21. Introduction to version 2 of the Internet-standard Network Management Framework. Available at: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1441 (accessed 11 December 2024).
22. Coexistence between version 1 and version 2 of the Internet-standard Network Management Framework. Available at: https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc1452 (accessed 11 December 2024).
23. *Osipov V.Yu., Nosal' I.A.* Obosnovanie meropriyatiy informatsionnoy bezopasnosti [Justification of information security measures], *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy* [Information management systems], 2013, No. 2 (63). Available at: https://cyberleninka.ru/article/n/obosnovanie-meropriyatiy-informatsionnoy-bezopasnosti (accessed 24 December 2024).

Жукова Наталья Александровна – Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр Российской академии наук; e-mail: nazhukova@mail.ru; г. Санкт-Петербург Россия; тел.: 88123283411; д.т.н.; доцент; в.н.с.

Куликов Игорь Александрович – Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ»; e-mail: i.a.kulikov@gmail.com; г. Санкт-Петербург, Россия; тел.: 88122342682; ассистент кафедры МОЭВМ.

Zhukova Nataly Alexandrovna – St. Petersburg Institute of Informatics and Automation Russian Academy of Sciences; e-mail: nazhukova@mail.ru; Saint-Petersburg Russia; phone: +7812 3283411; dr. of eng. sc.; leading researcher.

Kulikov Igor Aleksandrovich – Saint-Petersburg Electrotechnical University “LETI”; e-mail: i.a.kulikov@gmail.com; Saint-Petersburg, Russia; phone: +78122342682; department assistant.

УДК 004.896 DOI 10.18522/2311-3103-2025-1-226-236

О.В. Шиндор, П.А. Кокунин, А.А. Егорчев, Л.Н. Сафина, Я.С. Мурин

АППАРАТНО-ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ТЕЛЕУПРАВЛЯЕМОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА КЛАССА МИКРО

В современной подводной робототехнике актуальными являются задачи управления, повышения автономности, увеличения выполняемых функций и возможность импортозамещения. В работе рассматривается пример построения телеуправляемого необитаемого подводного аппарата (ТНПА) класса микро, основной целью которого является использование в образовательных целях, в частности для вовлечения школьников в инженерное направление и программирование, студентов в программирование микроконтроллеров, практическое изучения систем управления, цифровую обработку изображений с использованием вейвлет-преобразования. В статье представлены основные принципы и особенности конструкторской, аппаратной, алгоритмической и программной реализации роботизированного конструктора на основе ТНПА класса микро. Приведены обоснования применения конструкторского решения для использования ТНПА в образовательных целях, рассмотрены принципы алгоритмического передвижения подводного блока. На основе двумерного вейвлет-преобразования для обработки подводных изображений разработан алгоритм и проведена его верификация. Вейвлет-преобразование является современным и эффективным инструментом для выявления локальных особенностей сигналов и обработки изображения. Использование двумерной вейвлет-декомпозиции, представляющей собой процесс разложения сигнала на высокочастотные и низкочастотные составляющие, позволяет сформировать четыре матрицы вейвлет-коэффициентов, содержащих аппроксимирующие с низкочастотными составляющими и детализирующие коэффициенты (высокочастотные) трех типов: несущих информацию о вертикальных, горизонтальных и диагональных параметрах анализируемого изображения. В процессе обработки изображения после применения вейвлет-преобразования выполняется для увеличения контрастности изображения изменение коэффициентов аппроксимации, далее осуществляется определение RGB компонентов на основе матрицы аппроксимации вейвлет-коэффициентов на основе градаций серого и вычисление средних и максимальных значений для каждой из компонент. Далее выполняется расчет коэффициента цветопередачи, коэффициентов улучшения, на основе которых формируется модифицированная матрица вейвлет-коэффициентов и применяется обратное преобразование. В результате применения алгоритма на

тестовых изображениях показана возможность цветокоррекции, в частности уменьшение влияния зеленой и голубой составляющих на 8,6%. Полученные результаты могут быть использованы при построении систем распознавания изображений в подводной среде и проектировании автономных необитаемых подводных аппаратов.

Алгоритм управления; обработка изображения; вейвлет-преобразование; телеуправляемый необитаемых подводный аппарат.

O.V. Shindor, P.A. Kokunin, A.A. Egorchev, L.N. Safina, Ya.S. Murin

HARDWARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF A REMOTELY OPERATED UNMANNED UNDERWATER VEHICLE OF THE MICRO-CLASS

