

**М.А. Маевский, В.Ю. Занин, И.В. Кожемякин**

**РАЗРАБОТКА КОМБИНИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ  
РЕЗИДЕНТНЫМ/ИНТЕРВЕНЦИОННЫМ АНПА НА ОСНОВАНИИ  
ПОВЕДЕНЧЕСКИХ МЕТОДОВ**

*Целью исследования является разработка комбинированных систем управления (СУ) автономным необитаемым подводным аппаратом (АНПА) интервенционного класса и манипуляторным комплексом (МК), установленным на АНПА. Аппараты такого типа являются важной составляющей подводных резидентных систем, которые позволяют расширять спектр задач, выполняемых типовыми АНПА. Система носит многоуровневый характер, позволяющий на должном уровне описать определенные состояния и поведения аппарата в зависимости от поставленной задачи. Разработанная система отличается своей универсальностью и модульностью, что подразумевает быстроту в настройке/корректировке текущих задач, поставленных перед АНПА и простом внедрении и формировании дополнительных задач со стороны оператора. В качестве примера, рассматривается задача, связанная с типовой работой резидентного АНПА – пробоотбор фракций грунта. Приведенные результаты натурных испытаний подтверждают работоспособность предложенных подходов к управлению, с учетом внешних недетерминированных возмущений постоянного характера и моногармонического воздействия. В рамках выполнения поставленной задачи, описывается процесс формирования состояний АНПА, команд перехода между состояниями, формирования дерева поведений аппарата. Научная и практическая новизна полученных результатов, представленных в статье, состоит в реализации первого в РФ разработанного аппаратно-программного комплекса для АНПА, позволяющего обеспечить процесс пробоотбора грунта как в автоматизированном, так и автономном режиме управления.*

*Резидентная робототехника; автономный необитаемый подводный аппарат; интервенционный АНПА; поведенческие методы.*

**A.M. Maevskiy, V.U. Zanin, I.V. Kozhemyakin**

**DEVELOPMENT OF A COMBINED CONTROL SYSTEM FOR  
RESIDENT/INTERVENTION AUV BASED ON BEHAVIORAL METHODS**

*The aim of the study is the development of combined control systems by an autonomous underwater vehicle (AUV) of the intervention class and a manipulator complex installed on the AUV. Appliances of these types are an important component of underwater resident systems that allow you to expand the range of tasks performed by typical AUVs. The system is multi-level in nature, which allows to properly describe certain states and behavior of the device, depending on the task. The developed system is distinguished by its versatility and modularity, which implies the speed in setting up / adjusting the current tasks assigned to the AUV and the easy implementation and formation of additional tasks by the operator. As an example, we consider the problem associated with the typical work of a resident AUV – sampling of soil fractions. The above results from field tests confirm the workability of the proposed approaches to control, taking into account external non-deterministic perturbations of constant and monoharmonic effects. As part of the task, the process of forming the AUV states, transition commands between states, and the formation of a tree of device behavior is described. The scientific and practical novelty of the results presented in the article consists in the implementation of the first developed hardware-software complex for the AUV in the Russian Federation, which allows for the process of soil sampling in both automated and autonomous control modes.*

*Resident AUV; i-AUV; behavior tree; control system.*

**Введение.** В настоящее время все более востребованными являются многофункциональные автономные обитаемые подводные аппараты (АНПА) способные выполнять широкий спектр поставленных задач. Таким образом интенсивное развитие получила область резидентной робототехники. Поскольку масштабы и сложность операций АНПА увеличиваются, соответственно возрастает потребность в подводных технических и обследовательских работах. Внедрение резидентных систем обеспечит преимущества для операторов нефтегазовой отрасли и сервисных компаний в таких областях, как получение исходных данных об окружающей среде, повышение эффективности и безопасности выполняемых работ, повышение безопасности проведения работ, снижение затрат на реализацию миссии, уменьшение эмиссии CO<sub>2</sub> при выполнении морских операций. Резидентная робототехника - новейший класс морских робототехнических комплексов, функционирующих в составе донной инфраструктуры океанографических обсерваторий и/или нефтегазового месторождения с размещением на донных и плавучих доковых станциях, имеющие энергетические и/или командные коммуникации с объектами береговой инфраструктуры. В силу ограниченности радиуса действия уже существующих и применяемых в коммерческом использовании телеуправляемых обитаемых подводных аппаратов резидентного базирования - автономные обитаемые подводные аппараты резидентного базирования рассматриваются как предпочтительные уже в ближней перспективе, находясь, в настоящее время, на этапе опытной эксплуатации. Для увеличения функциональных возможностей традиционных АНПА, различными компаниями ведутся теоретические и практические разработки так называемых «интервенционных» АНПА, опирающиеся на более чем 30-летнюю базу экспериментальной и опытной наработки [1–5]. Отличительной особенностью данных аппаратов является наличие на борту инструментальных комплексов (ИК) и/или многостепенных манипуляторных комплексов (МК), функционирующих самостоятельно или совместно с ИК. Очевидно, что для выполнения поставленных задач необходима разработка комбинированных систем управления (САУ), способных как компенсировать внешние возмущения, создаваемые окружающей средой, так и возмущения, создаваемые при работе ИК и МК. В рамках выполнения работы, авторами был использован и модифицирован подход на основании поведенческих методов. Как результат исследований, приводятся данные проведенных испытаний разработанного экспериментального образца (демонстратора технологий) интервенционного АНПА и функционирующих бортовых систем САУ.

**Формальная постановка задач резидентных АНПА.** Многие из проблем, например, связанных с морскими нефтегазовыми операциями, особенно на больших глубинах или в районах с тяжёлыми ледовыми условиями, могут быть решены путем развертывания подводных резидентных систем инспекции и мониторинга. В то время как подводные месторождения нефти и газа становятся все более распространенными, современные тенденции формируют будущие разработки месторождений. Совершенно очевидно, что большинство будущих разработок будет сосредоточено на глубоководных и сверхглубоких водах. Распространение современных операций инспекции и мониторинга на большие глубины подразумевает увеличение сложности операций, а также интенсивное развитие подводных добывающих комплексов и структур подводной сейсморазведки [1, 6–9].

