

Секция «1.1 Цифровая трансформация и искусственный интеллект в государственном администрировании 3.0: от автоматизации к принятию интеллектуальных решений»

## **Разработка метода применения роботизированных комплексов в диагностике биообрастания для оптимизации планирования судоремонта**

**Научный руководитель – Рудь Василий Юрьевич**

***Киргизов Всеволод Витальевич***

*Аспирант*

Санкт-Петербургский государственный университет водных коммуникаций,

Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: vsevolod.kirgizov@mail.ru*

### **Введение**

Проблема биообрастания корпусов морских судов сохраняет свою актуальность как один из ключевых факторов, лимитирующих эффективность эксплуатации флота. Обрастание корпуса гидробионтами приводит к ухудшению гидродинамических характеристик судна, неизбежному росту расхода топлива и, соответственно, увеличению углеродного следа морских перевозок [2, 8]. Существующая практика борьбы с обрастанием базируется преимущественно на реактивном или планово-предупредительном подходе, ориентированном на регламентированные межремонтные интервалы. Подобная стратегия, однако, не учитывает высокой вариативности процессов биообрастания, которые зависят от навигационного района, сезонных колебаний и локальной экологической обстановки [4, 10]. Традиционные методы инструментальной инспекции, включая водолазный осмотр или подъем судна в док, сопряжены со значительными финансовыми и временными издержками и не всегда обеспечивают необходимую оперативность получения данных [6]. В этой связи разработка и внедрение методологий ранней и высокоточной диагностики на базе робототехнических комплексов представляет собой важную научно-техническую задачу, решение которой способно повысить качество планирования судоремонтных кампаний.

### **1. Интеграция диагностических функций в структуру очистного робототехнического комплекса**

В рамках настоящего исследования предлагается концептуальное расширение функциональных возможностей штатных робототехнических комплексов, предназначенных для очистки корпусов судов. Суть предлагаемого инновационного подхода заключается в отказе от традиционного разделения процессов очистки и диагностики как изолированных технологических операций и переходе к их синергетической интеграции. Основой данного подхода служит оснащение робототехнического комплекса модулем камер высокого разрешения, обеспечивающих возможность макросъемки поверхности корпуса [5]. Принципиальная новизна заключается в том, что один и тот же робот в процессе своего штатного перемещения по корпусу реализует две ключевые функции: непосредственное очистное воздействие и детальную фотофиксацию состояния обшивки. Сбор данных осуществляется как до начала очистных работ, так и в процессе их выполнения, что позволяет формировать объективную картину состояния поверхности с минимальными временными затратами. Техническая реализация системы базируется на применении камер с разрешением не менее 20 мегапикселей, оснащенных широкоугольной оптикой и имеющих размер матрицы формата 1 дюйм, что обеспечивает детализацию, достаточную для уверенной идентификации объектов размером от 0,5 миллиметра [3, 5]. Высокая светочувствительность матриц (значения ISO до 3200-6400 в зависимости от условий освещения) в сочетании с использованием импульсных светодиодных источников освещения с цветовой температурой 5000-5500 Кельвинов позволяет получать четкие изображения даже в условиях высокой

мутности воды, характерной для акваторий портов. Пропускная способность бортового вычислительного комплекса обеспечивает обработку видеопотока в режиме, близком к реальному времени, с частотой кадров до 30 кадров в секунду при движении робота со скоростью до 0,5 метра в секунду [5].

