the STS at the local level. Simulation modeling of the movement of a group of agents in scenes with static obstacles was carried out. An approach to forming an area of group interaction is described, based on the existing limitations of the communication system.

**Keywords:** marine unmanned transport objects, unmanned vessel, planning system, currents, marine robotics, control systems.  
*The author declares no conflicts of interest.*

## Введение

### Introduction

В настоящее время судоходство остается одной из ключевых отраслей мировой экономики, и вопросы надежности и безопасности данной отрасли имеют особую актуальность.

С развитием беспилотных транспортных средств (БТС), особенно безэкипажных судов (БЭС) и морских робототехнических комплексов (МРТК) [1–3], на море возникает необходимость в интеграции систем планирования и группового управления мультиагентными системами с целью обеспечения более эффективного и безопасного перемещения морских транспортных систем. Важность этого направления исследований обусловлена не только стремительным развитием автономного судоходства, но и растущими требованиями к функциональности БЭС и МРТК в условиях разнообразных сценариев их эксплуатации.

Особое внимание следует уделить разработке систем и технологий, обеспечивающих координацию агентов в группе в процессе их перемещения. Это становится критически важным при прохождении узкостей, каналов и при других сложных навигационных условиях, в которых необходимо обеспечить точное взаимодействие и согласованность действий группы беспилотных судов. Кроме того, ситуации, такие как навигация в условиях плотного морского трафика или преодоление сложных гидрометеорологических условий, также требуют высокой степени взаимодействия и согласованности в действиях мультиагентных систем.

В свете вышеописанных особенностей функционирования становится ясной необходимость раз-

вития имитационных комплексов, способных проводить предварительное моделирование и проработку разрабатываемых решений. Эти комплексы позволяют научно оценивать поведение мультиагентных систем в различных сценариях, обеспечивая основу для разработки и внедрения эффективных стратегий управления и планирования, направленных на повышение надежности и безопасности морского движения.

В работе основное внимание уделяется системе группового планирования перемещения группы агентов в двухмерной среде со стационарными препятствиями и математическим моделям (модулям), описывающим особенности функционирования группы, в т.ч. учитывающие факторы взаимодействия с морской средой.

## Модуль системы локального планирования перемещения группы агентов

### Module of local route planning system for group of agents

Для реализации системы локального планирования предложено изменение стандартного метода потенциальных полей за счет введения визуальных данных, получаемых от модуля СТЗ (визуальное потенциальное поле). Визуальное потенциальное поле генерирует необходимое воздействие на САУ МРТК в зависимости не только от имеющихся дистанций между агентами в группе и препятствиями, но и от визуальной информации, получаемой от СТЗ.

СТЗ может быть представлена в различном исполнении:

- система ЛИДАР;

- камера глубины, формирующая облако точек (в надводном исполнении);
- системы активной гидролокации (в подводном исполнении).

Введение визуальной информации в метод потенциальных полей может значительно улучшить его применимость в морской среде. Визуальные данные предоставляют информацию о более детальных и актуальных аспектах среды, таких как наличие подводных и надводных преград (в виде набора точек, описывающих препятствие) и расположение этих объектов относительно робота. Данная информация позволяет точнее рассчитывать потенциальные поля и эффективнее избегать обнаруженные препятствия.

Идея использования данных с СТЗ для расчета силы отталкивания в методе потенциальных полей имеет ряд преимуществ перед стандартным методом потенциальных полей, где в основе лежит формирование отталкивающей и притягивающей силы, зависящей от изменения дистанции между агентами и препятствием / целью:

- более точное управление;
- адаптация к форме препятствий;
- адаптивность к динамическим изменениям;
- уменьшение ситуаций попадания в локальные минимумы.

Притягивающая сила визуального потенциального поля может быть определена как:

$$F_{att} = \begin{cases} -0,4 \cdot [x(i), y(i)] - \frac{[x_f, y_f]}{D}, & D_{att} > \epsilon \\ 0, & D_{att} < \epsilon \end{cases}, \quad (1)$$

$$D_{att} = \sqrt{(x_i - x_f)^2 + (y_i - y_f)^2}, \quad (2)$$

где  $\epsilon$  – радиус попадания агента в целевую область.

В свою очередь в составляющей силы отталкивания примем в расчет данные от СТЗ совместно с экспоненциальной функцией, увеличивающей коэффициент силы отталкивания при приближении МРТК к препятствию:

$$F_{rep_r} = \begin{cases} \sum_i c \cdot \frac{e^{(-\beta \cdot d_i)}}{d_i} \cdot \begin{bmatrix} \cos(\gamma) \\ \sin(\gamma) \end{bmatrix}, & D_{rep_{near_{AUV}}} > d_{safe} \\ 0, & D_{rep_{near_{AUV}}} < d_{safe} \end{cases}, \quad (3)$$

где  $c$ ,  $e^{(-\beta \cdot d_i)}$  – коэффициенты настройки силы отталкивания,  $d_{safe}$  – безопасное расстояние до препятствия,  $d_i$  – расстояние от робота до  $i$ -й видимой

точки препятствия с координатами  $(x_{obs}, y_{obs})$ ,  $\gamma$  – угол направления между МРТК и обнаруженной видимой точкой препятствия, рассчитанный как  $\gamma = \text{atan2}(y_{r_i} - y_{obs}, x_{r_i} - x_{obs})$ .

Аналогичным образом рассчитывается сила отталкивания агента от обнаруженных препятствий  $F_{rep\_obs}$  с учетом дистанции до препятствия  $D_{rep\_near_{obs}}$ .

Таким образом, общая составляющая силы отталкивания  $F_{rep}$  находится как сумма всех сил отталкивания, действующих на МРТК в процессе его движения:

$$F_{rep} = \sum_1^{i+n} F_{rep\_AUV(i)} + F_{rep\_obs(n)}, \quad (4)$$

где  $i + n$  – общее количество автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) и препятствий, входящих в области  $\epsilon$  для каждого АНПА.

Таким образом, общая составляющая силы визуального потенциального поля находится как сумма всех сил, действующих на МРТК в процессе его движения:

$$F_{total} = F_{att} + F_{rep}. \quad (5)$$

Исходя из полученных уравнений (5–9), можно составить уравнения для движения каждого агента группы МРТК.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= F_{total(1)} \cdot \cos(\varphi) - F_{total(2)} \cdot \sin(\varphi); \\ \dot{y} &= F_{total(1)} \cdot \sin(\varphi) + F_{total(2)} \cdot \cos(\varphi); \\ \dot{\varphi} &= \text{atan2}(F_{total(2)}, F_{total(1)}). \end{aligned} \quad (6)$$

В качестве упрощения в работе рассматривалась двумерная модель СТЗ. Модель устройства можно описать следующими уравнениями, отражающими характеристики захватываемого спектра устройства, его дальности и направленности:

$$\begin{aligned} \text{ang} &= \text{psi} - \frac{D_{angle}}{2} : 0.1 : \text{psi} + \frac{D_{angle}}{2}; \\ x_{son} &= x_c + D_{range} \cdot \cos(\text{ang}); \\ y_{son} &= y_c + D_{range} \cdot \sin(\text{ang}); \\ \text{beam}_{ang} &= \left[ -\frac{D_{angle}}{2} : 1 : \frac{D_{angle}}{2} \right], \end{aligned} \quad (7)$$

где  $\text{ang}$  – ширина обзора сонара. Переменные  $x_{son}$  и  $y_{son}$  описывают получаемые координаты сектора,  $\text{beam}_{ang}$  – массив углов испускаемых лучей в преде-

лах заданного угла обзора. Массив всех лучей, испускаемых устройством, составляет вектор вида (8)

$$beam = [1 \dots length(beam_{ang})]. \quad (8)$$

Для обнаружения препятствий необходимо выполнение условия (9):

$$Obs_{points} = beam \cap obs. \quad (9)$$

Схематично разрабатываемая модель СТЗ проиллюстрирована на рис. 1 (см. вклейку).