Так, список накладываемых задач на резидентный АНПА можно отобразить при помощи следующего рис. 1, где наглядно показано как возрастает сложность выполнения работ в зависимости от типа поставленной задачи.

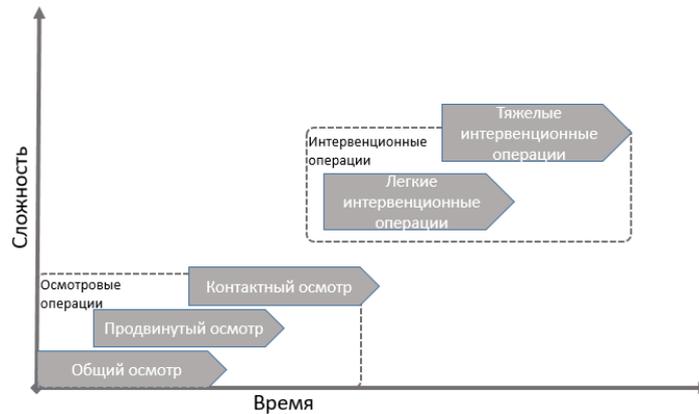


Рис. 1. Сложность различного типа подводных операций

Как видно из рис. 1, выделены основные типы выполняемых АНПА задач: задачи, содержащие в себе операции осмотрового типа и задачи, состоящие из «интервенционных» операций [10, 11]. Так, к интервенционным задачам можно отнести «легкие» задачи, связанные с работой манипуляторного комплекса с гидравлическими разъемами и поворотными клапанами, с подключением/отключением электрических проводов подводного добывающего комплекса (ПДК), очистку разъемов, пробоотбор жидкостей/грунта, и прочее. К «тяжелым» операциям относятся задачи, связанные с заменой сменных модулей ПДК, переключением дроссельных модулей, строительные и ремонтные работы.

Допустим, что имеется сформированная донная инфраструктура, в рамках которой располагаются различные элементы (рабочие платформы подводных добывающих комплексов (ПДК), подводные трубопроводные системы и т.д.). Необходимо обеспечить полное функционирование АНПА в данном окружении с учетом выполнения следующих типовых миссий, связанных с:

- ◆ работой на подводной панели ПДК, с предварительно уставленной системой беспроводной оптической передачи сигнала (БОПС);
- ◆ работой по инспекции и сервисному обслуживанию ПДК;
- ◆ работой по пробоотбору грунта в пространстве координат  $R$  районах  $N$  областей  $S_i$ , число которых можно описать  $i = \overline{1, N}$  в частном случае прямоугольной формы, для которого известны координаты  $X_{c_i}, Y_{c_i}$  центра и  $H_{c_i}$  – глубина области пробоотбора, предварительно отсканированных на наличие возможных месторождений заданной инфраструктуры. Схематично задача представлена на рис. 2.

Общая задача для резидентного АНПА состоит в:

- ◆ организации перемещения аппарата в заданные области  $S_i$  (области забора грунта) и  $D$  (область рабочей панели);
- ◆ удержании заданной позиции АНПА в точке пробоотбора (рабочей панели ПДК);
- ◆ осуществлении работ МК как в автономном, так и в автоматизированном и в прямом режимах управления.

Исходя из особенностей типовых миссий, ставящихся перед аппаратом, логичным решением является разработка такой архитектуры управления комплексом, которая смогла бы совмещать в себе возможность задания, модернизации и внесения корректировок в имеющуюся миссию, отличалась бы модульностью, легкой масштабируемостью и адаптируемостью под другие задачи.

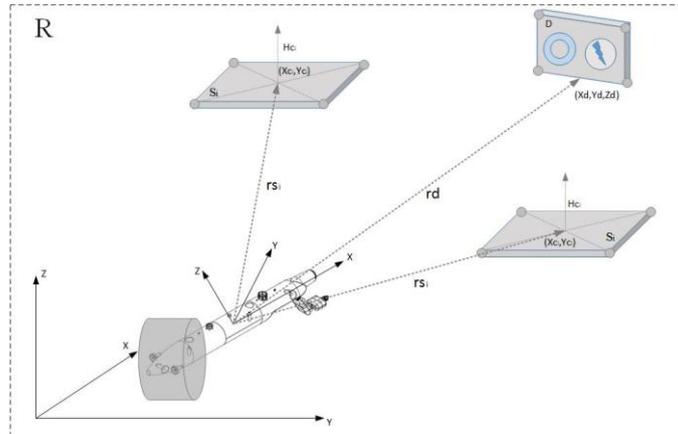


Рис. 2. Пространство выполняемой задачи

Таким образом, решение сформулированной задачи предлагается осуществлять посредством многоуровневой САУ. Схема САУ легкого интервенционного АНПА (ЛИ АНПА) представлена на рис. 3.

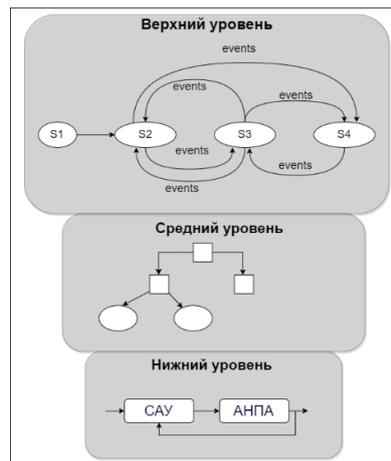


Рис. 3. Структура многоуровневой САУ ЛИ АНПА

На верхнем уровне осуществляется формирование определенных состояний аппарата и комбинации различных команд для перехода АНПА из одного состояния в другое. В основе САУ верхнего уровня лежит метод конечных автоматов. В качестве системы, обеспечивающей выработку целевых значений для САУ нижнего уровня, используется подход, основанный на поведенческих методах. Сегодня данные системы применяются на реальных объектах и доказали свою работоспособность в решении прикладных задач [12, 13]. Такой подход позволяет обеспечить легкую настройку, реконфигурирование и масштабируемость всей САУ в целом, что позволит существенно повысить функциональность АНПА в будущем. САУ среднего уровня - обеспечивает выработку необходимых заданий на систему управления нижнего уровня, контролирующую работу исполнительных механизмов АНПА [14–18].

