

# ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ БОЛЬШОГО АВТОНОМНОГО НЕОБИТАЕМОГО ПОДВОДНОГО АППАРАТА

**В.В. Прокопович, Г.А. Подшивалов, Л.А. Мартынова, И.В. Пашкевич, В.С. Быкова**

На примере освоения Северного морского пути большим автономным необитаемым подводным аппаратом рассмотрены вопросы обеспечения безопасности его движения при прохождении участков с различными условиями внешней среды. Проведен анализ влияния различных условий внешней среды – открытой и прибрежной воды, припая и ледовой обстановки – на безопасность функционирования большого автономного необитаемого подводного аппарата. Предложен подход к оценке безопасности работы аппарата в различных средах с использованием динамической байесовской сети и таблиц условной вероятности. Для тестирования алгоритмов управления движением аппарата и аппарата в целом разработан цифровой полигон в виде стенда моделирования функционирования больших автономных необитаемых подводных аппаратов. Разработка цифровых двойников в виде программных имитаторов устройств и механизмов аппарата позволила провести на стенде моделирования тестирование алгоритмов управления как при штатной работе его систем, так и при возникновении неисправностей из-за функционирования в различных средах. На примере функционирования большого автономного необитаемого подводного аппарата на наиболее удаленном и сложном участке Северного морского пути – проливе Вилькицкого – получены с использованием стенда моделирования результаты, которые позволили оценить безопасность функционирования аппарата и наметить пути повышения безопасности за счет совершенствования алгоритмов управления движением аппарата в сложных условиях внешней среды.

**Ключевые слова:** Оценка безопасности движения, большой автономный необитаемый подводный аппарат, динамическая байесовская сеть, таблицы условной вероятности, метод статистических испытаний, цифровой полигон.

## Введение

В настоящее время полным ходом ведется освоение Северного морского пути для повышения товарооборота с Азиатским регионом. Освоение Северного морского пути требует применения не только надводных судов, но и больших автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) [1], способных в полностью автономном режиме, без технического обслуживания и дозаправки энергоресурсом преодолевать в течение нескольких месяцев расстояния свыше 10 тыс. км [2]. В ходе преодоления протяженного маршрута АНПА проходит через районы, отличающиеся внешними условиями – открытой водой, припаям, ледовой обстановкой разной сплоченности и т. д. Так, на рис. 1 приведены карты ледового покрытия [3] в августе (рис. 1 слева) и сентябре (рис. 1 справа) 2021 г. наиболее сложного участка Северного

морского пути – пролива Вилькицкого, расположенного в самом далеком и наиболее сложном в ледовом отношении секторе Северного морского пути между Карским морем и морем Лаптевых. Из рис. 1 видно постепенное освобождение водной поверхности от тонкого льда (темно- и светло-зеленый цвет на рис. 1 слева) и превращение в «открытую воду» (голубой цвет на рис. 1 справа).

Изменение внешних условий способно оказать существенное влияние на безопасность движения большого АНПА.

Под безопасностью движения АНПА будем понимать отсутствие угрозы выполнению АНПА маршрутного задания и достижение конечной точки маршрута. Безопасность движения АНПА зависит от внешней среды и надежности конструкции и обслуживания АНПА. Оценка безопасности движения АНПА позволяет корректировать маршрутное зада-

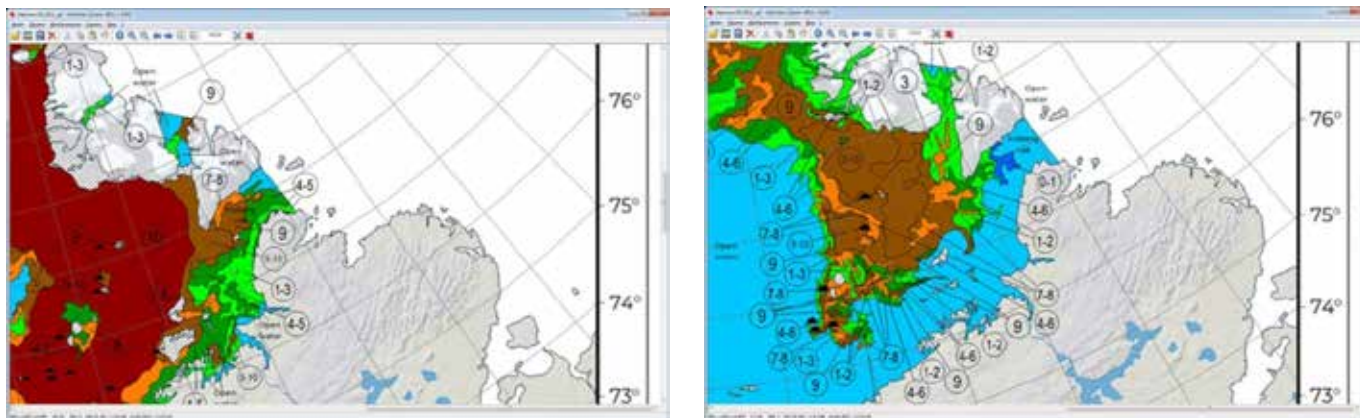


Рис. 1. Характеристика ледового покрытия водной поверхности пролива Вилькицкого Северного морского пути в августе 2021 г. (слева) и в сентябре 2021 г. (справа)

ние на этапе его формирования и принимать соответствующие решения по управлению движением на этапе эксплуатации АНПА как в одиночном варианте, так и в составе группы [4]. В связи с этим актуальной является задача оценки безопасности движения АНПА.