In modern underwater robotics, the tasks of control, increasing autonomy, increasing the functions performed and the possibility of import substitution are relevant. The paper considers an example of building a remotely controlled unmanned underwater vehicle (RCUV) of the micro class, the main purpose of which is to use for educational purposes, in particular for involving schoolchildren in engineering and programming, students in programming microcontrollers, practical study of control systems, digital image processing using wavelet transform. The article presents the basic principles and features of the design, hardware, algorithmic and software implementation of a robotic designer based on a RCUV of the micro class. The justification for the application of the design solution for using the RCUV for educational purposes is given, the principles of algorithmic movement of the underwater unit are considered. Based on the two-dimensional wavelet transform for processing underwater images, an algorithm was developed and verified. The wavelet transform is a modern and effective tool for identifying local features of signals and image processing. The use of two-dimensional wavelet decomposition, which is the process of decomposing a signal into high-frequency and low-frequency components, allows us to form four matrices of wavelet coefficients containing approximating ones with low-frequency components and detailing coefficients (high-frequency) of three types: carrying information about the vertical, horizontal and diagonal parameters of the analyzed image. In the process of image processing after applying the wavelet transform, the approximation coefficients are changed to increase the image contrast, then the RGB components are determined based on the approximation matrix of the wavelet coefficients based on grayscale and the average and maximum values are calculated for each of the components. Then the color rendering coefficient and improvement coefficients are calculated, on the basis of which a modified matrix of wavelet coefficients is formed and the inverse transform is applied. As a result of applying the algorithm to test images, the possibility of color correction was demonstrated, in particular, the reduction of the influence of green and blue components by 8.6%. The results obtained can be used in the construction of image recognition systems in the underwater environment and the design of autonomous unmanned underwater vehicles.

Control algorithm; image processing; wavelet transform; remotely operated unmanned underwater vehicle.

Введение. Актуальной темой развития морской робототехники является проектирование, управление, повышение автономности и увеличение степени автоматизации при выполнении операций телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов (ТНПА) [1–6]. Важной задачей остается импортозамещение ТНПА для выполнения всех видов подводных работ. Это объясняется широким применением ТНПА в нефтегазовой сфере, при проведении подводных, в том числе и глубинных работ, обследовании дна и выполнении поисковых операций, биологических и экологических исследованиях.

Особенностью эксплуатации ТНПА является использование в водной среде, что накладывает ряд требований на движители, электронную часть и реализацию алгоритмов управления.

Вопросы управления ТНПА рассмотрены в ряде работ. В [5] приведена упрощенная математическая модель ТНПА, на основании которой в последующем реализованы алгоритмы управления аппаратом, при этом исключена одна из шести степеней свободы, за счет специального расположения двигателей. В [2] модель движения строится с учетом кабеля «нулевой» плавучести длиной порядка 2 км.

Работы [3, 4] посвящены специальным вопросам управления ТНПА, при этом рассматриваются ТНПА легкого или тяжелого класса. Модель малогабаритного ТНПА приведена в [6], горизонтальные движители которого расположены под углом относительно модуля плавучести. В [7] приведен концепт ТНПА микро. Управление аппаратом в усло-

виях сложной динамической системы с решением задачи стабилизации положения кабеля (с «нулевой» плавучестью) на заданной глубине движения показана в [8]. Анализ публикаций показывает заинтересованность исследователей данной тематикой в случае различных конструкций и задач использования ТНПА.

Современные подводные аппараты включают в себя программное обеспечение. В этом направлении ведутся разработки по реализации программного обеспечения управления движителями и индикации [9–11], математического и имитационного моделирования [12]. Особенностями данных разработок является их уникальность, зависящая от размера ТНПА, выполняемых ими задач и условий применения. Основной средой использования необитаемых подводных аппаратов осуществляется в морской среде, при этом их использование в речных водоемах также является актуальным. Целью данной работы является разработка конструкционной, аппаратной и программной составляющих ТНПА микро, реализующего функцию подводного наблюдения в пресных водоемах. На видеосъемку под водой оказывают влияние преломление света, в результате чего объекты кажутся ближе их реального расстояния, в пресной воде присутствует взвесь песка и ила, что значительно снижает контрастность изображений, а также смещение его цветовой гаммы. Для обработки изображения предлагается использовать методы вейвлет-преобразования. Возможность их применения к обработке подводных изображений показаны в [13–17].

Конструкторская и аппаратная реализация ТНПА микро. Разрабатываемый робототехнический комплекс относится к типу ТНПА микро, весом до 5 кг, который может применяться для наблюдения за подводными объектами в пресноводных водоемах на небольших глубинах, исследования дна, а также как учебный комплекс для школьников и студентов.

Движущийся подводный аппарат вместе с окружающей его жидкостью представляет собой сложную гидродинамическую систему. В общем виде подводный аппарат обладает шестью степенями свободы и его движение описывается уравнением в матричном виде [18, 19]:

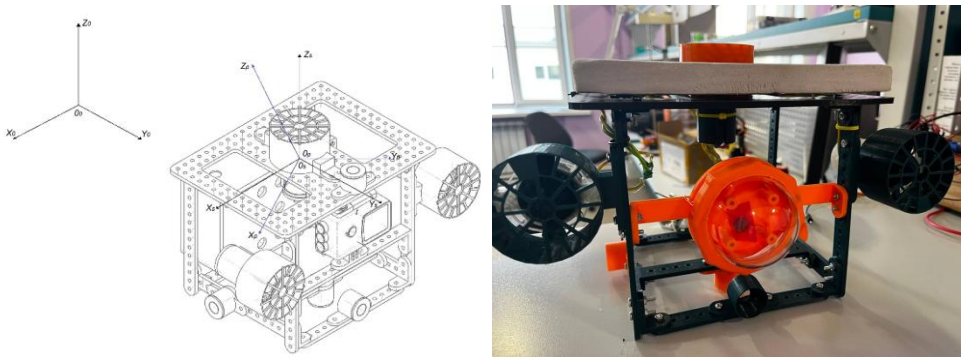
$$M\dot{\upsilon} + (C(\upsilon) + D(\upsilon))\upsilon + g(x) = \tau,$$

где M – матрица инерции, $C(\upsilon)$ – матрица кориолисовых и центробежных сил, $D(\upsilon)$ – матрица гидродинамических сил и моментов, $g(x)$ – вектор гидростатических сил и моментов, τ – вектор проекций упоров и моментов движителей, υ – вектор проекций линейной и угловой скоростей движения НПА, при этом используют три системы координат: неподвижная, связанная и скоростная.

В состав разрабатываемого робототехнического комплекса входит подводный блок, блок управления, пульт управления, соединительный кабель, устройство отображения информации.

Для простоты сборки подводный блок выполнен из пластмассовых деталей типа балка, уголок, пластина, которые соединяются между собой винтовыми соединениями. Блок в силу расположения движителей обладает тремя степенями свободы. Внешний вид модели подводного блока в системе координат и макетный образец приведены на рис. 1.

Согласно структурной схеме, изображенной на рис. 2, в состав движительно-рулевого комплекса входят один движитель вертикального хода, отвечающий за всплытие и погружение и два движителя горизонтального хода, отвечающих за продольное перемещение, повороты. Информация с пульта управления поступает на блок обработки информации и затем передается на драйверы движителей, регулирующих скорость и направление вращения. В качестве движителей используются коллекторные двигатели постоянного тока. При использовании в водной среде необходима предварительная их герметизация.



а б

Рис. 1. Подводный блок ТНПА микро: а) 3D-модель, б) макетный образец

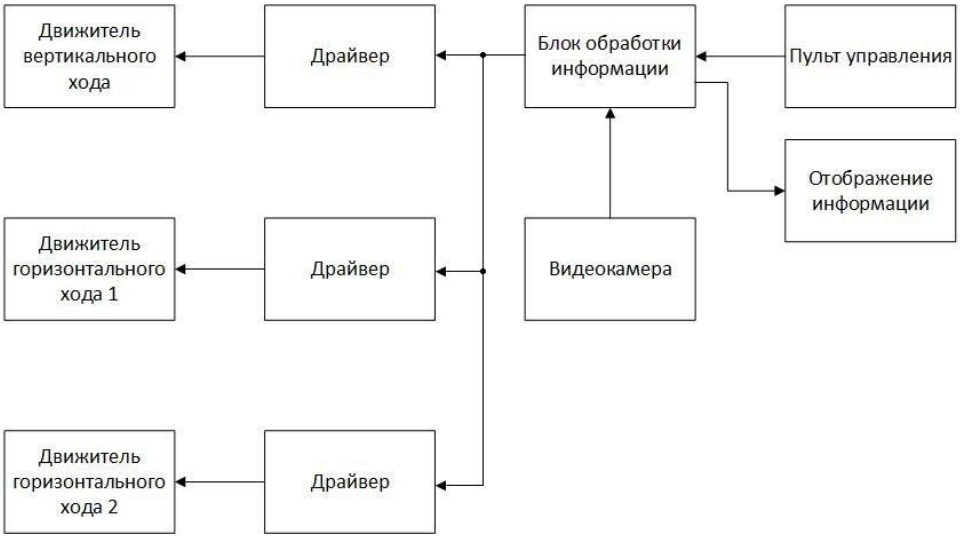


Рис. 2. Структурная схема ТНПА микро

Информация с видеокамеры обрабатывается и передается на устройство отображения информации. Блок обработки информации реализован на базе микроконтроллера STM32, программная реализация алгоритма выполнена на языке Си.

Для задания траектории движения подводного блока используется пульт управления. Его аппаратная реализация выполнена на основе потенциометрических датчиков, сигнал с которых подается на микроконтроллер блока обработки информации через аналого-цифровой преобразователь. Алгоритм управления движением реализован таким образом, что всплытие и погружение являются приоритетными операциями, и осуществляется при одновременном нажатии двух стиков. Для исключения ложных срабатываний был определен диапазон, соответствующий дребезгу контактов, управление скоростью вращения движителей осуществляется с помощью ШИМ-сигнала.