**Объект исследования.** Рассмотрим модель подвижного объекта резидентного АНПА (рис. 4).

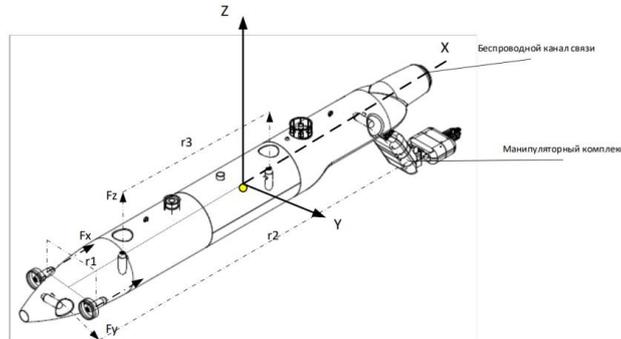


Рис. 4. Модель ЛИ АНПА

Для организации управления аппаратом была построена модель распределения обобщенных управляющих воздействий  $\tau \in R^n$  на исполнительные механизмы АНПА. В рамках разработанной модели резидентного интервенционного АНПА, приняты следующие допущения: движительные установки неподвижны  $\alpha = const$ , что позволяет избежать учета дополнительных нелинейных элементов уравнений [19].

За управляющую силу движителя примем следующее выражение:  $F = k * u$  где  $k$  – коэффициент пропорциональности,  $u$  – управляющее входное воздействие. Учтем, что данное линейное выражение также может быть использовано для описания нелинейных монотонных управляющих сил. Представим соотношение управляющих воздействий, сил и моментов резидентного АНПА в матричном виде:

$$\tau = \begin{bmatrix} f \\ r * f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ F_z * l_y - F_y * l_z \\ F_x * l_z - F_z * l_x \\ F_y * l_x - F_x * l_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

где  $f = [F_x, F_y, F_z]$  проекция создаваемых сил движительным комплексом,  $r = [l_x, l_y, l_z]$  – точки расположения соответствующих движителей относительно центра масс аппарата.

В зависимости от количества движителей вектор управляющих сил и моментов может быть записан в следующем виде:

$$\tau = T(\alpha)f = T(\alpha)Ku, \quad (2)$$

где  $K$  – матрица коэффициентов настройки управляющих воздействий

$$K = \text{diag} \{K_1, \dots, K_r\} \quad K^{-1} = \text{diag} \left\{ \frac{1}{K_1}, \dots, \frac{1}{K_r} \right\}$$

$u = [u_1, \dots, u_n]^T$  – вектор управляющих воздействий, приходящих на исполнительные механизмы,  $T(\alpha) \in R^n$  – матрица конфигурации тяги двигателя, в общем случае зависящая от угла наклона движительной части. В случае стационарного расположения движителей  $T = [t_1, \dots, t_r] = const$ . Значения  $t_i$  для существующей конфигурации движительного комплекса резидентного АНПА можно записать в виде:

$$t_{marsh_{1,2}} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ \pm l_y \end{bmatrix} \text{ – для маршевых движителей; } t_{vert_{1,2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ -l_z \\ l_y \end{bmatrix} \text{ – для вертикальных движителей, } t_{stab_{1,2}} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ l_y \\ 0 \end{bmatrix} \text{ – для боковых движителей}$$

Таким образом запишем общее выражение для вектора тяги на основании выражения (2)

$$\tau = TKu. \quad (3)$$

Или для вектора управляющих воздействий

$$u = K^{-1}T^{-1}\tau. \quad (4)$$

**Система управления манипуляторным комплексом.** Второй частью АНПА является установленный на борту манипуляторный комплекс. В виду необходимости использования МК в режиме реального времени и многочисленной настройки допусков МК, алгоритм расчета позиции конечного звена манипулятора основан на методе градиентной минимизации. Ход выполнения алгоритма представлен на схеме 5.

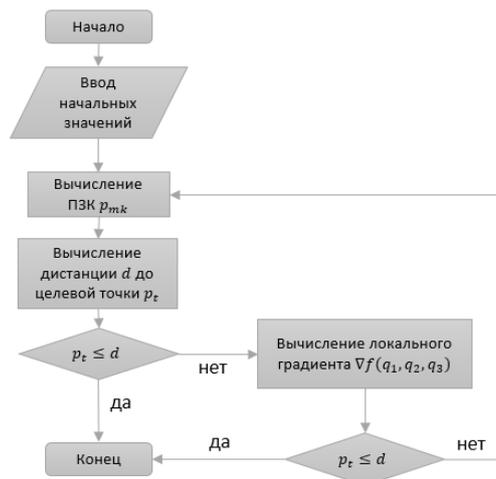


Рис. 5. Схема работы алгоритма градиентной минимизации

где в блок-схеме приняты следующие обозначения:  $p_{mk} (x_{mk}, y_{mk}, z_{mk})$  – текущее положение схвата МК;  $p_t (x_t, y_t, z_t)$  – целевое значение для положения схвата;  $d$  – минимальная дистанция между  $p_t$  и  $p_{mk}$  превышая которую, процесс работы градиентного спуска заканчивается;  $\nabla f(q_1, q_2, q_3)$  – локальный градиент для каждого угла МК.

При старте работы алгоритма происходит инициализация начальных значений параметров:  $L = 0.05$  – learning rate, отвечающего за скорость движения по градиенту;  $\zeta = [\Delta x, \Delta y, \Delta z]$  – sampling distance, отвечающего за приращение переменной градиента, значения которого равны 0.1.