## **2. Методология анализа данных и алгоритмизация управленческих решений**

Изображения, получаемые с камер высокого разрешения, подвергаются последующему анализу с применением методов компьютерного зрения и алгоритмов машинного обучения [1, 7]. На основе результатов данной обработки выстраивается логическая последовательность принятия решений. В первую очередь производится квалификация поверхности по степени обрастания с использованием стандартизированных шкал, что позволяет перейти от субъективной визуальной оценки к объективным количественным показателям [10]. Пороговая чувствительность алгоритмов сегментации изображения настроена таким образом, чтобы reliably фиксировать наличие обрастаний с минимальной площадью покрытия от 1% от общей площади кадра [1]. Далее осуществляется классификация идентифицированных биоорганизмов с дифференциацией их на слизь (микробные маты и диатомовые пленки толщиной от 50 микрометров), мягкие обрастатели (гидроиды, мшпанки, асцидии размером от 2 миллиметров) и твердые обрастатели (балянусы, мидии с характерными размерами от 3 миллиметров и более), а также макрофиты, поскольку тип обрастания детерминирует метод его удаления [3, 4]. В зависимости от полученных классификационных данных либо формируются рекомендации оператору, либо инициируется автоматическая смена подвешного технологического оборудования. Время полного цикла обработки одного кадра от момента захвата до выдачи классификационного решения на современных вычислительных средствах (с использованием графических ускорителей типа NVIDIA Jetson) не превышает 100-150 миллисекунд, что позволяет системе адаптироваться к изменениям характера обрастания в масштабе времени, сопоставимом с динамикой перемещения робота [5]. Выбор рабочего органа — будь то высоконапорные водяные струи (давление до 300-500 бар) для удаления слизистой пленки или щетки с абразивным ворсом (с регулируемым усилием прижатия до 50-100 Ньютонов) для элиминации баянусовых обрастаний — позволяет оптимизировать очистное воздействие и минимизировать риск повреждения лакокрасочного покрытия корпуса, контролируя глубину механического воздействия с точностью до 10-20 микрометров.

## **3. Биологическая безопасность и накопление экологических данных**

Существенным аспектом предлагаемого метода является его прикладное значение для обеспечения биологической безопасности морских экосистем. Как известно, перенос судами чужеродных организмов на корпусе представляет собой один из наиболее интенсивных путей распространения инвазивных видов [4, 8, 10]. Внедрение системы визуальной диагностики позволяет в процессе планового обследования выявлять наличие на корпусе потенциально опасных видов-вселенцев [9]. Благодаря высокой разрешающей способности оптической системы (до 200 линий на миллиметр) и возможности макросъемки с фокусным расстоянием от 5 сантиметров, система способна надёжно идентифицировать видовые морфологические признаки организмов, включая форму раковины, структуру известкового основания или особенности ветвления колоний [3, 7]. Факт обнаружения инвазивного организма фиксируется с привязкой к конкретному порту и временному периоду, после чего информация передается в базу данных. Формируемый таким образом массив данных имеет двойное значение. С одной стороны, он предоставляет экологическим службам портов инструментарий для мониторинга биологической безопасности акваторий, а судовладельцам — документальное подтверждение выполнения природоохранных мероприятий [4, 6]. С другой стороны, накопление подобной информации создает основу для долгосрочных научных наблюдений за динамикой распространения гидробионтов в усло-

виях глобальных климатических изменений [2, 10]. Объем накапливаемых данных может достигать нескольких терабайт за одну диагностическую сессию, что требует применения специализированных систем хранения с поддержкой распределенных баз данных геопространственной привязки.

#### 4. Оптимизация планирования судоремонта и прогностический потенциал

Накопление в базе данных структурированной информации о видовом составе, степени и площади обрастания в корреляции с конкретными судами и маршрутами их движения открывает перспективы для реализации предиктивного подхода к управлению судоремонтом [2, 8]. Наличие точных и объективных данных о состоянии корпуса позволяет судоремонтным предприятиям с высокой степенью точности прогнозировать объем и характер предстоящих работ, необходимые материально-технические ресурсы и продолжительность докования [6]. Количественные показатели, такие как площадь обрастания (измеряемая с точностью до 0,01 квадратного метра) и толщина слоя обрастания (определяемая стереоскопическими методами с погрешностью не более 0,5 миллиметра), ложатся в основу расчетов трудозатрат и расхода абразивных материалов. Для судовладельцев это означает возможность перехода от жестко регламентированных временных графиков к планированию очистных мероприятий исключительно по фактическому техническому состоянию судна. Подобная стратегия предотвращает как преждевременный, экономически неоправданный ввод судна в док, так и эксплуатационные потери, связанные с запоздалым удалением обрастаний, достигших критической массы (обычно более 10-15% площади корпуса или толщины слоя свыше 1-2 миллиметров для мягких обрастаний) [2].