Разработка алгоритма обработки подводных изображений. Изображение, получаемое с подводного блока, характеризуется наличием искажений и преобладанием зеленовато-голубого оттенка. Это связано с поглощением и преломлением света. Взвесь песка и ила значительно снижают контрастность изображения и смещение его цветовой гаммы. Предлагается использовать вейвлет-преобразование для обработки подводных изображений, так как является эффективным методом анализа сигналов, сжатия данных, устранения шума и повышения контрастности изображения. Реализуется преобразование

посредством разложения изображения на компоненты, характеризующиеся высокочастотными и низкочастотными составляющими. Применение вейвлет-преобразования для улучшения изображений в условиях низкой освещенности показано в [20, 21], для устранения дымки и цветокоррекции в [22]. Также для цветокоррекции может применяться слияние изображений методами вейвлет-анализа, реализация данного алгоритма показана в работе [23]. В данной работе предлагается алгоритм, основанный на дискретном вейвлет-разложении с последующей коррекцией аппроксимирующих коэффициентов по цветовым составляющим: красный, зеленый, синий (RGB).

При анализе изображений используется двумерная вейвлет-декомпозиция, которая представляет собой процесс разложения сигнала или изображения на составляющие. К каждой строке матрицы *s* применяется одномерное дискретное вейвлет-преобразование. В результате формируются две матрицы, содержащие высокочастотные (ВЧ) и низкочастотные (НЧ) составляющие. Применение к столбцам каждой матрицы одномерного преобразования позволяет сформировать четыре матрицы коэффициентов, содержащие НЧ/НЧ, НЧ/ВЧ, ВЧ/НЧ, ВЧ/ВЧ составляющие. Первая матрица представляет собой аппроксимирующие коэффициенты A_k, три другие D_k – детализирующие, вычисления осуществляются по формулам:

$$A_k[n] = \sum x[n] \cdot \varphi_k\left[n - 2^k\right]$$

$$D_k[n] = \sum x[n] \cdot \psi_k\left[n - 2^k\right],$$

где k – уровень разложения, $\varphi(x)$ – масштабирующая функция и $\psi(x)$ – материнский вейвлет. При этом определяются детализирующие коэффициенты трех типов: H_k – горизонтальные, V_k – вертикальные, D_k – диагональные, т.е. в них отражаются изменения по горизонтальной, вертикальной и диагональной координатам. Тогда схема разложения изображения может быть представлена в следующем виде:

$$C_0 = (A_1, H_1, V_1, D_1) \rightarrow (A_2, H_2, V_2, D_2, H_1, V_1, D_1) \rightarrow \ldots$$

В аппроксимирующих коэффициентах содержится информация о форме и структуре изображения, в детализирующих о его мелких деталях.

Для увеличения контрастности и улучшения цветопередачи изображений был разработан алгоритм, реализация которого выполнена с использованием программного пакета MATLAB.

Основные этапы алгоритма:

1. Импорт изображения.
2. Двумерное дискретное вейвлет-преобразование с заданным уровнем разложения *n*.
3. Изменение коэффициентов аппроксимации уровня *n* для увеличения контрастности изображения в соответствии с выражением:

$$A' = \frac{A - \min(A)}{\max(A) - \min(A)},$$

где A – оригинальное значение вейвлет-коэффициента; A' –модифицированное значение вейвлет-коэффициента; $\min(A)$ и $\max(A)$ – минимальные и максимальные значения вейвлет-коэффициентов в матрице.

4. Определение *RGB* компонентов на основе матрицы аппроксимации вейвлет-коэффициентов на основе градаций серого:

$$X_R = \frac{\sum A'}{N}, X_G = \frac{\sum A'}{N}, X_B = \frac{\sum A'}{N}.$$

5. Вычисление средних и максимальных значений каждого из *RGB* компонент на основе матрицы модифицированных аппроксимирующих коэффициентов $X_{Rcp}, X_{Gcp}, X_{Bcp}, X_{R\max}, X_{G\max}, X_{B\max}$:

$$X_{cp} = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} X_i,\ X_{\max} = \max(X_i).$$

где N – общее количество вейвлет-коэффициентов.

6. Нахождение доминирующего X_d *RGB* компонента в изображении.

7. Расчет коэффициента цветопередачи (*CCF*), используемый для усиления цветовых компонент.

$$X_f = \frac{X_{\max}}{X_{d\max}},\ CCF = \frac{X_{f_1} + X_{f_2}}{2},$$

где X_f: рассчитывается для не доминирующих компонент в зависимости от результата п.6.