Поскольку луч может пересечь препятствие дважды, необходимо рассчитать дистанции до точек пересечения (*points*) и выбрать из полученного массива минимальную точку по отношению к агенту группы МРТК:

$$Dist_{beam} = |P_{start} - Obs_{points}|, \quad (10)$$

$$P_{obs} = \min(Obs_{points}(Dist_{beam})). \quad (11)$$

Пример моделирования работы модуля СТЗ и модуля локального планирования представлен на рис. 2 (см. вклейку).

Разработанная модель СТЗ позволяет определять не только облако точек *points*, составляющих видимую часть препятствия, но и дистанцию ( $D_{obs}$ ), а также курсовой угол ( $OBS_{ang}$ ) по направлению к этим точкам и область свободного пространства  $beam_{free}$ , что дает дополнительную навигационную информацию, необходимую к использованию в локальной и глобальной системах планирования.

Пример перемещения группы с использованием алгоритма визуального потенциального поля представлен на рис. 3 (см. вклейку).

Для построения логики перестроения глобальной траектории на основании данных от сенсорных систем и обеспечения оптимального обхода препятствий необходима разработка алгоритма, отвечающего за поведение строя МРТК во время обнаружения препятствия [4].

Данные с модуля СТЗ каждого агента дают возможность разработать алгоритм формирования поля видимости агента  $\Theta_{R_i}$  и расчета общей заполненности поля видимости группы  $\widetilde{\Theta}_g$ , позволяющий агентам оценивать внешнюю обстановку в области взаимодействия группы  $\Psi_g$  и принимать соответствующие решения о реконфигурации строя группы. Для этого необходимо разработать алгоритм, объединяющий в себе систему комплексирования данных с СТЗ каждого агента группы и систему, отвечающую за изменение состояния каждого агента в группе МРТК, а также за его переход в режим реконфигурации.

На основе данных, полученных от СТЗ, проанализируем, какой процент зоны ее покрытия занимает область видимой части препятствия. Для этого сравним количество значений параметра  $Obs_{points}$  и лучей  $beam_{free}$  – как количество лучей, не находящихся в зоне с препятствием и описывающих зону обхода препятствия для каждого агента МРТК. Таким образом,  $\Theta_{R_i}$  является списком значений для каждого луча СТЗ агента, определяющим, пересекает ли соответствующий луч препятствие или нет. Пример для системы ЛИДАР состоящей из 10 каналов измерения (лучей) для робота  $R_i$ :

$$\Theta_{R_i} = [100, 100, 100, 100, 100, 100, 0, 0, 0, 0]. \quad (12)$$

В таком случае вектор  $\Theta_{R_i}$  описывает ситуацию, когда 6 лучей определяют «зону препятствия»  $\widetilde{\Theta}_{obs_{R_i}}$ ,

4 луча определяют «зону без препятствия»  $\widetilde{\Theta}_{free_{R_i}}$ .

Также можно оценить общую наполненность сенсорной системы  $\widetilde{\Theta}_g$  общей суммой всех параметров  $\Theta_{R_i}$  от каждого  $n$  агента группы МРТК.

$$\widetilde{\Theta}_g = \sum_{i=1}^n \Theta_{R_i}. \quad (13)$$

Определим  $\Upsilon$  как параметр перехода системы в состояние реконфигурации. Введем критическое значение  $Cr$ , зависящее от общего количества каналов измерения:

$$Cr = 0,4 \cdot length(beam). \quad (14)$$

Режим распределения возможных траекторий глобального планировщика между агентами группы МРТК может быть описан выражением (15):

$$\begin{cases} \widetilde{\Theta}_{g\_free} < Cr, \Upsilon = \text{true} \\ \widetilde{\Theta}_{g\_free} > Cr, \Upsilon = \text{false} \end{cases}. \quad (15)$$

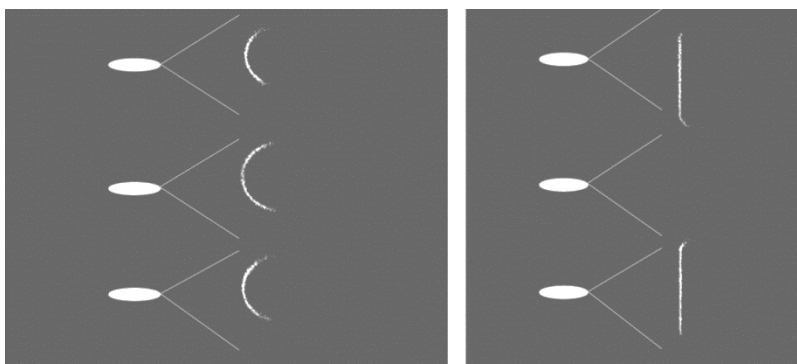
Если  $\widetilde{\Theta}_{g\_free} < Cr$  определяет ситуацию, когда общее свободное поле видимости достигает критического значения – группе необходимо перейти в режим реконфигурации  $\Upsilon_{rec} = \text{true}$ .

Примеры того, как может быть оценено общее поле видимости, представлены на рис. 4 (см. вклейку).

На рис. 5 представлены два случая обнаружения препятствий. В первой ситуации (слева) каждый агент  $R_i$  в процессе перемещения обнаруживает препятствие и производит оценку своей собственной области видимости  $\Theta_{R_i}$ . После агенты обме-

**Рис. 5.** Результат моделирования системы технического зрения (два случая) группы морских робототехнических комплексов и оценка поля видимости группы

**Fig. 5.** Modeling results: machine-vision system (two cases) of a UUV group and assessment of its vision field



ниваются этой информацией для нахождения наилучшего решения, которое позволило бы им обойти обнаруженные препятствия, с учетом соблюдения необходимых условий, наложенных на реконфигурацию формации.

Во второй ситуации (рис. 5 справа), агенты (1 и 3) обнаруживают препятствия, но в данном случае их поле видимости явным образом заполнено больше, чем у второго агента  $\Theta_{R_1} > \Theta_{R_2}$  и  $\Theta_{R_3} > \Theta_{R_2}$ .

Пример определения зоны  $\Theta_{R_i}$  для каждого агента группы МРТК представлен на рис. 6 (см. вклейку). В данном случае оценка параметров  $\check{\Theta}_{obs_{R_i}}$  проводится за счет измерения дистанции  $D_{j_{obs}}$  ( $j$  – количество лучей СТЗ для рассматриваемого случая).

