

УДК 629.58

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ
ТНПА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ В РОССИИ И ЗА РУБЕЖОМ**

Чебан Егор Юрьевич¹, доцент, доктор технических наук, профессор кафедры гидродинамики, теории корабля и экологической безопасности судов

e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Чернов Илья Андреевич¹, соискатель

e-mail: elichernov0435@gmail.com

¹ Волжский государственный университет водного транспорта, Нижний Новгород, Россия

Аннотация. В представленном материале проводится сравнительный анализ отечественной и зарубежной практики применения пресноводных ТНПА, систематизации решаемых ими задач и обобщению научных результатов, полученных в ходе экологических исследований последних лет.

Ключевые слова: телеуправляемый подводный необитаемый аппарат, подводные исследования, экология рек и озёр, лимнология.

**COMPARATIVE ANALYSIS OF CURRENT OPERATIONAL EXPERIENCE WITH
REMOTELY OPERATED VEHICLES FOR ENVIRONMENTAL APPLICATIONS IN
RUSSIA AND ABROAD**

Egor Yu. Cheban¹, Associate Professor, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Hydrodynamics, Ship Theory and Environmental Safety of Ships,

e-mail: egor.cheban.2@gmail.com

Ilya A. Chernov¹, Applicant

e-mail: elichernov0435@gmail.com

Volga State University of Water Transport, Nizhny Novgorod, Russia

Abstract. The present material provides a comparative analysis of Russian and international practices in the application of freshwater Remotely Operated Vehicles (ROVs), a systematization of the tasks they address, and a generalization of scientific findings obtained during recent ecological studies.

Keywords: Remotely Operated Vehicle (ROV), underwater research, river and lake ecology, limnology.

Одним из ключевых инструментов мониторинга, охраны и исследования водных экосистем являются телеуправляемые подводные необитаемые аппараты (ТНПА),

обеспечивающие доступ к труднодоступным и опасным для человека участкам, а также позволяют существенно снизить риски и затраты, сопряженные с проведением водолазных работ, одновременно повышая объективность собираемых данных.

В Российской Федерации ключевую роль в развитии подводной робототехники экологической направленности выступают научные центры, представленные институтами Российской академии наук и государственными ведомствами, такими как МЧС России. Отечественная практика ориентирована преимущественно на проведение фундаментальных исследований озёрных и речных экосистем, изучение глубоководного бентоса, а также на поиск зон естественной разгрузки углеводородов и оценку состояния гидротехнических сооружений. Основными объектами исследований при этом становятся озеро Байкал, крупные водохранилища и приграничные речные системы [1].

В странах Северной Америки и Европейского Союза использование ТНПА характеризуется высоким уровнем коммерциализации и более широким вовлечением природоохранных структур, а также частных компаний. ТНПА регулярно применяются для решения прикладных задач, таких как обслуживание объектов промышленной аквакультуры, картирование ареалов распространения инвазивной фауны, 3D-профилирование качества воды в реках и каналах, а также контроль теплового и химического загрязнения вблизи крупных промышленных и энергетических объектов. Мониторинг охватывает трансграничные европейские озера, Великие озера Северной Америки, речные системы и искусственные оросительные каналы.

Экологический мониторинг внутренних водоёмов направлен на комплексную оценку состояния водной экосистемы. Спектр измерений включает в себя несколько взаимосвязанных параметров:

- температура водной среды, определение гидростатического давления;
- удельная электрическая проводимости воды, позволяющая идентифицировать очаги техногенного загрязнения;
- pH и концентрация растворённого кислорода, характеризующие кислотно-щелочной баланс и степень эвтрофикации водоёма;
- концентрация ионов нитрата аммония, попадающих в реки со стоками минеральных удобрений и вызывающих деградацию водоёмов;
- фиксация нефтепродуктов и летучих углеводородов (бензол, толуол, ксилолы);
- регистрация флуоресценции хлорофилла, позволяющая оценить биомассу фитопланктона и измерение концентрации фикоцианина, свидетельствующей о развитии токсикогенных цианобактерий [2];
- картирование рельефа дна, измерение структуры донных отложений, которые аккумулируют тяжелые металлы и органические загрязнения.