8. Определение коэффициентов улучшения:

$$\begin{aligned} X_{mG} &= CCF \cdot X_{Gcp} \cdot X_{G\max} \\ X_{mR} &= CCF \cdot X_{Rcp} \cdot X_{R\max} \\ X_{mB} &= CCF \cdot X_{Bcp} \cdot X_{B\max} \end{aligned}.$$

9. Получение матрицы модифицированных вейвлет-коэффициентов:

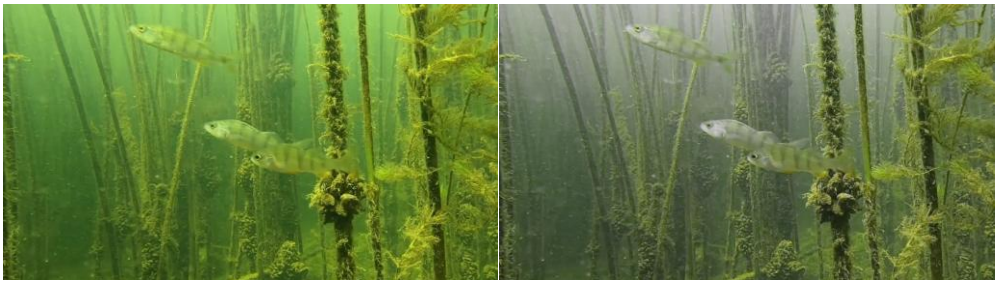
$$\begin{aligned} X'_R &= X_{mR} \cdot X_R \\ X'_G &= X_{mG} \cdot X_G \\ X'_B &= X_{mB} \cdot X_B \end{aligned}$$

10. Конвертация изображения в модель цветового пространства *HSI*.
11. Обратное ДВП на основе модифицированной матрицы вейвлет-коэффициентов.

Предложенный алгоритм позволяет выполнять цветокоррекцию подводных изображений с целью уменьшения влияния зеленого цвета.

Апробация алгоритма обработки подводных изображений. Для проверки работы алгоритма, предложенного в предыдущем разделе, рассмотрим изображение, полученное в подводных условиях, размером 1520x2704 пикселей. В качестве материнского вейвлета используется вейвлет Добеши 2 (db2) с уровнем разложения 3.

Рис. 3 иллюстрирует результаты обработки изображения.



а б

Рис. 3. Обработка изображения с помощью вейвлет-преобразования: а – исходное изображение, б – изображение после обработки (уровень разложения 3)

В исходном изображении (рис. 3,а) заметно преобладание зелёных оттенков. Обработанное изображение демонстрирует сбалансированную цветовую гамму с улучшенной передачей естественных тонов, значительное сокращение зеленого цвета, что способствует лучшей визуализации объектов и деталей сцены. Значение коэффициента, определяющего G компоненту изображения (X'_G), уменьшилось с 0,82 в исходном изображении до 0,75 после обработки, при этом значения коэффициентов R и B составляющих увеличились после применения алгоритма, для B с 0,46 (X'_B) до 0,59 (X'_R).

При увеличении уровня разложения изменяется баланс белого и черного. На рис. 4 представлено обработанное изображение с уровнем разложения 23, из которого видно, что воздействие алгоритма усиливает яркость. Величина коэффициента G компоненты X'_G составляет 0,78 и дальнейшее увеличение коэффициентов R и B составляющих по сравнению с уровнем разложения – 3.

Рис. 4. Изображение после обработки (уровень разложения 23)

Результаты обработки экспериментальных изображений показывают, что предложенный алгоритм позволяет изменять уровень влияния цветовых каналов, в частности позволяя корректировать зеленую и голубую составляющую изображения за счет уменьшения коэффициентов G составляющей и увеличения B.

Выводы. В работе представлены конструкторская, аппаратная, алгоритмическая и программная реализации ТНПА микро. В конструкторской и аппаратной реализации рассмотрены особенности технического решения с точки зрения отличия от имеющихся аналогов, приведены принципы разработки алгоритма управления подводным блоком. В программной реализации ТНПА микро показана возможность обработки подводных изображений методами вейвлет-преобразования. Предложен алгоритм корректировки зеленой и голубой составляющих подводного изображения за счет уменьшения коэффициентов G составляющей и увеличения B.

Рассмотренный ТНПА микро разрабатывается для применения в образовательных целях, при этом полученные результаты могут использоваться при построении исследовательских ТНПА класса микро и частично реализованы при построении автономных необитаемых подводных аппаратов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Коноплин А.Ю., Денисов В.А., Даутова Т.Н. [и др.].* Технология использования ТНПА для выполнения глубоководных исследовательских операций // Экстремальная робототехника. – 2020. – № 1 (31). – С. 246-251.
2. *Данилова С.К., Кусков А.М., Кусков И.М., Тарасов Н.Н.* Модель движения и адаптивного управления телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в сложной динамической системе // Морской вестник. – 2019. – № 2 (70). – С. 93-97.
3. *Костенко В.В., Павин А.М.* К вопросу обеспечения независимости управляющих воздействий движительно-рулевого комплекса подводного аппарата // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2015. – Т. 6. – С. 118-123.