Суть градиентного подхода заключается в постепенном смещении углов  $q_{mk} = [q_1, q_2, q_3]^T$  манипуляторного комплекса на величину  $q_{mk}(i) = q_{mk}(i-1) + \zeta$  для минимизации ошибки  $\varepsilon = d - p_t$ . Так, рассчитывая новые  $d$  на основании нового значения МК  $p_{mk}(i)$  мы можем получить текущее значение градиента как выражение

$$\begin{aligned} \nabla f_{q_1}(q_{mk}) &= (f(q_1 + \Delta x, q_2, q_3) - f(q_{mk})) / \Delta x \\ \nabla f_{q_2}(q_{mk}) &= (f(q_1, q_2 + \Delta y, q_3) - f(q_{mk})) / \Delta y \\ \nabla f_{q_3}(q_{mk}) &= (f(q_1, q_2, q_3 + \Delta z) - f(q_{mk})) / \Delta z. \end{aligned} \quad (5)$$

Таким образом, результирующий градиент для каждого из углов звеньев МК будет иметь вид

$$\nabla f(q_{mk}) = [\nabla f_{q_1}(q_{mk}); \nabla f_{q_2}(q_{mk}); \nabla f_{q_3}(q_{mk})]. \quad (6)$$

И получать новые значения  $q_{mk}$  как

$$q_{mk} = q_{mk} - L * \nabla f. \quad (7)$$

Как видно, данный цикл будет работать до тех пор, пока не выполнится условие  $p_t \leq d$ .

Разработанный метод управления, основанный на градиентном спуске, позволяет обеспечить непрерывное управление МК в различных режимах в конечный период времени. Так, в частности, были разработаны и реализованы в реальном времени режимы слежения за точкой и режим бездрожжистикового управления. Преимуществом этого метода управления является возможность его совершенствования при комплексном подходе к созданию интервенционного АНПА с целью снижения затрат вычислительной мощности бортовой САУ АНПА, в целях обеспечения не идеальных (лабораторных), а реальных, необходимых при практических операциях работах, с имеющимися диапазонами допусков МК. Модификация и настройка разработанного алгоритма может осуществляться при развитии метода градиентного спуска в виде метода наискорейшего спуска с оптимизированной экспериментальным путём величины шага исчерпывающего спуска. Также, преимуществами такой системы являются возможность быстрой настройки и изменения конфигурации миссии, без дополнительных программных процедур, усложняющих процесс изменения миссии аппарата в реальном времени.

**Разработка поведенческой системы резидентного АНПА.** После того, как были разработаны системы управления отдельными устройствами аппарата, является необходимой разработка общей системы (системы верхнего уровня), обеспечивающей формирование поведения аппарата в зависимости от поставленной задачи [20].

Как было указано выше, система разнесена на несколько основных уровней. На верхнем уровне реализация множества состояний АНПА описана при помощи метода конечных автоматов в виде  $M = (V, Q, q_0)$ , схема которого представлена на рис. 6.

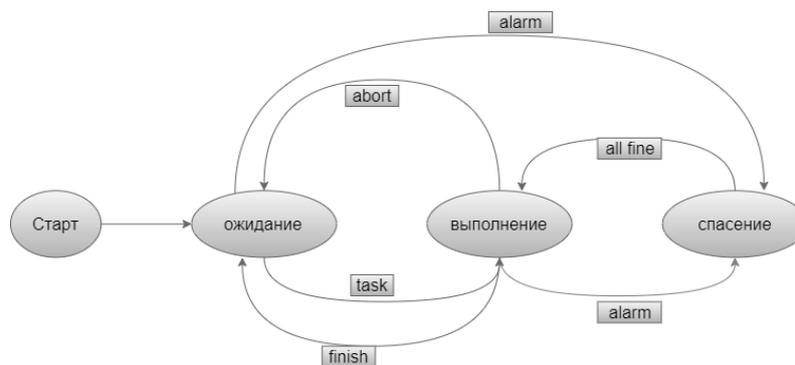


Рис. 6. Схема работы САУ верхнего уровня

Как видно, используемый конечный автомат является детерминированным, так как не содержит в цепочке команд (функций перехода) нулевых или пустых значений. Начальное состояние  $q_0$  – соответствует положению «старта» АНПА. Множество состояний резидентного АНПА  $Q = \{q_1, \dots, q_i\}$  где  $i$  – общее количество состояний, можно формализовать следующими определениями:

- ◆ Ожидание. В данном состоянии аппарат находится в режиме ожидания загрузки и получения миссии с наземного пункта управления.
- ◆ Выполнение. Данное состояние описывается отдельным деревом поведений, задающим совокупность определенных поведений объекта во время выполнения миссии.
- ◆ Спасение. Данное состояние также описывается отдельным деревом поведений, отвечающих за определенные действия аппарата в случае возникновения аварийных ситуаций.

Как видно из схемы, изображенной на рис. 6, за переходы в определенные состояния отвечают события  $q_i a_n \rightarrow q_j$  - где  $a \in V$  – определенное событие из списка событий  $V$ , генерирующееся при помощи менеджера событий, с которым сопряжены все структуры поведений аппарата. Описание состояний приведено на рис. 7.

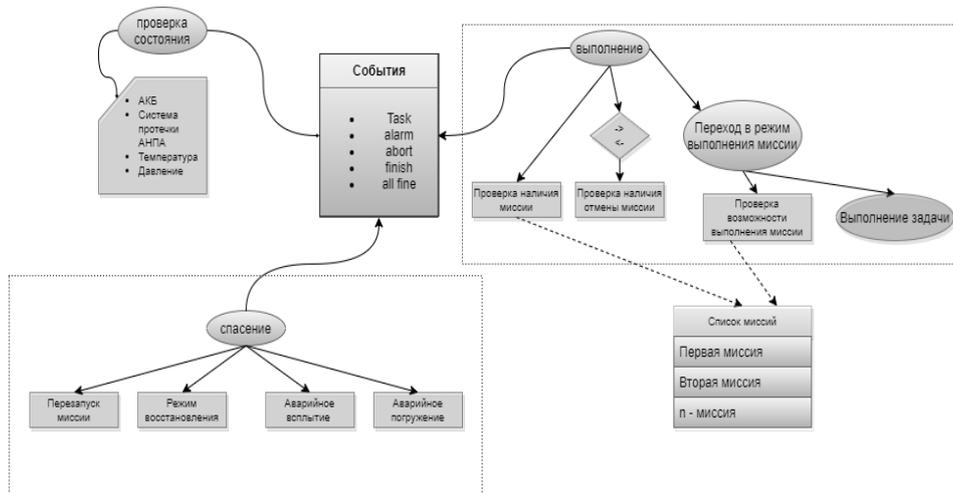


Рис. 7. Основные состояния ЛИ АНПА

На рис. 7 изображены состояния резидентного АНПА  $Q_i$ , каждое из которых описано своим деревом поведений. Разработанная архитектура системы управления имеет модульную структуру, что позволяет без особых сложностей добавлять новые деревья, описывающие те или иные задачи, формировать списки миссий АНПА. После прохождения каждого дерева, система выдает соответствующее событие в менеджер событий, который передает соответствующую команду на систему состояний верхнего уровня. Каждый элемент дерева, отвечающий за выполнение миссии, ссылается на список миссий, хранящийся в отдельном менеджере.