Оценка безопасности движения АНПА определяется способностью АНПА своевременно обнаруживать источники опасности и максимально точно прогнозировать нарушение безопасности.

Оценка безопасности движения АНПА необходима для определения того, насколько целесообразно использование того или иного АНПА для выполнения маршрутного задания, его оборудования, а также насколько целесообразно использование необитаемого аппарата вместо обитаемого.

В ряде отечественных и зарубежных публикаций рассмотрены вопросы безопасности движения АНПА. Так, в [5–9] рассмотрены вопросы предотвращения столкновений с препятствиями за счет:

- учета рельефа дна и предотвращения посадки на мель [5];
- обнаружения течений, планктонов, льда и выбора режимов движения АНПА в этих условиях [6];
- создания надежной бортовой системы обнаружения и предотвращения столкновений АНПА для выполнения сложных миссий в течение продолжительных периодов времени, реактивное предотвращение столкновений с объектами в ближней зоне [7] и выполнение маневров уклонения в соответствии с правилами береговой охраны (COLREG), установленными Международной морской организацией, с использованием схемы наведения по путевым точкам и генетических алгоритмов;
- реализации динамических оболочек безопасности для автономных дистанционно управляемых аппаратов (AROV) в виде трехмерной простран-

ственной области вокруг AROV, которая образует виртуальный защитный барьер от столкновения с известными и неизвестными препятствиями в подводной среде; приведенный в [8] метод Octree используется для установки прямоугольной формы предлагаемой зоны безопасности; при определении размера динамической зоны безопасности используется система нечеткого вывода (FIS) для моделирования поведения AROV в различных сценариях возможного столкновения;

– использования для обмена информацией между эксплуатируемыми АНПА первого стандарта подводной цифровой связи JANUS в целях предотвращения столкновений из-за увеличения численности АНПА [9].

Наряду с внешними причинами возникновения аварий в литературе обсуждаются вопросы повышения надежности и безотказности функционирования АНПА путем минимизации количества отказов [10], что позволяет АНПА функционировать в отказоустойчивом режиме без прерывания миссии.

На случай возникновения отказов в [11] обсуждается возможность аварийного всплытия АНПА с тем, чтобы обеспечить физическую транспортировку АНПА к месту базирования.

Сложность реализации перечисленных действий, направленных на обеспечение безопасности движения АНПА, состоит в необходимости комплексного их использования с тем, чтобы заблаговременно, еще до выхода АНПА на маршрут, по результатам оценки безопасности движения АНПА, снизить риск возникновения аварии, а в процессе эксплуатации – своевременно принять меры по повышению безопасности движения АНПА.

Для оценки безопасности движения АНПА и влияющих на нее факторов предложены подходы с использованием, например, оценки риска потери

АНПА подо льдом на основе нечетких данных [12]. В [13] определены четыре потенциальные рабочие среды выполнения миссии АНПА в суровых условиях, включая открытую воду, прибрежную воду, морской лед и шельфовый ледник, а также ближние группы островов и другие сложные ландшафты – для того, чтобы оценить влияния внешних условий, наиболее характерных для большинства миссий АНПА, на безопасность движения АНПА.

К сожалению, о безопасности движения АНПА в целом можно судить лишь в общих чертах, поскольку, по данным [14], примерно половина планируемых миссий являются новыми без предварительных исследований и предварительной проработки. В [14] рассмотрены вопросы оценки рисков выполнения миссии при выборе наиболее подходящего АНПА для рассматриваемой миссии с позиций технической и эксплуатационной безопасности.

Таким образом, обзор имеющихся подходов к оценке безопасности движения АНПА указывает на раздельное решение актуальных задач безопасного движения АНПА, в то же время необходимо комплексное решение перечисленных задач, поскольку ввиду их новизны из-за разработки больших АНПА как в России, так и за рубежом, публикации по комплексному решению задач, обеспечивающих безопасность движения большого АНПА, отсутствуют. В связи с этим целью работы явилось формирование подхода к оценке безопасности движения большого АНПА.