На рис. 6 видно, что общее свободное поле видимости группы  $\widetilde{\Theta}_{g\_free}$  состоит нескольких составляющих  $\check{\Theta}_{free_{R_i\_k}}$  каждого робота:

$$\widetilde{\Theta}_{g\_free} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^j \check{\Theta}_{free_{R_i\_k}}, \quad (16)$$

где  $j$  – количество свободных зон каждого агента  $R_i$ . В данном случае  $\widetilde{\Theta}_{g\_free} > Cr$ , следовательно  $Y = false$ .

В ситуации, представленной на рис. 7 (см. вклейку),  $\check{\Theta}_{free_{R_2}}$  имеет наибольшую зону видимости, но  $\widetilde{\Theta}_{g\_free} < Cr$ , таким образом,  $Y = true$  и агенты группы МРТК переходят в распределенный режим работы системы глобального планирования. Система формирования глобальной траектории движения группы подробно описана в работах [4, 5].

## Модуль формирования характеристических карт глобальных течений

Characteristic mapping module for global currents

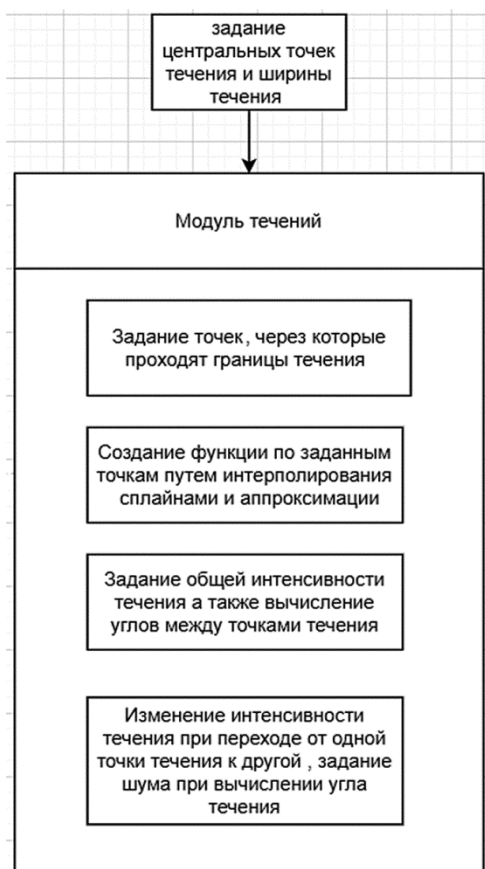
Особенность функционирования БЭС и МРТК состоит в их перемещении в условиях недетерминированной среды, в которой существенное влияние на движение судна могут оказывать сложные гидродинамические условия, такие как динамичные потоки воды, вызванные различными факторами, приливы, ветровые силы и иные географические особенности [6–9].

Современные системы планирования и управления БЭС должны учитывать сложные гидродинамические условия, чтобы обеспечивать надежное и безопасное перемещение. Рассмотрение воздействия течений на судовождение становится крайне важным в контексте растущего числа БЭС, где управление судном осуществляется полностью в автономном режиме в реальном времени. Таким образом, отсутствие информации о течениях в акватории функционирования БЭС может привести к неоптимальным маршрутам, повышению энергопотребления и риску аварийных ситуаций.

Как правило, карты течений представляют собой изображение, на котором указаны направления течений, характерные для рассматриваемого региона. В данном случае рассматриваются поверхностные течения, которые могут быть описаны двумя параметрами, интенсивностью и направленностью.

Обозначим поле течений  $\varrho$  и  $\xi$ , описывающих параметры интенсивности и направленности соответственно. На рис. 8 (см. вклейку) приведены примеры карт течений Черного моря.

Из данных, представленных на картах, можно судить о параметрах направленности и интенсивности течений. На рис. 3 представлены значения ин-



**Рис. 9.** Блок-схема процесса построения структуры течения  
**Fig. 9.** Flow chart of current structure development algorithm

тенсивности и направленности течения в выбранной точке (0,6 уз и юго-западное направление).

Процедура построения характеристической модели глобального поля течений  $W$  представлена в виде блок-схемы, изображенной на рис. 9.

Описание поля течений может предоставлять набор узловых точек:

$$\begin{aligned} x &= [x_i, x_{i+1}, \dots, x_{k-1}, x_k], \\ y &= [y_i, y_{i+1}, \dots, y_{k-1}, y_k], \end{aligned} \quad (17)$$

где  $i = 1 \dots k$ ,  $k$  – конечное количество точек сплайна  $N_{i,k}(x)$ . В качестве функции, ограничивающей зону течения  $W$ , используется b-spline. Общая формула для расчета коэффициентов b-spline [7]:

$$N_{i,k}(x) = \frac{x - t_i}{t_{i+k-1} - t_i} N_{i,k-1}(x) + \frac{t_{i+k} - x}{t_{i+k} - t_{i+1}} N_{i+1,k-1}(x), \quad (18)$$

где  $I$  – индекс текущей точки,  $x$  – значение от  $i$  до  $i + 1$  (шаг),  $t$  – массив индексов.

$$t = \begin{cases} 0, & \text{if } i < k \\ i - k + 1, & \text{if } k \leq i \leq n. \\ n - k + 2, & \text{if } i > n \end{cases} \quad (19)$$

Относительно точек  $x, y$  на основании блок-схемы на рис. 9 может строиться характеристическая модель глобального поля течения.

Определим значения интенсивности  $q$  и направленности  $\xi$  течения в каждой точке  $\chi(q, \xi) \in W$  как отклонение от стандартного значения (к примеру,  $flow = 5$ ) в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned} q_{j1} &= Flow \cdot (1 + \Delta Q), \quad j = 1, \\ q_{j1} &= q_{(j-1)1} \cdot K_{int}, \quad j = 2, \end{aligned} \quad (20)$$

где  $\Delta Q = [-0,1 \dots 0,1]$  – коэффициент изменения интенсивности течения,  $K_{int} = 0,3$  – коэффициент, описывающий градиент изменения интенсивности течения от  $q_{11}$  к  $q_{j1}$ .

Таким образом, массив значений интенсивности течений  $Q$  формируется на основе выражений (4) и может быть представлен в виде:

$$Q = \begin{bmatrix} q_{11} & \dots & q_{j1} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ q_{1k} & \dots & q_{jk} \end{bmatrix}, \quad (21)$$

где  $j$  – количество сплайнов, определяющих цифровое поле течений,  $k$  – количество ключевых точек сплайнов  $P_{flow}$ . Следует, учесть что  $q_{jk} = \text{const}$  для всех значений  $P_{flow}(j, k)$ .