#### Заключение

Таким образом, предлагаемый метод использования робототехнических комплексов, реализующих конвергенцию очистных и диагностических функций, знаменует собой переход от традиционной парадигмы ремонтных работ к интеллектуальному управлению техническим состоянием судна. Интеграция средств компьютерного зрения с техническими характеристиками, обеспечивающими разрешение на уровне десятков микрометров и быстроедействие в масштабе реального времени, создает предпосылки для оптимизации логистических и финансовых аспектов судоремонта, параллельно решая задачи экологического мониторинга и накопления данных, представляющих научную ценность [1, 3, 5, 7]. Реализация данного подхода может рассматриваться как конкретный пример внедрения концепций цифровизации и интеллектуализации производственных процессов в морской отрасли.

#### Источники и литература

- 1) Filimonova D.A., Vorob'eva I.G., Filimonov A.Yu. Application of k-means clustering and histogram analysis to automate preprocessing of images of discomycetes obtained in the habitat // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2023. № 63. С. 111-117. doi: 10.17223/19988605/63/13
- 2) Schimanski K.B., Goldstien S.J., Hopkins G.A., Atalah J., Floerl O. Life history stage and vessel voyage profile can influence shipping-mediated propagule pressure of non-indigenous biofouling species // Biological Invasions. 2017. Vol. 19, No. 7. P. 2089-2099. doi: 10.1007/s10530-017-1416-2
- 3) Vaganov A.V., Krotova O.S., Khvorova L.A. Processing and analysis of botanical micro- and macroobjects using computer vision technologies // Journal of Physics: Conference Series. 2021. Vol. 2142, No. 1. P. 012003. doi: 10.1088/1742-6596/2142/1/012003
- 4) Alekseev V., Malysh V., Sukhikh N., Biserova L. Ust-Luga Seaport of Russia: Biological Invasions and Resting Stages Accumulation // Life. 2022. Vol. 13, No. 1. P. 117. doi: 10.3390/life13010117

- 5) Панарин Р.Н., Соловьев А.А., Хворова Л.А. Применение технологий искусственного интеллекта и компьютерного зрения при решении задач автоматизации обработки и распознавания биологических объектов // Известия Алтайского государственного университета. 2022. № 1 (123). С. 103-108. doi: 10.14258/izvasu(2022)1-16
- 6) Галкин А.В. Требования по балластировке с учетом предотвращения биологического загрязнения с судов // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 1. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=6043> (дата обращения: 01.03.2026).
- 7) Ärje J., Melvad C., Jeppesen M.R., Madsen S.A., Raitoharju J., Rasmussen M.S., Iosifidis A., Tirronen V., Meissner K., Gabbouj M., Høye T.T. Automatic image-based identification and biomass estimation of invertebrates // arXiv preprint. 2020. arXiv:2002.01759.
- 8) Schimanski K.B., Goldstien S.J., Hopkins G.A., Atalah J., Floerl O. Life history stage and vessel voyage profile can influence shipping-mediated propagule pressure of non-indigenous biofouling species // Biological Invasions. 2017. Vol. 19, No. 7. P. 2089-2099.
- 9) PANORAMA Solutions. Computer vision for vulture species monitoring in Africa. 2025. URL: <https://panorama.solutions/ru/solution/kompyuternoe-zrenie-dlya-monitoringa-vidov-stervyatnikov-v-afrike> (дата обращения: 01.03.2026).
- 10) Александров Б.Г. Проблема переноса водных организмов судами и некоторые подходы к оценке риска новых инвазий // Морской экологический журнал. 2004. Т. 3, № 1. С. 5-17.