Объект дерева «выполнение задачи» также является отдельным деревом поведений, описывающих процесс выполнения сконфигурированных задач.

Например, опишем сформированную ранее задачу о необходимости осуществления пробоотбора грунта при помощи данного подхода (рис. 8).



Рис. 8. Пример сформированной задачи по пробоотбору грунта

**Результаты натурных испытаний разработанной системы.** В рамках испытательного бассейна СПбГМТУ были проведены натурные исследования работоспособности описанной системы (фотофиксация процесса эксперимента представлена на рис. 9). В ходе испытаний были учтены параметры расположения места пробоотбора по глубине ( $L=1$  м). Исходя из геометрической конфигурации аппарата и манипуляторного комплекса были выставлены следующие параметры поведения: стартовая глубина АНПА – 0,5 м, глубина предварительной позиции забора 0,6 м, глубина забора 0,7 м, заглубление в грунт до 0,09 м.



Рис. 9. Фотофиксация натурных испытаний работы САУ ЛИ АНПА в задаче пробоотбора грунта из установленной тары

Стоит учесть, что выход на стартовую позицию осуществлялся при помощи работы дополнительного дерева, описывающего процесс движения АНПА в заданную точку пространства  $R$ , а выбор диапазона глубин обусловлен зоной влияния волнового воздействия на АНПА при работе волнопродуктора испытательного бассейна.

Рассмотрим результаты работы системы стабилизации при выходе на заданную стартовую глубину, приведённые на рис. 10.

На рис. 10 изображена работа системы стабилизации резидентного АНПА [21] в режиме зависания над местом пробоотбора грунта. Аппарат приходит в устойчивое состояние за период времени равный  $t_{\text{пер}} = 30\text{с}$ . СКО по глубине  $d_h = 0,03$  м, СКО дифферента после режима регулирования  $d_\varphi = 0,47$  градусов от целевого значения. Система поддерживает устоявшийся режим при среднем постоянном управляющем воздействии  $\bar{P}_{F1,F2} = 10\%$  от общей мощности моторов.

Следует отметить, что во время проведения натурального эксперимента были, также, рассмотрены режимы при внешних воздействиях со стороны: внешнее принудительное отклонение аппарата  $F_v$  (рис. 11) и моногармоническое волновое воздействие, оказываемое при работе волнопродуктора испытательного бассейна [22].

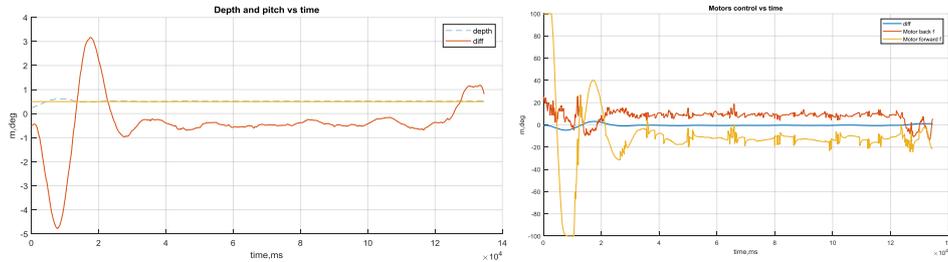


Рис. 10. График изменения параметров глубины и дифферента ЛИ АНПА в процессе работы систем стабилизации аппарата

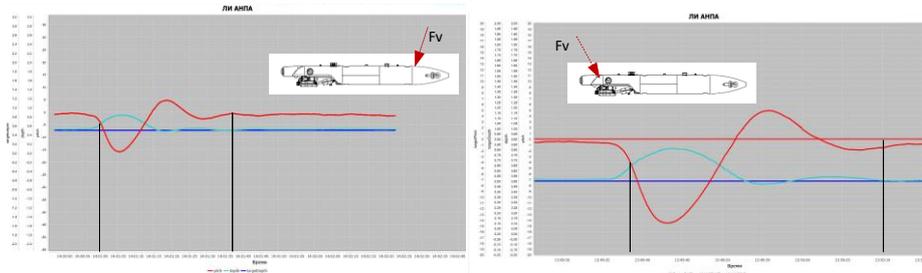


Рис. 11. Приложение возмущающей силы к носовой и кормовой части АНПА, при выполнении перехода в заданную глубину  $H=0.5$  м

Рассмотрим результаты, полученные во время испытаний, изображенные на рис. 12, 13.

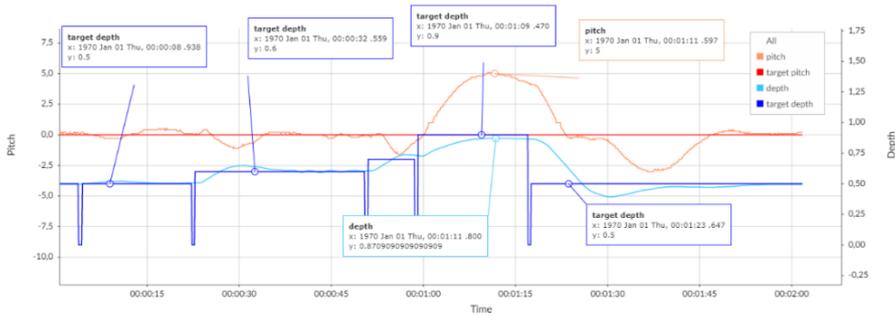


Рис. 12. Результаты работы комбинированной САУ ЛИ АНПА в процессе пробоотбора грунта (эксперимент 1)

На рис. 12, 13 изображены результаты двух экспериментов процесса пробоотбора грунта. Выделенными маркерами на рисунке изображены основные этапы работы системы управления АНПА, которая ступенчато переводила аппарат на заданную глубину. Можно отметить, что в процессе изменения и фиксирования заданной глубины наблюдается незначительная ошибка по параметрам отклонения

угла дифферента и глубины АНПА. Существенное смещение по дифференту на обоих графиках появляется в момент процесса заглужения ковша пробоотборника манипуляторного комплекса АНПА в грунт. Для того, чтобы избежать этого и, как следствие, перегрузки двигателей – в данной конфигурации АНПА необходима более точная настройка системы коэффициентов регулятора САУ и более точный выбор параметров величины заглужения МК.