Направленность  $\xi$  течения в каждой точке  $\chi(q, \xi) \in W$  может быть описана следующими выражениями:

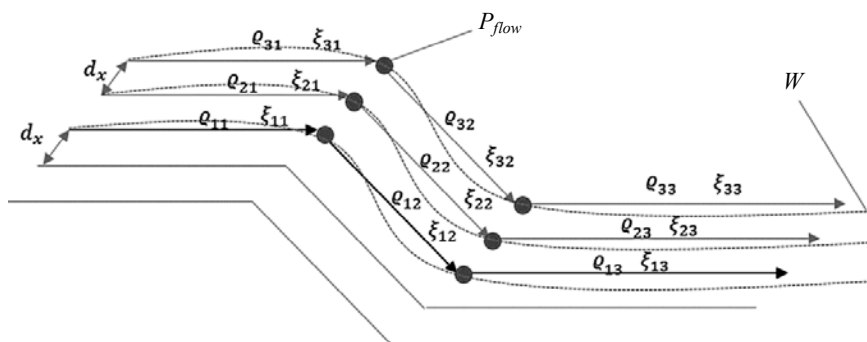
$$\begin{aligned} \xi &= \xi_i + \Delta C_\xi, \\ \xi_i &= \text{atan}(\Delta y_i / \Delta x_i), \\ \Delta y_i &= y_i - y_{i-1}, \end{aligned} \quad (22)$$

$\Delta x_i = x_i - x_{i-1}$ ,  
 где  $x_i, y_i$  – текущие точки, в которых рассчитывается направленность течения,  $\Delta C_\xi$  – коэффициент приращения направления течения, зависящий от направленности в текущей и предыдущей точке,  $\Delta C_\xi$  – случайная составляющая, вносящая погрешность (недетерминированное воздействие / шум) в диапазоне  $\Delta C_\xi = (-0,3 \dots 0,3)$ .

Таким образом для любой произвольной точки  $P_{cur}$  на карте акватории могут быть рассчитаны параметры интенсивности и направленности с уче-

**Рис. 10.** Схема построения поля течений

**Fig. 10.** Layout of current field development



том выражений (20–22) с учетом определения двух смежных точек  $x_i - x_{i-1}$

$$\xi_{P_{cur}} = \frac{\xi_i - \xi_{i-1}}{2}, \quad (23)$$

$$g_{P_{cur}}(j, k) = \frac{(g_{jk} - g_{jk-1})}{2}.$$

Схематичное представление построения поля течений представлено на рис. 10.

Полученная модель характеристической карты течений может быть использована в модуле планирования глобальной траектории перемещения группы БЭС и введения соответствующих корректировок в процессе выполнения миссии.

## Разработка имитационного комплекса моделирования перемещения многоагентной системы

Development of simulation system for multi-agent group movements

Для успешного функционирования разработанных систем и алгоритмов в условиях неопределенных и динамических сред (таких как морская среда) необходимо разработать комплекс, способный за счет программных средств промоделировать перемещение группы БЭС в условиях неопределенной среды с наличием препятствий и учетом сложных карт течений.

Особенностью разрабатываемого имитационного комплекса является его способность интегрировать в единую модель такие аспекты, как групповая координация, обход препятствий и учет сложных карт течений. Это позволяет исследовать и оценивать производительность и надежность решений, прежде чем они будут внедрены на практике.

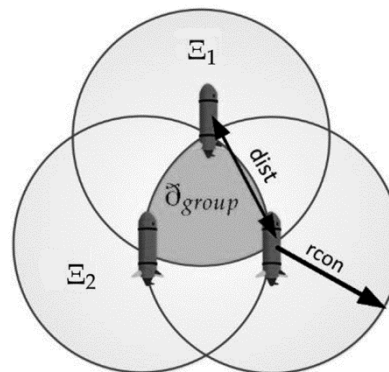
Разрабатываемый имитационный комплекс моделирования перемещения группы агентов в не-

определенной среде с учетом карты течений разработан с использованием фреймворка ROS (Robot Operating System).

В имитационном комплексе моделирования сразу учтем особенность построения и сохранения формации в условиях высокой неопределенности морской среды (волнение, течения, стратификация). Необходимо учесть, что структура формации  $\mathcal{F}_g$  является областью взаимодействия группы  $\Psi_g$ , определяемой фактическими параметрами имеющейся системы связи  $r_{con}$ .

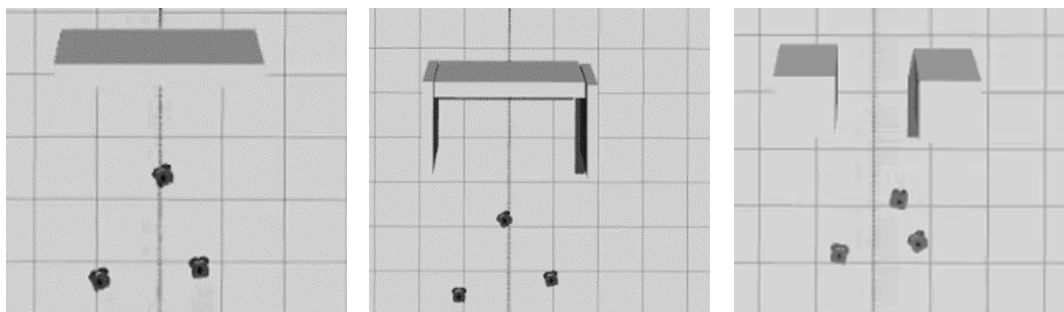
В работе рассматривается пример перемещения строя типа «клин». Пример построения такой области представлен на рис. 11.

Строй «клин» описывается тремя переменными ( $D_1, D_2, D_3$ ), составляющими дистанции между роботами. На основе среднеквадратичного отклонения между текущим положением роботов в формации ( $D_{real1}, D_{real2}, D_{real3}$ ) и эталонным ( $D_1, D_2, D_3$ ) введем метрику, оценивающую сохранение строя. В общем виде метрика оценивания сохранности



**Рис. 11.** Пример построения формации «клин» и определение области взаимодействия группы

**Fig. 11.** Example of UUV group rearranging to “wedge” formation and definition of group interaction domain



**Рис. 12.** Рассматриваемые три сцены (изначальное расположение препятствий неизвестно)  
**Fig. 12.** Three investigated scenarios (initial arrangement of obstacles unknown)

строю, состоящего из  $n$  роботов, может быть представлена в виде:

$$\Delta\Psi_g = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_{real1} - D_i)^2}{n}}. \quad (24)$$

В случае, когда  $\Delta\Psi_g > r_{con}$ , группа переходит в режим ожидания  $Y_{wait}$ .

В процессе моделирования примем следующие значения, накладывающие ограничения на область взаимодействия группы. Изначальное расстояние между агентами в группе  $d_{rsi,j} = 2$  м, максимальная дальность связи  $r_{con} = 5$  м, дальность видимости СТЗ  $D_{range} = 3$  м.

В рамках этой работы были настроены и созданы различные сцены, представленные на рис. 12.

Ниже представлены результаты работы имитационного комплекса моделирования перемещения группы агентов с неизвестным стационарным препятствием («стена»).

На рис. 13 (см. вклейку) агенты группы обозначены синим ( $id 1$ ), красным ( $id 2$ ) и зеленым ( $id 3$ ). Розовым цветом представлен центр формации. В процессе перемещения СТЗ агентов обнаруживает препятствие  $P_{obs}$  (красное облако точек), на основе имеющейся информации система глобального планирования осуществляет перестроение деревьев каждого агента  $T_{tree i}$ . Пример определения поля взаимодействия группы  $\Psi_g$  представлен на рис. 14.