Для реализации указанного перечня измерений современные ТНПА оснащаются комплексом датчиков и навесного оборудования, способных работать в условиях ограниченного энергоснабжения и массогабаритных ограничений подводного аппарата.

Для гидрофизического профилирования применяются компактные STD-зонды, измеряющие удельную электропроводность с помощью изолированных электродов и температуру посредством высокочувствительных термисторов со временем отклика в доли секунды.

Измерение растворенного кислорода осуществляется оптическими люминесцентными датчиками-оптодами. Принцип их действия основан на тушении флуоресценции чувствительного рутениевого или платинового металлоорганического комплекса молекулами кислорода. Оптоды не требуют постоянного обтекания потоком воды и демонстрируют высокую стабильность калибровки в условиях длительных автономных миссий.



Определение концентраций ионов нитратов и аммония и гидрохимических показателей на борту ТНПА реализуется двумя способами: для экспресс-оценки применяются мультисенсорные блоки с твердотельными ионоселективными электродами (ISE), требующие регулярной калибровки, для проведения точных измерений используются ультрафиолетовые абсорбционные спектрометры, определяющие концентрацию ионов по профилю оптического поглощения в УФ-диапазоне длин волн.

Детекция пигментов фитопланктона (хлорофилла и фикоцианина) и растворенных нефтепродуктов осуществляется специализированными светодиодными флуориметрами. Прибор генерирует короткие импульсы высокоэнергетического излучения на длине волны поглощения исследуемого вещества, после чего фотоприемник фиксирует интенсивность излучения флуоресценции на большей длине волны. Мутность среды измеряется нефелометрическими датчиками, регистрирующими интенсивность рассеяния инфракрасного излучения.

Для анализа структуры и размеров взвешенных частиц и микропластика ТНПА оснащаются лазерными дифрактометрами.

Гидродинамические параметры измеряются электромагнитными датчиками скорости течения, которые фиксируют изменение напряженности электрического поля, индуцированного движением проводящей пресной воды через генерируемое датчиком магнитное поле. Навигация ТНПА осуществляется доплеровскими лагами, излучающие акустические луча к грунту и вычисляющие вектор путевой скорости аппарата по сдвигу частоты отраженного эхо-сигнала.

Датчики, требующие непрерывного интенсивного обтекания, включают электромагнитные измерители скорости потока и кондуктометрические ячейки STD-зондов. Для корректного измерения проводимости и температуры необходимо, чтобы вода в измерительном объеме непрерывно обновлялась. При застое вокруг чувствительных сенсоров из-за локального теплообмена с корпусом прибора формируются градиентные пограничные слои, приводящие к искажениям показаний температуры и солености. Электромагнитные датчики скорости требуют размещения в зоне ламинарного потока, скорость которого соответствует скорости движения аппарата относительно воды.

Датчики, требующие стоячей или медленно движущейся среды, представлены ионоселективными мембранными электродами для замера концентраций нитратов аммония и полярографическими датчиками кислорода. При слишком высоких скоростях обтекания и в турбулентном потоке происходит срыв внешнего пограничного слоя на поверхности мембраны, что вызывает «шумы» и искажение сигнала.

Датчики, чувствительные к завихрениям и пузырькам воздуха, объединяют оптические спектрометры, нефелометрические мутномеры, лазерные дифрактометры и флуориметры пигментов. Работа гребных винтов ТНПА сопровождается кавитационными явлениями и захватом воздуха с поверхности, что ведет к образованию в воде мелкодисперсных воздушных пузырьков. Попадание таких пузырьков в оптический путь флуориметра или измерительный объем дифрактометра вызывает погрешности: пузырьки рассеивают лазерное излучение, имитируя высокую мутность среды и искажая спектральные характеристики.