4. *Ваулин Ю.В., Костенко В.В., Павин А.М.* Навигационное и алгоритмическое обеспечение ТНПА для эффективного решения задач идентификации донных целей и инспекции морских объектов // Технические проблемы освоения Мирового океана. – 2013. – Т. 5. – С. 30-40. – EDN YSWBWD.
5. *Борисенко Н.А., Белоусов М.О.* Разработка упрощенной математической модели телеуправляемого необитаемого подводного аппарата // Интеллектуальные системы, управление и мехатроника - 2019: Матер. V Всероссийской научно-технической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, Севастополь, 28–30 мая 2019 года / науч. ред. Крамарь В.А.. – Севастополь: Севастопольский государственный университет, 2019. – С. 5-9.
6. Патент на полезную модель № 206387 U1 Российская Федерация, МПК B63C 11/48, B63G 8/00. Телеуправляемый необитаемый подводный аппарат: № 2021115452: заявл. 31.05.2021: опубл. 08.09.2021 / Р.Р. Кульмухаметов, С.А. Гафуров, Р.М. Акбиров; заявитель Автономная некоммерческая организация высшего образования «Университет Иннополис».
7. *Фролов Д.В., Ковалев А.Ю., Буланчиков Д.С., Кузнецов Д.И.* Концепт телеуправляемого необитаемого подводного аппарата класса микро для решения исследовательских задач // Научные горизонты. – 2018. – № 10 (14). – С. 253-258. – EDN YMQTTN.
8. *Данилова С.К., Кусков А.М., Кусков И.М., Тарасов Н.Н.* Модель движения и адаптивного управления телеуправляемого необитаемого подводного аппарата в сложной динамической системе // Морской вестник. – 2019. – № 2 (70). – С. 93-97. – EDN KLTJLU.
9. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612304 Российская Федерация. Программное обеспечение блока управления и индикации телеуправляемого необитаемого подводного аппарата: № 2017615431: заявл. 07.06.2017: опубл. 15.02.2018 / А.С. Амирагов, Д.А. Никулин, А.М. Михайлов, А.А. Комиссаров; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – EDN GXLPLA.
10. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019666504 Российская Федерация. Управление движителями ТНПА: № 2019665395: заявл. 29.11.2019: опубл. 11.12.2019 / Ю.А. Чурсин, В.В. Павличев, Р.А. Нурмухаметов; заявитель федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет». – EDN HSMYAO.
11. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023661444 Российская Федерация. Программа для энергетически оптимального распределения управляющих команд на движительно-рулевой комплекс телеуправляемого необитаемого подводного аппарата: № 2023660819: заявл. 29.05.2023: опубл. 31.05.2023; заявитель Общество с ограниченной ответственностью "КАШАЛОТ". – EDN RJADAH.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018612303 Российская Федерация. Программа реализации математической и имитационной моделей электронного макета телеуправляемого необитаемого подводного аппарата: № 2017615459: заявл. 07.06.2017: опубл. 15.02.2018 / В.С. Палто; заявитель Российская Федерация, от имени которой выступает Министерство промышленности и торговли Российской Федерации. – EDN TSRKTO.
13. *Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A.* Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform // 2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019. – P. 317-322.
14. *Sun T. and Jung C.* Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016.
15. *Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B.* An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. – 2023. – P. 206-215.
16. *Yadav S. and Raj K.* Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion // 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020. – P. 1-5.
17. *Сафина Л.Н., Шиндор О.В.* Цветокоррекция подводных снимков на основе вейвлет-преобразования // Измерения, автоматизация и моделирование в промышленности и научных исследованиях (ИАМП–2024): Матер. XIX Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых с международным участием, 30 октября - 1 ноября 2024 года. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та, 2024. – С. 176-178.
18. *Fossen T.I.* Guidance and control of oceanic vehicles. – John Willei and Sons, 1994. – 494 p.
19. *Филаретов В.Ф., Лебедев А.В., Юхимец Д.А.* Системы и устройства управления подводных роботов. – М.: Наука, 2005. – 270 с.

20. *Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A*. Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform // 2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019. – P. 317-322.
21. *Sun T. and Jung C.* Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform // 2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016.
22. *Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B.* An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction // Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision. – 2023. – P. 206-215.
23. *Yadav S. and Raj K.* Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion // 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020. – P. 1-5.
24. *Лиянаге П., Круглова Л.В., Ранасингхе Н.* Улучшение обработки изображений с помощью модели сверточной нейронной сети на основе вейвлетов // Международный научно-исследовательский журнал. – 2024. – № 6 (144).