В процессе обхода препятствия роботы не покинули область взаимодействия  $\Psi_g$  (максимальное удаление друг относительно друга составило  $\Delta\Psi_g = 4,7$  м, что является допустимым). После обхода препятствия агенты восстановили строй и продолжили перемещение. Изначальная длина построенных деревьев составляет  $D_{T_{tree1}} = 26,661$ ,  $D_{T_{tree2}} = 29,458$ ,

$D_{T_{tree3}} = 29,187$ . Фактическая пройденная дистанция роботами:  $L_{R1} = 29,531$ ,  $L_{R2} = 30,843$ ,  $L_{R3} = 31,254$ .

Ниже представлены результаты по перемещению группы роботов в других сформированных сценах (рис. 15, см. вклейку).

В данном случае аппараты, обнаружив зоны видимых препятствий  $P_{obs}$ , на основании алгоритмов единого поля видимости  $\Theta_g$  (в которой агент 1 имел большую свободную зону) приняли решения о реконфигурации  $\Theta_{g\_free} > Cr$  и прохождении препятствия через «ворота», с последующим восстановлением формации.

Пример прохождения сцены с П-образным препятствием представлен на рис. 16 (см. вклейку).

В результате проведенных экспериментов продемонстрировано, что разработанный комплекс систем и алгоритмов успешно преодолевает разнообразные типы препятствий в неопределенной среде. В одном из случаев при обходе препятствий группа роботов вышла за пределы допустимой области взаимодействия группы  $\Delta\Psi_g = 5,7$  м. Переход группы в режим реконфигурации обеспечил обход препятствия и восстановление формации группы.

Следующим этапом проходило исследование работоспособности алгоритмов в условиях имеющих течений и динамических препятствий. На разработанные сценарии (сцена 2 и 3) была нанесена структура течений, как это показано на схеме, изображенной на рис. 17 (см. вклейку).

Пример работы алгоритма при учете противонаправленного течения представлен на рис. 18 (см. вклейку).

На рис. 18 видно, что в начальной стадии инициализации планировщик создал маршруты, аналогичные тем, которые были рассчитаны в случае, показанном на рис. 15. Однако на определенной

итерации, когда алгоритм проанализировал поле течения и оценил его направленность и интенсивность, глобальные маршруты были пересмотрены и перестроены на основе полученных данных.

Пример учета кругового течения на сцене с препятствием «стена» представлен на рис. 19 (см. вклейку).

Как видно из результатов моделирования, разработанная система обеспечивает успешный обход группой агентов обнаруженных препятствий.

Важно отметить, что система эффективно учитывает сложную структуру карты течений, которая может включать течения, как направленные в соответствии с движением группы агентов, так и противоположные направлению движения группы.

## Заключение

### Conclusion

В статье представлен принципиально новый алгоритм построения характеристической модели глобального поля течений, учитывающих параметры интенсивности и направленности течений. Применение этого алгоритма в морской навигации открывает новые перспективы для обеспечения безопасности и эффективности движения судов в различных гидрологических сценариях.

Модель обеспечивает возможность цифрового прогнозирования течений, что позволяет судам эффективно выбирать оптимальные маршруты и минимизировать временные затраты. Суда, оснащенные этим алгоритмом, способны эффективно преодолевать преграды, такие как течения, блуждающие льды и другие внешние гидродинамические воздействия. Разработанная модель предоставляет информацию об интенсивности и направленности течений в узкостях и каналах, что существенно облегчает процесс навигации и уменьшает риски столкновения.

Представлен процесс разработки системы локального планирования группы и формирования единого поля видимости, определяющий политику реконфигурации агентов группы МРТК на основе данных от СТЗ на локальном уровне. Проведено имитационное моделирование перемещения группы агентов в сценах со статическими препятствиями. Описан подход к формированию области взаимодействия группы на основе имеющихся ограничений системы связи.

## Список использованной литературы

1. Кириллова М.А., Рожко А.И. Перспективы развития безэкипажных судов в Российской Федерации //

- Вестник Астраханского государственного технического ун-та. Серия: Морская техника и технология. 2020. № 3. С. 16–22. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-16-22.
2. Горбацкий В.В., Шпилев Н.Н., Лебедева Е.С. Контроль течений на поверхности прибрежных морских акваторий дистанционными методами // Труды Крыловского государственного научного центра. 2022. Вып. 1(399). С. 159–167. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-159-167.
3. Ермаков С.В., Бондарев В.А. Опасная, экстремальная и чрезвычайная ситуации в судовождении // Вопросы безопасности. 2017. № 4. С. 13–22. DOI: 10.25136/2409-7543.2017.4.23569.
4. Maevskiy A.M., Gorelyi A.E., Morozov R.O. Development of a hybrid method for planning the movement of a group of marine robotic complexes in a priori unknown environment with obstacles // 2021 IEEE 22<sup>nd</sup> International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM): proceedings. [Piscataway], 2021. P. 461–466. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507660.
5. Разработка многоуровневой системы планирования траектории движения группы АНПА в неизвестной среде с препятствиями / А.М. Маевский, Р.О. Морозов, В.А. Рыжов, А.Е. Горелый // Известия Южного федерального ун-та. Технические науки. 2021. № 1. С. 30–47. DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47.
6. Гамс А.В. Тенденции развития безэкипажного (автономного) судовождения в России // Научные труды Дальрыбвтуза. 2022. Т. 61, № 3. С. 57–63.
7. Виноградов В.Н., Ивановский Н.В., Новоселов Д.А. Анализ влияния случайных параметров судна на управляемость и безопасность // Вестник ВГАВТ. 2018. № 55. С. 169–181.
8. Юрин И.В., Лебедев Г.В., Лившиц И.И. Перспективы использования безэкипажных транспортных судов в морях арктического бассейна России // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2021. Т. 21, № 1. С. 73–84. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-73-84.
9. Коднянко В.А. Направленные сплайны и их использование для сглаживания выбросов и изломов интерполянта // Вестник Южно-Уральского государственного ун-та. Серия: Вычислительная математика и информатика. 2021. Т. 10, № 1. С. 5–19. DOI: 10.14529/cmse210101.

## References

1. Kirillova M., Rozhko A. Prospects of unmanned vehicles in Russia // Vestnik of Astrakhan State Technical University. Marine Engineering and Technologies series.

2020. No. 3. P. 16–22. DOI: 10.24143/2073-1574-2020-3-16-22 (*in Russian*).
2. *Gorbatsky V., Shpilev N., Lebedeva Ye.* Remote monitoring of surface coastal currents // Transactions of Krylov State Research Centre. 2022. Vol. 1(399). P. 159–167. DOI: 10.24937/2542-2324-2022-1-399-159-167 (*in Russian*).
  3. *Yermakov S., Bondarev V.* Contingencies, hazards and emergencies in navigation // Security Issues. 2017. No. 4. P. 13–22. DOI: 10.25136/2409-7543.2017.4.23569 (*in Russian*).
  4. *Maevskiy A.M., Gorelyi A.E., Morozov R.O.* Development of a hybrid method for planning the movement of a group of marine robotic complexes in a priori unknown environment with obstacles // 2021 IEEE 22<sup>nd</sup> International conference of young professionals in electron devices and materials (EDM): proceedings. [Piscataway], 2021. P. 461–466. DOI: 10.1109/EDM52169.2021.9507660.
  5. Multi-level route planning system for unmanned vehicle group in unknown environment with obstacles / *A. Maevsky, R. Morozov, V. Ryzhov, A. Gorely* // Izvestiya SFedU. Engineering Sciences. 2021. No. 1. P. 30–47. DOI 10.18522/2311-3103-2021-1-30-47 (*in Russian*).
  6. *Gams A.* Development trends in Russian unmanned vehicle navigation // Scientific Journal of the Far East State Technical Fisheries University. 2022. Vol. 61, No. 3. P. 57–63 (*in Russian*).
  7. *Vinogradov V., Ivanovsky N., Novoselov D.* Effect of random parameters upon maneuverability and safety of ships // Bulletin of Volga State Academy of Water Transport, 2018. No. 55. P. 169–181 (*in Russian*).
  8. *Yurin I., Lebedev G., Livshits I.* Prospects of unmanned shipping in Russian Arctic // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. 2021. Vol. 21, No. 1. P. 73–84. DOI: 10.17586/2226-1494-2021-21-1-73-84 (*in Russian*).
  9. *Kodnyanko V.* Directional splines and their application to smoothening spikes and breaks of interpolant // Bulletin of the South Ural State University. Series: Computational Mathematics and Software Engineering. 2021. Vol. 10, No. 1. P. 5–19. DOI: 10.14529/cmse210101 (*in Russian*).
- 