Для различных датчиков в практике проектирования ТНПА выделяются основные конструктивные схемы оснащения полезной нагрузкой:

- Для датчиков, требующих непрерывного обтекания (STD-зонды, электромагнитные лаги, внешние гидрофизические зонды) применяется наружный монтаж в зоне невозмущенного потока. Приборы монтируются в носовой части ТНПА или на выносных кронштейнах, выдвинутых вперед по курсу движения аппарата. Такое расположение гарантирует, что чувствительные сенсоры находятся вне зоны влияния пограничного слоя,

формирующегося на корпусе аппарата и изолированы от завихрений, создаваемых винтами. Для минимизации влияния на ходовые качества аппарата выносные кронштейны проектируются в виде профилированных стоек с минимальным лобовым сопротивлением.

- Для защиты хрупких измерительных элементов (рН-электродов, мембран оптодов) от механических повреждений при соударении с препятствиями, а также для исключения засвета оптических датчиков солнечным светом, приборы монтируются в специализированные ниши внутри корпуса ТНПА. В корпусе аппарата устраиваются сквозные каналы, имеющие входные отверстия в носовой части и выходные отверстия в кормовой части или на боковых поверхностях. Движение ТНПА вперед создаёт перепад давлений, обеспечивающий непрерывный ламинарный поток воды через нишу с датчиками.

- При работе ТНПА в режиме зависания на месте или при медленном вертикальном профилировании естественный напор воды отсутствует, что делает пассивные ниши неэффективными, для чего применяются проточные ячейки с принудительной прокачкой. Для обеспечения высокоточных спектрометрических измерений нитратов, нефтепродуктов или регистрации частиц в этих режимах применяются закрытые проточные ячейки с принудительной прокачкой. Измерительный объем прибора герметично соединяется гибкими трубопроводами с входным заборным патрубком, оснащённым сетчатым фильтром грубой очистки, и миниатюрным электрическим насосом. Использование насосов позволяет поддерживать ламинарный поток воды через измерительную нишу, исключая влияние скорости движения ТНПА на результаты измерений. Входные патрубки располагаются в нижней носовой части аппарата для забора проб без пузырьков воздуха.

Практическое применение ТНПА во внутренних пресноводных водоёмах (реках, озерах, водохранилищах и каналах) существенно отличается от эксплуатации в море. Физико-химические и гидрологические свойства пресноводных объектов накладывают жёсткие ограничения:

- внутренние водоёмы характеризуются значительно более высокой мутностью воды по сравнению с открытыми морскими акваториями. Повышенная мутность обусловлена большим количеством «взвеси» и сезонным «цветением» воды. В условиях низкой оптической видимости, которая во многих реках и водохранилищах в летний период сокращается до нескольких сантиметров, использование телевизионных камер ТНПА в качестве средства ориентации становится невозможным;

- пресноводные водоёмы отличаются меньшими глубинами по сравнению с морями и океанами. За исключением уникальных (Байкал) озёр, средние глубины рек, каналов и водохранилищ редко превышают несколько десятков метров. С одной стороны, это снимает необходимость проектирования тяжёлых прочных корпусов, способных выдерживать большое гидростатическое давление, и позволяет применять лёгкие композитные материалы и тонкостенные конструкции. С другой стороны, малые глубины в сочетании с близостью берегов и гидротехнических сооружений формируют стесненные условия маневрирования. В мелководных зонах ТНПА вынужден работать в непосредственной близости от дна, где высок риск заиливания придонного слоя из-за работы собственных движителей, а также в зонах обильной водной растительности и скопления «топляка», грозящих зацеплением и повреждениями кабель-троса. На малых глубинах ТНПА подвержен воздействию поверхностного волнения, создающего моменты, дестабилизирующие удержание глубины и курса.

- особенностью рек и соединительных каналов является высокая подвижность потоков воды и наличие сильных неоднородных течений. Скорость течения в русловых участках крупных рек часто превышает 1,5–2,0 м/с, что превосходит максимальную скорость движения большинства стандартных осмотровых ТНПА. Набегающий поток воды создает



значительное лобовое сопротивление на корпусе аппарата и на кабель-тросе. Гидродинамическая парусность длинного кабеля приводит к его прогибу, натяжению и возникновению силы, которая сносит легкий ТНПА по течению, лишая его управляемости.