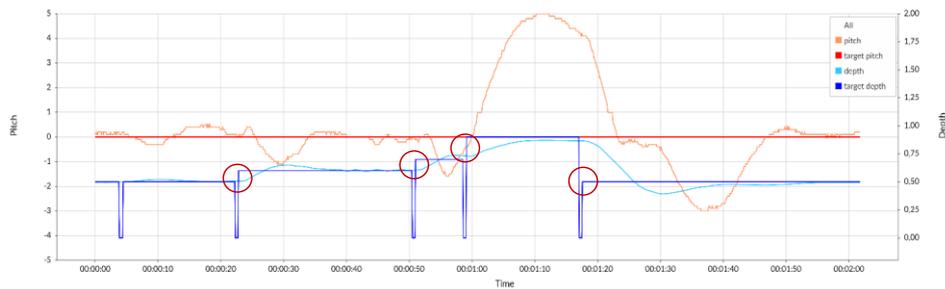


Рис. 13. Результаты работы, комбинированной САУ ЛИ АНПА в процессе пробоотбора грунта (эксперимент 2)

**Заключение.** В работе рассматриваются особенности комбинированного подхода управления резидентным АНПА. Согласно этому подходу, многоуровневая комбинированная система управления, состоящая из системы верхнего уровня на основе конечных автоматов, системы среднего уровня, реализованной методом дерева поведений, и системы нижнего уровня на основе выработки управляющих воздействий на исполнительные механизмы устройства, осуществляет полноценное управление аппаратом и выполнение заданных миссий. В работе рассмотрен пример апробации данной системы в рамках практических испытаний.

Приведенный пример выполнения миссии по пробоотбору фракций грунта, в настоящее время обычно выполняется в дистанционно управляемом режиме, под контролем оператора [23–26]. Сегодня автоматическим пробоотбором грунта занимаются лишь несколько научно-исследовательских центров в мире. Так, например, таких как океанографический институт Вудс-Хоула, где в январе 2020 года продемонстрировали автоматический пробоотбор грунта с морского дна [27]. Фотографии с наших натурных экспериментов приведены на рис. 14.



Рис. 14. Сравнительные фотографии с экспериментов по работам АНПА с макетами донных панелей ПДК (АО «НП ПТ «Океанос» и Saab Seaeye) и процессу автоматического пробоотбора грунта (WHOI и АО «НП ПТ «Океанос»)

Таким образом, успешное выполнение подобных операций в автономном и автоматизированном режимах, в рамках представленных результатов, демонстрируют научную и практическую ценность и актуальность разработанной программно-аппаратной системы.

Модульность разработанной системы позволяет производить мобильную реконфигурацию системы управления верхнего и среднего уровней, дополнять список выполняемых задач и вносить корректировки в уже поставленные миссии.

Также, разработанная комбинированная система создает возможность для внедрения в нее дополнительных элементов и систем для организации группового управления аппаратами.

Как показали результаты проведенных испытаний, разработанная комбинированная система управления резидентным АНПА, основанная на подходе дерева поведений, успешно выполнила поставленную задачу, так в результате всех экспериментов было взято и зафиксировано достаточное количество фракции грунта в ковше МК [28].

Работы в обеспечение создания системы проводились в период 2012–2019 годов в инициативном порядке силами АО «НПП ПТ «Океанос» и ФГБОУ ВО СПбГМТУ, неоднократно освещались на Всероссийской научно-практической конференции «Перспективные системы и задачи управления», форумах, конференциях, конкурсах и выставках «Газовый форум», «Армия», «Международный Военно-Морской Салон», «Экстремальная робототехника», «Маринет», «Арктика» и др.

Реализация результатов работ и их внедрение проведено в САУ экспериментальных образцов АНПА типа «Глайдер» (подводный планер), лёгкого интервенционного АНПА, а также в подводном 5-ти степенном манипуляторном комплексе (коммерциализирован в 2019 г. совместно с АО «ГНПП «Регион»).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Furuholmen M. [et al.]*. Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems // A Review of Drivers, Applications, and Integration Options for the Subsea Oil and Gas Market. In Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition. – 2013. – P. 20-22.
2. *Wrzos-Kaminska M., Pettersen K.Y., Gravidahl J.T.* Path following control for articulated intervention-AUVs using geometric control of reduced attitude // IFAC-PapersOnLine. – 2019. – P. 192-197.
3. *Dai P., Lu W., Le K., Liu D.* Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation // Ocean Engineering. – 2020. – Vol. 196, 106855. – ISSN 0029-8018. – <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106855>.
4. *Ridao [et al.]*. Intervention AUVs: The next challenge // Annual Reviews in Control. – 2015.
5. *Zagatti R. [et al.]*. FlatFish Resident AUV: Leading the Autonomy Era for Subsea Oil and Gas Operations. – 2018. – P. 35-48.
6. *Fahrni, L [et al.]*. Scope and feasibility of autonomous robotic subseaintervention systems for offshore inspection, maintenance and repair // In Proceedings of the Proceedings of the 3rd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018). – 2018. – P. 85-95.
7. <https://www.marinetechologynews.com/news/subsea-mining-thing-588211>.
8. *Гайкович Б.А., Занин В.Ю., Тарадонов В.С., Блинков А.П., Кожемякин И.В., Токарев М.Ю., Бирюков Е.А.* Концепция роботизированной подводной сейсморазведки в подлёдных акваториях // Сб. работ лауреатов Международного конкурса научных, научно-технических и инновационных разработок, направленных на развитие и освоение Арктики и континентального шельфа 2018 года. – 2019. – С. 64-87.
9. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка гибридных автономных необитаемых аппаратов для исследования месторождений углеводородов // Научно-технический сборник вести газовой науки. – 2019. – № 2 (39). – С. 29-40.
10. *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.