REFERENCES

1. *Konoplin A.Yu., Denisov V.A., Dautova T.N. [i dr.]*. Tekhnologiya ispol'zovaniya TNPA dlya vypolneniya glubokovodnykh issledovatel'skikh operatsiy [Technology for using ROVs for Deep sea research operations], *Ekstremal'naya robototekhnika* [Extreme Robotics], 2020, No. 1 (31), pp. 246-251.
2. *Danilova S.K., Kuskov A.M., Kuskov I.M., Tarasov N.N.* Model' dvizheniya i adaptivnogo upravleniya teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata v slozhnoy dinamicheskoy sisteme [Model of movement and adaptive control of a remotely operated underwater vehicle in a complex dynamic system], *Morskoy vestnik* [Marine Bulletin], 2019, No. 2 (70), pp. 93-97.
3. *Kostenko V.V., Pavin A.M.* K voprosu obespecheniya nezavisimosti upravlyayushchikh vozdeystviy dvizhitel'no-rulevogo kompleksa podvodnogo apparata [On the issue of ensuring independence of control actions of the thruster-rudder complex of the underwater vehicle], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical Problems of World Ocean Development], 2015, Vol. 6, pp. 118-123.
4. *Vaulin Yu.V., Kostenko V.V., Pavin A.M.* Navigatsionnoe i algoritmicheskoe obespechenie TNPA dlya effektivnogo resheniya zadach identifikatsii donnykh tseley i inspektsii morskikh ob"ektov [Navigation and algorithmic support of ROVs for efficient bottom target identification and marine object inspection], *Tekhnicheskie problemy osvoeniya Mirovogo okeana* [Technical Problems of World Ocean Development], 2013, Vol. 5, pp. 30-40. EDN YSWBWD.
5. *Borisenko N.A., Belousov M.O.* Razrabotka uproshchennoy matematicheskoy modeli teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata [Development of a simplified mathematical model of a remotely operated underwater vehicle] *Intellektual'nye sistemy, upravlenie i mekhatronika - 2019: Mater. V Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii molodykh uchenykh, aspirantov i studentov, Sevastopol', 28–30 maya 2019 goda* [Intelligent Systems, Control and Mechatronics - 2019: Proceedings of the V All-Russian Scientific and Technical Conference of Young Scientists, Postgraduates and Students, Sevastopol, May 28–30, 2019], ed. by Kramar' V.A. Sevastopol': Sevastopol'skiy gosudarstvennyy universitet, 2019, pp. 5-9.
6. *Kul'mukhametov R.R., Gafurov S.A., Akbirov R.M.* Patent na poleznuyu model' № 206387 U1 Rossiyskaya Federatsiya, MPK B63C 11/48, B63G 8/00. Teleupravlyaemyy neobitaemyy podvodnyy apparat: № 2021115452 [Patent for Utility Model No. 206387 U1 Russian Federation, IPC B63C 11/48, B63G 8/00. Remotely operated underwater vehicle: No. 2021115452 appl. 31.05.2021: publ. 08.09.2021; applicant Autonomous Non-Profit Organization of Higher Education "Innopolis University".
7. *Frolov D.V., Kovalev A.Yu., Bulanchikov D.S., Kuznetsov D.I*. Kontsept teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata klassa mikro dlya resheniya issledovatel'skikh zadach [Concept of a micro-class remotely operated underwater vehicle for research tasks], *Nauchnye gorizonty* [Scientific Horizons], 2018, No. 10 (14), pp. 253-258. EDN YMQTTN.
8. *Danilova S.K., Kuskov A.M., Kuskov I.M., Tarasov N.N.* Model' dvizheniya i adaptivnogo upravleniya teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata v slozhnoy dinamicheskoy sisteme [Model of movement and adaptive control of a remotely operated underwater vehicle in a complex dynamic system], *Morskoy vestnik* [Marine Bulletin], 2019, No. 2 (70), pp. 93-97. EDN KLTJLU.
9. *Amiragov A.S., Nikulin D.A., Mikhaylov A.M., Komissarov A.A*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018612304 Rossiyskaya Federatsiya. Programmnoe obespechenie bloka upravleniya i indikatsii teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata: № 2017615431 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2018612304 Russian Fed-