С учётом ограничений, накладываемых природными условиями, можно выделить перечень требований для компоновки подобных устройств при эксплуатации:

- уменьшение габаритов и поперечного сечения корпуса для снижения лобового сопротивления и минимизации возмущений исследуемой водной толщи;
- использование пространственно-векторной схемы расположения движителей, обеспечивающей аппарату управляемость в речных условиях;
- применение тонких, износостойких кабель-тросов, способных выдерживать значительные усилия на разрыв при минимальной парусности.
- оснащение аппаратов акустическими средствами визуализации, такими как многолучевые гидролокаторы и звуковизоры, способные формировать детальное изображение подводной обстановки на дистанциях до 40 метров в условиях нулевой оптической видимости.
- оснащение аппаратов прецизионными навигационными датчиками — малогабаритными доплеровскими лагами для удержания позиции относительно дна и ведения траектории в мутной воде, а также гидроакустическими системами позиционирования (УКБ) для непрерывного отслеживания координат аппарата с поверхности.

Таблица 1. Перечень современных ТНПА экологического назначения

Модель ТНПА	Сухой вес, кг	Максимальная глубина, м	Полезная нагрузка
Гном Про	14.1	150	Камеры FullHD, компас, интеграция ЛИФ-спектрометра
РБ-300	30.0	300	Манипулятор, датчик глубины, сопряжение с УКБ-навигацией
BlueROV2	11.0	300	Мультисенсорные зонды CTD, DVL, USBL, GPS-логгер
Boxfish Luna	24.0	500	Кинематографические 8K камеры, CTD, гидролокатор
ECA H800	110.0	1000	Сканирующий сонар, манипулятор 5E Micro, альтиметр

Значимые результаты отечественных пресноводных исследований были достигнуты в ходе деятельности Лимнологического института Сибирского отделения РАН [3]. В ходе экспедиций в 2025 году на научно-исследовательском суде «Папанин» с участием специалистов Института земной коры СО РАН активно эксплуатировался ТНПА «Ровбилдер» РБ-300. С его помощью на глубинах до 200 метров была выполнена непрерывная видеозапись донных ландшафтов, что позволило выявить закономерности пространственного распределения доминирующих бентосных организмов, в частности брюхоногих моллюсков, нематод и диатомовых водорослей.

Использование манипуляторного комплекса ТНПА позволило осуществить прицельный сбор образцов беспозвоночных и донного грунта без нарушения структуры биоценоза. ТНПА применялись для поиска ранее неизвестных проявлений «грязевого вулканизма», приуроченных к зонам влияния известных разломов. Работа ТНПА осуществлялась в связке с навигационной системой ультракороткой базы, принимающей сигналы с четырех буев, что позволило записывать треки движения аппарата с минимальными погрешностями определения курса и глубины.

Менее глубокие водоемы России, включая водохранилища Волжского бассейна, исследуются с помощью малогабаритных аппаратов семейства «Гном» [4]. Эти системы используются для оперативного экологического мониторинга в зонах антропогенной нагрузки, контроля состояния подводных переходов трубопроводов и инспекции опорных конструкций гидроэлектростанций. Малогабаритный отечественный аппарат «Гном Про» массой около 14 килограммов имеет предельную рабочую глубину погружения до 150 метров и оснащается видеокамерами высокого разрешения, цифровым компасом и датчиком глубины. Он использует тонкий коаксиальный кабель марки РК50, усиленный кевларовым волокном для минимизации гидродинамического сопротивления в пресной воде.

Агентство по охране окружающей среды США использует ТНПА для регулярного мониторинга Великих озер. В озере Эри ТНПА применялись для картирования рельефа нижней поверхности ледяного покрова, шероховатость которого влияет на гидравлическое сопротивление, скорость речного стока и абразивное воздействие льда на донные трубопроводы. Использование роботов позволило полностью исключить трудоемкие и опасные подледные работы водолазов. В рамках борьбы с биоинвазиями ТНПА задействованы в программах раннего обнаружения инвазивных видов рыб. На озере Гурон с помощью ТНПА Voxfish Luna проводились исследования в локальной зоне сброса теплых вод от атомной электростанции, зафиксировавшие аномально высокую концентрацию и видовое разнообразие рыб, привлеченных повышенной температурой воды.