11. *Маевский А.М., Гайкович Б.А.* Разработка легкого интервенционного автономного обитаемого 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. *Инзарцев А.В., Павин А.М., Багницкий А.В.* Планирование и осуществление действий обследовательского подводного робота на базе поведенческих методов // Подводные исследования и робототехника. – 2013. – № 1 (15). – С. 4-16.
13. *Инзарцев А.В.* Методы формирования поведения и проектирования программного обеспечения обследовательского автономного подводного робота: дис. ... д-ра техн. наук. – М., 2012. – 297 с.
14. *Marzimoto A., Colledanchise M., Smith C., Gren P.* Towards a unified behavior trees framework for robot control // In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). – P. 5420-5427.
15. *Palma R. [et al.]*. Extending Case-Based Planning with Behavior Trees // in FLAIRS Conference. – AAAI Press, 2011. – P. 65-79.
16. *Lim C.-U., Baumgarten R., and Colton S.* Evolving Behaviour Trees for the Commercial Game DEFCON // in Applications of Evolutionary Computation. – Springer, 2010. – P. 100-110.
17. *Пилюхов В.Х., Шевченко В.А., Медведев М.Ю., & Гуренко Б.В.* Управление распределенными системами подводной робототехники с использованием адаптивной эталонной модели // Инженерный вестник Дона. – 2017. – Т. 45 (2 (45)). – С. 27.
18. *Пилюхов В.Х., Чернухин Ю.В., Федотов А.А., Гузик В.Ф., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В., Пьявченко А.О., Сапрыкин Р.В., Переверзев В.А., & Приемко А.А.* Разработка интеллектуальной системы управления автономного подводного аппарата // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2014. – № 3 (152). – С. 87-101.
19. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Гуренко Б.В.* Методы автоматического управления морскими подвижными объектами: монография. – Ростов-на-Дону, Таганрог: ЮФУ, 2016. – 264 с.
20. <https://www.designworldonline.com/using-behavior-trees-to-improve-the-modularity-of-auv-control-systems/>.
21. <https://oceanos.ru/news/339>.
22. <https://oceanos.ru/news/361>.
23. *Nishida Y. et al.* Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device // 2019 IEEE Underwater Technology (UT), Kaohsiung, Taiwan. – 2019. – P. 1-4. – Doi: 10.1109/UT.2019.8734330.
24. *Weerakoon, Tharindu & Sonoda [et al.]*. Underwater Manipulator for Sampling Mission with AUV in Deep-Sea // The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec). – 2017. – P. 1-11.
25. *ai Huang [et al.]*. A review on underwater autonomous environmental perception and target grasp, the challenge of robotic organism capture // Ocean Engineering. – 2020. – P. 15-27.
26. *Prats, Mario & Romagós [et al.]*. Reconfigurable AUV for intervention missions: A case study on underwater object recovery // Intelligent Service Robotics. – 2015. – P. 19-31.
27. <https://www.whoi.edu/press-room/news-release/whoi-underwater-robot-takes-first-known-automated-sample-from-ocean/>.
28. <https://oceanos.ru/news/355>.

#### REFERENCES

1. *Furuholmen M. [et al.]*. Resident Autonomous Underwater Vehicle Systems, A Review of Drivers, Applications, and Integration Options for the Subsea Oil and Gas Market. In Proceedings of the Offshore Mediterranean Conference and Exhibition, 2013, pp. 20-22.
2. *Wrzos-Kaminska M., Pettersen K.Y., Gravidahl J.T.* Path following control for articulated intervention-AUVs using geometric control of reduced attitude, *IFAC-PapersOnLine*, 2019, pp. 192-197.
3. *Dai P., Lu W., Le K., Liu D.* Sliding Mode Impedance Control for contact intervention of an I-AUV: Simulation and experimental validation, *Ocean Engineering*, 2020, Vol. 196, 106855. ISSN 0029-8018. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106855>.
4. *Ridao [et al.]*. Intervention AUVs: The next challenge, *Annual Reviews in Control*, 2015.