eration. Software for control and indication unit of a remotely operated underwater vehicle: No. 2017615431]: appl. 07.06.2017: publ. 15.02.2018; applicant Russian Federation, represented by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. EDN GXLPLA.
10. *Chursin Yu.A., Pavlichev V.V., Nurmukhametov R.A*. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2019666504 Rossiyskaya Federatsiya. Upravlenie dvizhitelyami TNPA: № 2019665395 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2019666504 Russian Federation. Propulsion control of ROVs: No. 2019665395: appl. 29.11.2019: publ. 11.12.2019; applicant National Research Tomsk Polytechnic University. EDN HSMYAO.
11. Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2023661444 Rossiyskaya Federatsiya. Programma dlya energeticheski optimal'nogo raspredeleniya upravlyayushchikh komand na dvizhitel'no-rulevoy kompleks teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata: № 2023660819 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2023661444 Russian Federation. Program for energy-optimal distribution of control commands on the thruster-rudder complex of a remotely operated underwater vehicle: No. 2023660819]: appl. 29.05.2023: publ. 31.05.2023; applicant KASHALOT LLC. EDN RJADAH.
12. *Palto V.S.* Svidetel'stvo o gosudarstvennoy registratsii programmy dlya EVM № 2018612303 Rossiyskaya Federatsiya. Programma realizatsii matematicheskoy i imitatsionnoy modeley elektronnogo maketa teleupravlyaemogo neobitaemogo podvodnogo apparata: № 2017615459 [Certificate of State Registration of Computer Program No. 2018612303 Russian Federation. Program for Implementation of Mathematical and Simulation Models of the Electronic Layout of a Remotely Operated Underwater Vehicle: No. 2017615459]: appl. 07.06.2017: publ. 15.02.2018; applicant Russian Federation, represented by the Ministry of Industry and Trade of the Russian Federation. EDN TSRKTO.
13. *Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A.* Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform, *2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019,* pp. 317-322.
14. *Sun T. and Jung C.* Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform, *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016*.
15. *Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B.* An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction, *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision,* 2023, pp. 206-215.
16. *Yadav S. and Raj K.* Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion, *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020,* pp. 1-5.
17. *Safina L.N., Shindor O.V.* Tsvetokorrektsiya podvodnykh snimkov na osnove veyvlet-preobrazovaniya [Color correction of underwater photos based on wavelet transform], *Izmereniya, avtomatizatsiya i modelirovanie v promyshlennosti i nauchnykh issledovaniyakh (IAMP–2024): Mater. XIX Vserossiyskoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii studentov, aspirantov i molodykh uchenykh s mezhdunarodnym uchastiem, 30 oktyabrya - 1 noyabrya 2024 goda* [Measurements, Automation and Modeling in Industry and Scientific Research (IAMP–2024): Proceedings of the XIX All-Russian Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates, and Young Scientists with International Participation, October 30 - November 1, 2024]. Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2024, pp. 176-178.
18. *Fossen T.I.* Guidance and control of oceanic vehicles. John Willei and Sons, 1994, 494 p.
19. *Filaretov V.F., Lebedev A.V., Yukhimets D.A.* Sistemy i ustroystva upravleniya podvodnykh robotov [Control systems and devices for underwater robots]. Moscow: Nauka, 2005, 270 p.
20. *Aamir M., Rehman Z., Pu Y.-F., Ahmed A. and Abro W.A*. Image Enhancement in Varying Light Conditions Based on Wavelet Transform, *2019 16th International Computer Conference on Wavelet Active Media Technology and Information Processing, Chengdu, China, 2019,* pp. 317-322.
21. *Sun T. and Jung C.* Readability enhancement of low light images based on dual-tree complex wavelet transform, *2016 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016*.
22. *Espinosa A.R., McIntosh D., Albu A.B.* An efficient approach for underwater image improvement: Deblurring, dehazing, and color correction, *Proceedings of the IEEE/CVF Winter Conference on Applications of Computer Vision,* 2023, pp. 206-215.
23. *Yadav S. and Raj K.* Underwater Image Enhancement via Color Balance and Stationary Wavelet Based Fusion, *2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON), Bangluru, India, 2020,* pp. 1-5.
24. *Liyanage P., Kruglova L.V., Ranasingkhe N.* Uluchshenie obrabotki izobrazheniy s pomoshch'yu modeli svertochnoy neyronnoy seti na osnove veyvletov [Image processing improvement with a wavelet-based convolutional neural network model], *Mezhdunarodnyy nauchno-issledovatel'skiy zhurnal* [International Research Journal], 2024, No. 6 (144).

Шиндор Ольга Владимировна – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: OVShindor@kpfu.ru; г. Казань, Россия; тел.: +79270301549; специалист кадрово-ресурсного центра ИТ, ИИ и робототехники; к.т.н.

Кокунин Петр Анатольевич – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: AKokunin@kpfu.ru; г. Казань, Россия; тел.: 8843422337576; директор центра превосходства Специальная робототехника и искусственный интеллект; к.т.н.; доцент.

Егорчев Антон Александрович – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: anton@egorchev.ru; г. Казань, Россия; тел.: 88432337609; директор Института вычислительной математики и информационных технологий; к.т.н.

Сафина Лилия Наилевна – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: LiliyaNSafina@kpfu.ru; тел.: +79372808187; г. Казань, Россия; лаборант УВП; магистрант.

Мурин Ян Сергеевич – Казанский (Приволжский) федеральный университет; e-mail: murin007@list.ru; г. Казань, Россия; тел.: +793936396781; лаборант УВП; студент.

Shindor Olga Vladimirovna – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: OVShindor@kpfu.ru; Kazan, Russia; phone: +79270301549; specialist of the HR Resource Center for IT, AI and Robotics, Institute of Artificial Intelligence, Robotics and Systems Engineering;cand. of eng. sc.

Kokunin Petr Anatolyevich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: AKokunin@kpfu.ru; Kazan, Russia; phone: 8843422337576; director of the Center of Excellence Special Robotics and Artificial Intelligence; cand. of eng. sc.; associate professor.

Egorchev Anton Aleksandrovich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: anton@egorchev.ru; Kazan, Russia; phone: 88432337609; director of the Institute of Computational Mathematics and Information Technology; cand. of eng. sc.

Safina Liliya Nailevna – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: LiliyaNSafina@kpfu.ru; Kazan, Russia; phone: +79372808187; laboratory assistant, UVP; student.

Murin Yan Sergeevich – Kazan (Volga Region) Federal University; e-mail: murin007@list.ru; phone: +793936396781; Kazan, Russia; laboratory assistant, UVP; student.