Плавучая платформа LeXPLORE используется для лимнологических исследований озера Леман, объединяет усилия пяти ведущих академических институтов Швейцарии [5]. Исследования, проводимые на «плавучей лаборатории», задействуют подводные аппараты для изучения распространения микропластика, исследования состава воды и контроля вертикального распределения фитопланктона. На платформе также была испытана автономная профилирующая система, использующая энергию поверхностных волн для вертикального зондирования толщи воды без внесения гидродинамических помех от движителей. Навигационная полиция Женевы эксплуатирует ТНПА легкого рабочего класса ЕСА Н800 для проведения экологических и поисково-спасательных операций в условиях крайне низкой видимости с использованием сканирующего гидролокатора кругового обзора и электрического манипулятора.

Одним из наиболее перспективных направлений за рубежом является использование ТНПА для построения пространственных трехмерных карт качества воды в реках и каналах. В Нидерландах были проведены масштабные испытания различных типов подводных дронов, включая BlueROV2, Neptune и PowerRay. Аппараты оснащались мультисенсорными зондами для непрерывного измерения температуры, проводимости, растворенного кислорода и мутности среды [6].

В Норвегии ТНПА активно используются государственными органами для контроля экологического состояния морских и пресноводных ферм аквакультуры. Аппараты типа Blueye X3 применяются экологическими инспекторами для мониторинга распространения инвазивных видов биоты.

В то же время, более тяжелый российский аппарат «Ровбилдер» РБ-300 массой 30 килограммов рассчитан на работу на глубинах до 300 метров, оснащается манипуляторным захватом и работает в связке с навигационной системой ультракороткой базы. Зарубежный аналог BlueROV2 массой около 11 килограммов обладает векторной схемой движителей и часто используется в качестве гибкой платформы для интеграции мультисенсорных гидрохимических зондов. Новозеландский аппарат Voxfish Luna массой 24 килограмма выделяется возможностью беспривязного функционирования в режиме автономного необитаемого аппарата и использованием камер высокого разрешения. Тяжелый



французский ТНПА ЕСА Н800 массой более 100 килограммов способен нести мощный сканирующий гидролокатор, подвижный электрический манипулятор и армированный силовой кабель для работы на сильном течении.

Список литературы:

1. Чумак С. П. Опыт и перспективы применения телеуправляемых подводных аппаратов в целях обеспечения безопасности подводных объектов и предупреждения чрезвычайных ситуаций на акваториях // Технологии гражданской безопасности. - 2008 - С. 66-69.
2. Проценко Д.Ю., Букин И.О. Разработка метода лазерной спектроскопии и аппаратно-программного комплекса для экологического мониторинга подводных акваторий с использованием телеуправляемых необитаемых подводных аппаратов. // Вестник РУДН. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. - 2022 – Т. 30 - № 4 – С. 544–560.
3. Ситникова Т.Я., Кучер К.М., Перетолчина Т.Е., Наумова Т.В. Экспедиция на НИС «Папанин» для изучения биоты в зонах геологических деформаций и разрушений подводного склона озера Байкал в июле 2025 г. // Биота и среда природных территорий. – 2025 - Т. 13 - № 3 - С. 91–101.
4. Спецификации и технические характеристики ТНПА «Гном Про». – URL: <https://gnomrov.ru/products/rovs/gnom-pro.html> (дата обращения: 15.05.2026).
5. Lac Léman Exploration (LeXPLORE) Scientific Report 2023. - Lausanne: EPFL – 2024.
6. Rui L. Pedroso de Lima, Floris C. Boogaard, Rutger E. de Graaf-van Dinther. Innovative Water Quality and Ecology Monitoring Using Underwater Unmanned Vehicles: Field Applications, Challenges and Feedback from Water Managers. // MDPI - Water – 2020 - 12, 1196.