5. *Zagatti R. [et al.]*. FlatFish Resident AUV: Leading the Autonomy Era for Subsea Oil and Gas Operations, 2018, pp. 35-48.
6. *Fahrni, L [et al.]*. Scope and feasibility of autonomous robotic subseaintervention systems for offshore inspection, maintenance and repair, *In Proceedings of the Proceedings of the 3rd International Conference on Renewable Energies Offshore (RENEW 2018)*, 2018, pp. 85-95.
7. Available at: <https://www.marinetechologynews.com/news/subsea-mining-thing-588211>.
8. *Gaykovich B.A., Zanin V.Yu., Taradonov V.S., Blinkov A.P., Kozhemyakin I.V., Tokarev M.Yu., Biryukov E.A.* Kontseptsiya robotizirovannoy podvodnoy seymorazvedki v podlednykh akvatoriyakh [The concept of robotic underwater seismic exploration in subglacial waters], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye i osvoeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2018 goda* [A collection of works by laureates of the International competition of scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development and development of the Arctic and continental shelf in 2018], 2019, pp.-64-87.
9. *Maevskiy A.M., Gaykovich B.A.* Razrabotka gibridnykh avtonomnykh neobitaemykh apparatov dlya issledovaniya mestorozhdeniy uglevodorodov [Development of hybrid Autonomous uninhabited vehicles for the study of hydrocarbon deposits], *Nauchno-tekhnicheskii sbornik vesti gazovoy nauki* [Scientific and technical collection of gas science news], 2019, No. 2 (39), pp. 29-40.
10. *Zanin V.Yu., Maevskiy A.M. i dr.* Razrabotka elementov podvodnykh robototekhnicheskikh rezidentnykh sistem na primere otechestvennogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata interventsionnogo klassa i sopustvuyushchikh tekhnologiy [Development of elements of underwater robotic resident systems on the example of a domestic Autonomous uninhabited underwater vehicle of intervention class and related technologies], *Sb. rabot laureatov Mezhdunarodnogo konkursa nauchnykh, nauchno-tekhnicheskikh i innovatsionnykh razrabotok, napravlennykh na razvitiye i osvoeniye Arktiki i kontinental'nogo shel'fa 2019 goda* [A collection of works by laureates of the International competition of scientific, scientific-technical and innovative developments aimed at the development and development of the Arctic and continental shelf in 2019], 2019, pp. 14-22.
11. *Maevskiy A.M., Gaykovich B.A.* Razrabotka legkogo interventsionnogo avtonomnogo neobitaemogo podvodnogo apparata v tselyakh ispol'zovaniya v podvodnykh rezidentnykh sistemakh [Development of a light intervention Autonomous uninhabited underwater vehicle for use in underwater resident systems], *Mater. XIV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii i X molodezhnoy shkoly-seminara «Upravlenie i obrabotka informatsii v tekhnicheskikh sistemakh»* [Materials of the XIV all-Russian scientific and practical conference and X youth school-seminar "Management and processing of information in technical systems"]. Rostov-om-Don; Taganrog: Izd-vo YuFU, 2019, pp. 83-98.
12. *Inzartsev A.V., Pavin A.M., Bagnitskiy A.V.* Planirovaniye i osushchestvleniye deystviy obsledovatel'skogo podvodnogo robota na baze povedencheskikh metodov [Planning and implementation of actions of the survey underwater robot based on behavioral methods], *Podvodnye issledovaniya i robototekhnika* [Underwater research and robotics], 2013, No. 1 (15), pp. 4-16.
13. *Inzartsev A.V.* Metody formirovaniya povedeniya i proektirovaniya programmogo obespecheniya obsledovatel'skogo avtonomnogo podvodnogo robota: dis. ... d-ra tekhn. nauk [Methods of behavior formation and software design of the survey Autonomous underwater robot: cand. of eng. sc. diss.]. Moscow, 2012, 297 p.
14. *Marzinotto A., Colledanchise M., Smith C., Gren P.* Towards a unified behavior trees framework for robot control, *In: 2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 5420-5427.
15. *Palma R. [et al.]*. Extending Case-Based Planning with Behavior Trees, *in FLAIRS Conference*. AAAI Press, 2011, pp. 65-79.
16. *Lim C.-U., Baumgarten R., and Colton S.* Evolving Behaviour Trees for the Commercial Game DEFCON, *in Applications of Evolutionary Computation*. Springer, 2010, pp. 100-110.
17. *Pshikhopov V.Kh., Shevchenko V.A., Medvedev M.Yu., & Gurenko B.V.* Upravleniye raspredelennymi sistemami podvodnoy robototekhniki s ispol'zovaniem adaptivnoy etalonnoy modeli [Management of distributed systems of underwater robotics using an adaptive reference model], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Don's engineering Bulletin], 2017, Vol. 45 (2 (45)), pp. 27.

18. Pshikhopov V.Kh., Chernukhin Yu.V., Fedotov A.A., Guzik V.F., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V., Pyavchenko A.O., Saprykin R.V., Pereverzev V.A., & Priemko A.A. Razrabotka intellektual'noy sistemy upravleniya avtonomnogo podvodnogo apparata [Development of an intelligent control system for an Autonomous underwater vehicle], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2014, No. 3 (152), pp. 87-101.
19. Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gurenko B.V. Metody avtomaticheskogo upravleniya morskimi podvizhnymi ob"ektami: monografiya [Methods of automatic control of marine mobile objects: monograph]. Rostov-on-Don, Taganrog: YuFU, 2016, 264 p.
20. Available at: <https://www.designworldonline.com/using-behavior-trees-to-improve-the-modularity-of-auv-control-systems/>.
21. Available at: <https://oceanos.ru/news/339>.
22. Available at: <https://oceanos.ru/news/361>.
23. Nishida Y. et al. Benthos Sampling by Autonomous Underwater Vehicle Equipped a Manipulator with Suction Device, *2019 IEEE Underwater Technology (UT), Kaohsiung, Taiwan*, 2019, pp. 1-4. Doi: 10.1109/UT.2019.8734330.
24. Weerakoon, Tharindu & Sonoda [et al.]. Underwater Manipulator for Sampling Mission with AUV in Deep-Sea, *The Proceedings of JSME annual Conference on Robotics and Mechatronics (Robomec)*, 2017, pp. 1-11.
25. ai Huang [et al.]. A review on underwater autonomous environmental perception and target grasp, the challenge of robotic organism capture, *Ocean Engineering*, 2020, pp. 15-27.
26. Prats, Mario & Romagós [et al.]. Reconfigurable AUV for intervention missions: A case study on underwater object recovery, *Intelligent Service Robotics*, 2015, pp. 19-31.
27. Available at: <https://www.whoi.edu/press-room/news-release/whoi-underwater-robot-takes-first-known-automated-sample-from-ocean/>.
28. Available at: <https://oceanos.ru/news/355>.

Статью рекомендовал к опубликованию к.т.н. А.В. Шипатов.

**Занин Владислав Юрьевич** – Акционерное общество «Научно-Производственное Предприятие Подводных Технологий «Океанос»; e-mail: mfutkflot@gmail.com; 194295, Санкт-Петербург, а/я 21; тел.: +79219666956; советник Генерального директора.

**Маевский Андрей Михайлович** – e-mail: maevskiy\_andrey@mail.ru; тел.: +79817869879; младший научный сотрудник; аспирант ЮФУ.

**Кожемякин Игорь Владиленович** – Санкт-Петербургский государственный морской технический университет; e-mail: 1861vp@mail.ru; 190121, Санкт-Петербург, Лоцманская ул., 3; тел.: +78127146822; начальник Управления оборонных исследований и разработок.

**Zanin Vladislav Urievich** – JSC “Oceanos”; e-mail: mfutkflot@gmail.com; Saint Petersburg, 194295, post office box 21, Russia; phone: +79219666956; Advisor to the General Director.

**Maevskiy Andrey Michailovich** – e-mail: maevskiy\_andrey@mail.ru; phone: +79817869879; Junior Researcher; SFedU – Graduate student.

**Kozhemyakin Igor Vladilenovich** – St. Petersburg State Marine Technical University; e-mail: 1861vp@mail.ru; 3, Lotsmanskaya street, Saint Petersburg, 190121, Russia; phone: +78127146822; head of defense research and development.