#### Сведения об авторе

*Маевский Андрей Михайлович*, начальник отдела морской робототехники ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный морской технический университет». Адрес: 190121, Россия, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3. E-mail: maevskiy\_andrey@mail.ru.

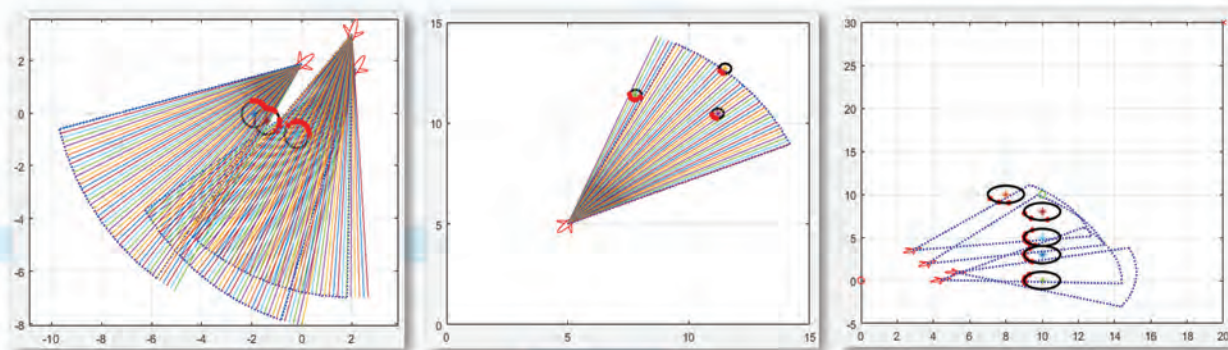
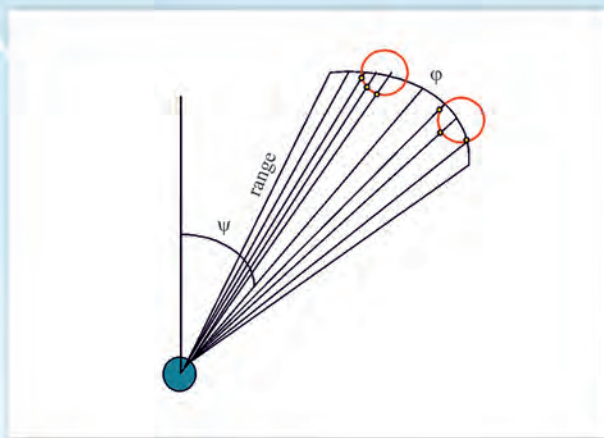
#### About the author

*Andrey M. Maevskiy*, Head of Marine Department, St. Petersburg State Marine Technical University. Address: 3, Lotsmanskaya st., St. Petersburg, Russia, post code 190121. E-mail: maevskiy\_andrey@mail.ru.

Поступила / Received: 06.02.24  
Принята в печать / Accepted: 04.03.24  
© Маевский А.М., 2024

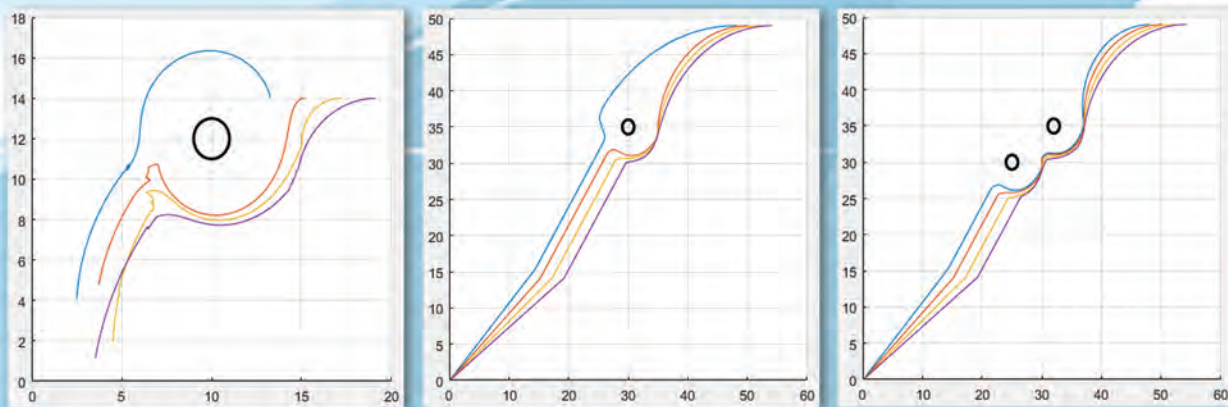
**Рис. 1.** Схематичное изображение работы алгоритма модуля системы технического зрения

**Fig. 1.** Flow chart of machine vision algorithm implemented in the module



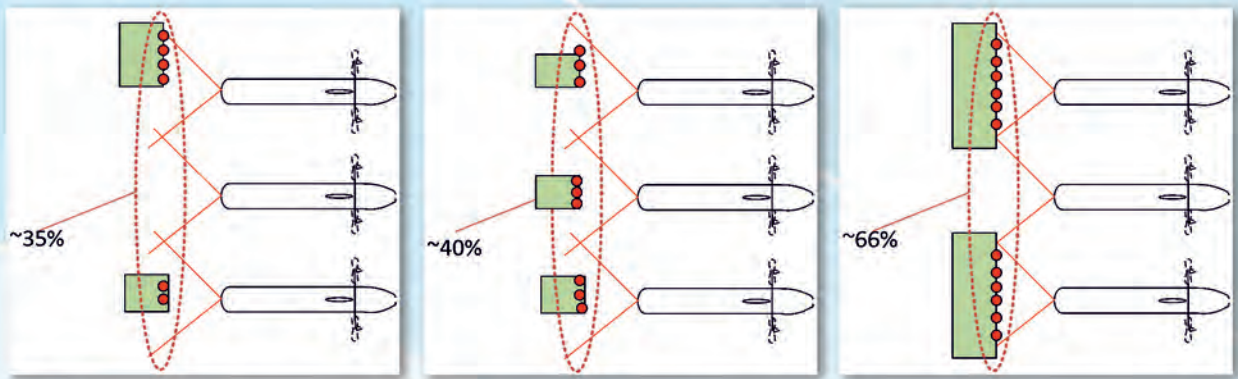
**Рис. 2.** Пример работы модуля системы технического зрения (одного агента) и обнаружения облака точек (красные точки) группой морских робототехнических комплексов

**Fig. 2.** Example of machine-vision module operation (one agent) and detection of dot cloud (red dots) by a group of marine robots



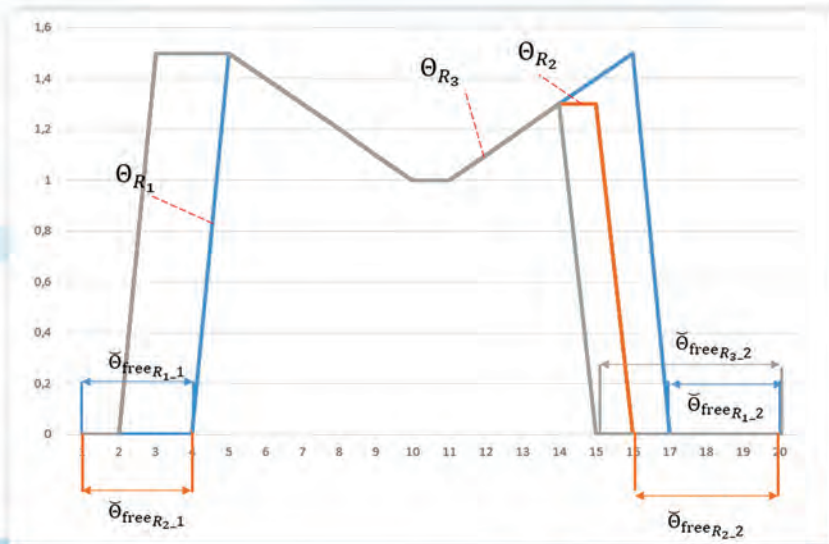
**Рис. 3.** Пример обхода статических препятствий группой агентов за счет применения системы визуального потенциального поля

**Fig. 3.** Example of UUV group bypassing static obstacle thanks to visual prediction system



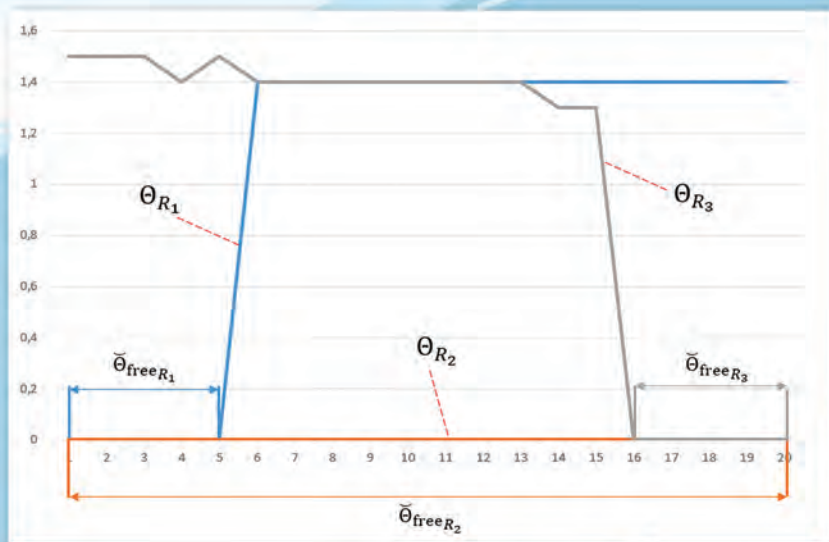
**Рис. 4.** Составление общего поля видимости и принятия решения о реконфигурации группой автономных необитаемых подводных аппаратов

**Fig. 4.** Development of common visual field and regrouping decision making for UUV group



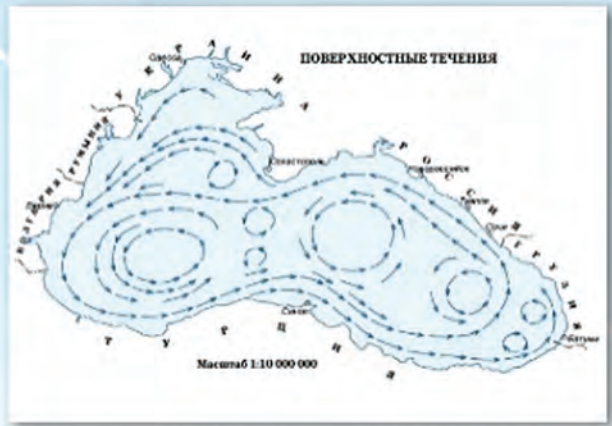
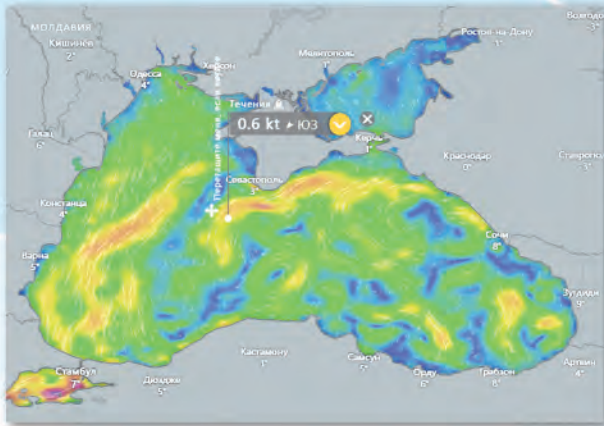
**Рис. 6.** Пример оценки общего поля видимости группы  $\Theta_g$  (для первой ситуации из рис. 5)

**Fig. 6.** Example of vision field  $\Theta_g$  assessment for UUV group (Scenario 1 in Fig. 5)

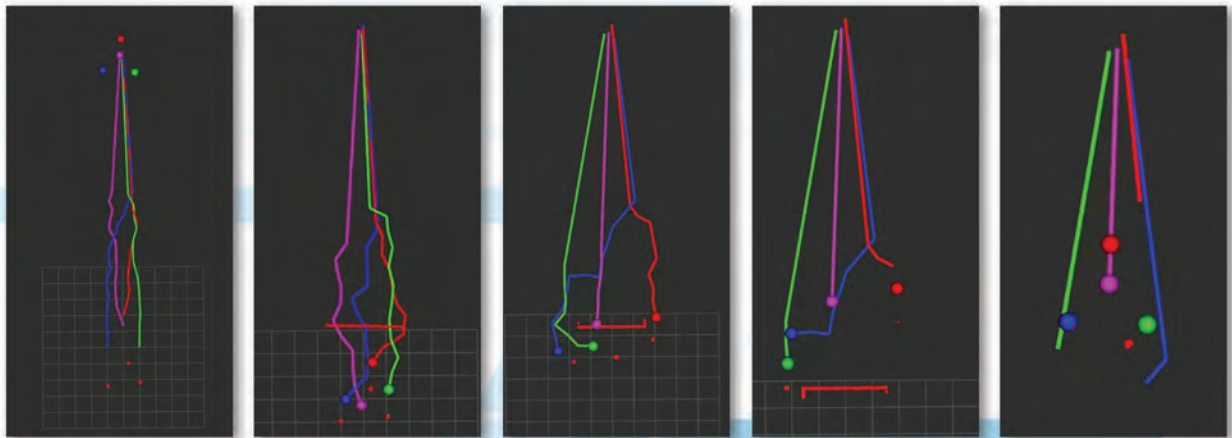


**Рис. 7.** Пример оценки общего поля видимости группы  $\Theta_g$  (для второй ситуации из рис. 5)

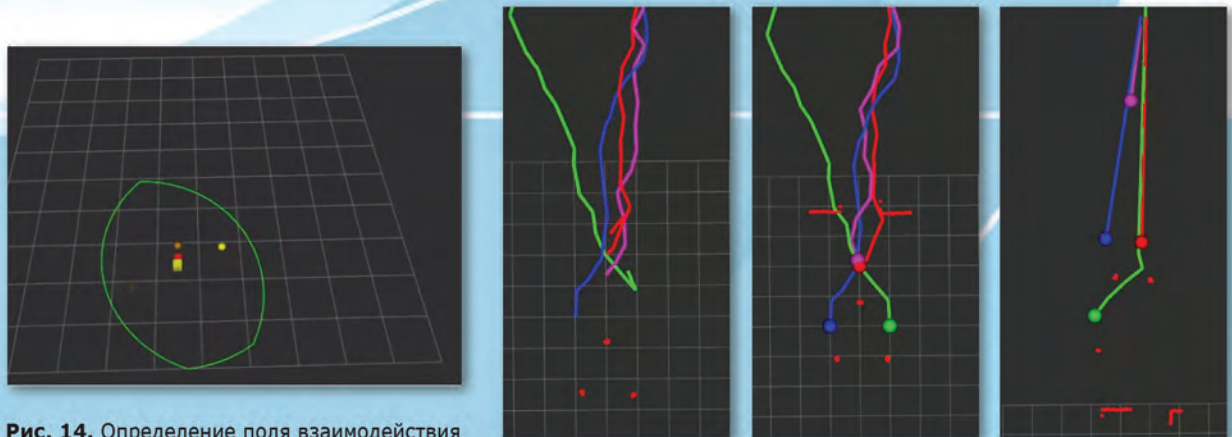
**Fig. 7.** Example of vision field  $\Theta_g$  assessment for UUV group (Scenario 2 in Fig. 5)



**Рис. 8.** Карты течений Черного моря  
**Fig. 8.** Maps of Black Sea currents

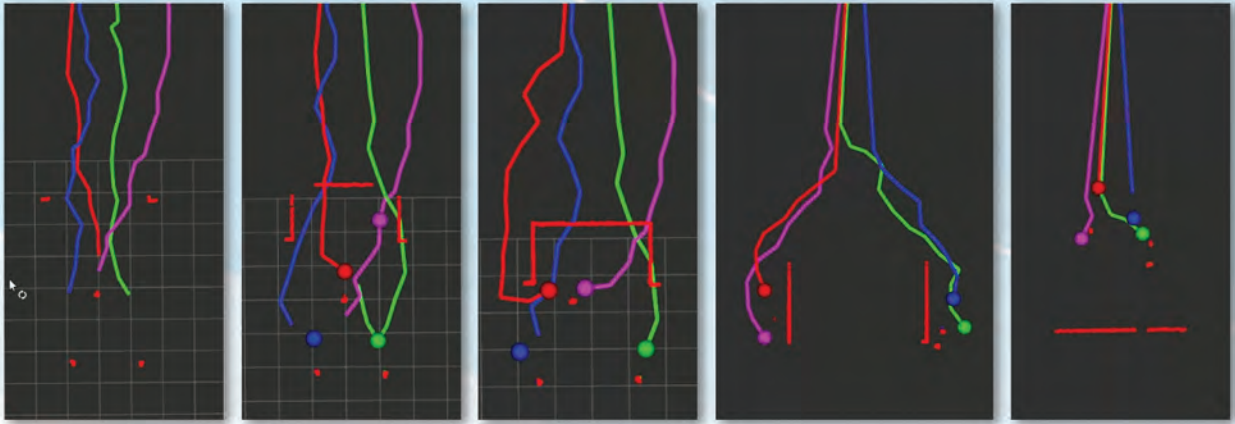


**Рис. 13.** Пример перемещения группы (первая сцена – препятствие «стена»)  
**Fig. 13.** Example of group movement (Scenario 1 – “wall” obstacle)

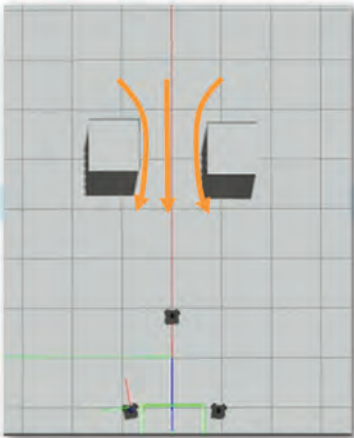


**Рис. 14.** Определение поля взаимодействия группы  $\Psi_g$  в процессе перемещения  
**Fig. 14.** Definition of group interaction field  $\Psi_g$  during movement

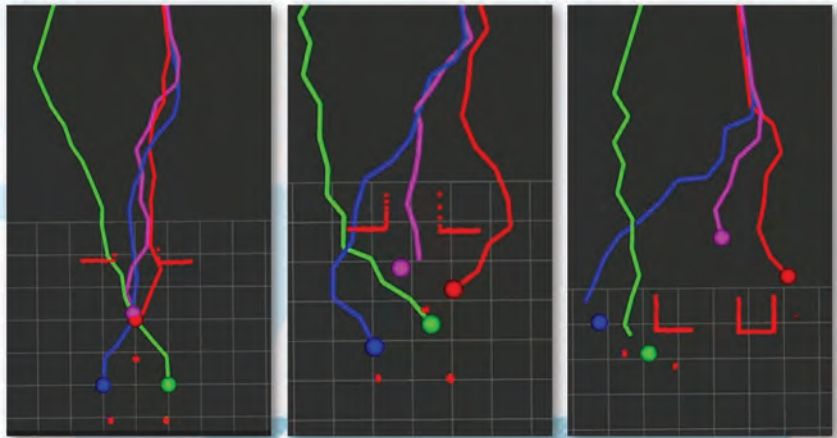
**Рис. 15.** Пример прохождения группой препятствия типа «ворота»  
**Fig. 15.** Example of UUV group overcoming “gate” obstacle



**Рис. 16.** Моделирование прохождения группой препятствия П-образного типа  
**Fig. 16.** Simulation of UUV group overcoming a П-shaped obstacle



**Рис. 17.** Пример сцены моделирования с областью течения, противонаправленного движению  
**Fig. 17.** Example of simulation – cross-current conditions



**Рис. 18.** Пример работы алгоритма с учетом обхода течения  
**Fig. 18.** Example of algorithm operation – Bypassing the current



**Рис. 19.** Пример учета кругового течения при перемещении в сцене с препятствием «стена»  
**Fig. 19.** Example of overcoming the "wall" obstacle with consideration of circular current