### ■ Постановка задачи

Пусть определены: маршрутное задание на преодоление АНПА протяженного маршрута в течение длительного времени; характеристики внешней среды районов, через которые проложен маршрут АНПА; координаты текущего положения АНПА, вырабатываемые навигационной системой в ходе выполнения маршрутного задания.

Большие АНПА включают в свой состав следующие основные системы, на которые внешние условия способны оказать наибольшее воздействие (рис. 2): маршевый движительно-рулевой комплекс (МДРК); систему навигации (СН); систему освещения обстановки (СОО); систему гидроакустической связи (Г/а связь) и радиосвязи (Радиосвязь); систему генерирования и распределения электроэнергии (СЭО), интегрированную систему управления (ИСУ), а также – датчики (Датчики).

Необходимо сформировать оценку безопасности движения АНПА.

### ■ Предлагаемое решение

Для оценки безопасности движения АНПА предлагаем, с одной стороны, рассмотреть вероятностное влияние внешней среды на возникновение отказа оборудования АНПА, а с другой стороны – проанализировать реакцию ИСУ АНПА на отказ оборудования и обеспечение безопасности движения АНПА при выполнении маршрутного задания.

В качестве критерия безопасности движения АНПА примем вероятность выполнения АНПА маршрутного задания и его прибытия в конечную точку маршрута. Оценку влияния внешней среды на отказы оборудования проведем с использованием динамической байесовской сети [15]. Для оценки влияния отказов оборудования АНПА на безопасность его движения используем цифровой полигон в виде стенда моделирования с реализацией симуляции отказов.

### ■ Влияния внешней среды на безотказность работы оборудования

Рассмотрим следующие типы внешней среды, способные привести к отказам оборудования: открытые воды; прибрежные воды; морской лед; береговой припай [16].

Открытые воды определяются как районы, удаленные от прибрежной и транспортной полосы [16]. В открытой воде работа АНПА опасна вблизи дна из-за неровностей его рельефа, а также при всплытии АНПА на поверхность для обсервации, проведения сеанса радиосвязи со спутником или пунктом управления при высокой волне, сильном ветре или повышенном судоходстве.

Прибрежные воды представляют собой участок между сушей и океаном, характеризуются высокой плотностью судов, нахождением инженерных сооружений, рыболовных сетей, проведением водолазных работ, слабой прозрачностью воды, сильными течениями, быстрым пространственным и временным изменением глубины, сильным волнением на мелководье, появлением группы островов. Все это приводит к ухудшению работы средств освещения обстановки и гидроакустических средств связи, что, в свою очередь, способно привести к столкновению с другими судами, препятствиями и затоплению АНПА.

Морской лед и айсберги создают опасность столкновения с ними АНПА, что может привести к физическим повреждениям забортных компонентов и систем АНПА, таких как винты, рули, элементы антенн, обшивки корпуса АНПА, датчиков и забортных

навигационных систем. В целях предотвращения столкновений с морским льдом и айсбергами необходимо их своевременно обнаруживать и обходить. В случае повреждения корпуса АНПА и выступающих за его корпус винтов, рулей и т.д. возникает потеря управляемости АНПА и необходимость реконфигурации [17] системы управления движением в целях поддержания АНПА на плаву и способности к движению. Порча забортных датчиков и измерителей параметров внешней среды приведет к отсутствию актуальных данных о внешней среде и выбору неоптимальных режимов работы систем АНПА, отклонению от маршрута и неэффективному функционированию АНПА [17].

Береговой припай представляет собой неподвижный лед, прикрепленный к берегу, состоящий из крупных льдин, разделенных трещинами, иногда полыньями. Кроме морского льда в полярных морях встречаются айсберги, оторвавшиеся от ледниковых покровов. В результате возможно чрезмерное заглубление АНПА из-за резкого ухода глубины и вероятного столкновения со скалами.

Кроме перечисленных условий на безопасность АНПА влияют также факторы, имеющие «накопительный» эффект, означающие увеличение негативного влияния условий повышенной опасности на АНПА при его нахождении в них длительное время.

Так, для АНПА, работающего подо льдом, низкая температура воды и другие факторы могут оказывать негативное влияние на емкость аккумуляторной батареи и вызывать ее деградацию, возрастающую с увеличением времени нахождения в этих условиях.

Охарактеризуем состояние внешней среды процентным соотношением типов сред, например, открытые воды – 60%; прибрежные воды – 23%; морской лед – 11%; береговой припай – 6%.

В связи с невозможностью получения точного прогноза внешних условий на длительный горизонт для оценки влияния внешних условий на отказы и сбои в работе систем АНПА сформируем динамическую байесовскую сеть [15]. Для этого построим ориентированный взвешенный граф влияния внешних условий на вероятность выполнения маршрутного задания (рис. 2). Вершины графа соответствуют случайным величинам: параметрам окружающей среды и состоянию систем АНПА, а ребра – непосредственным вероятностным взаимосвязям между случайными величинами.

Покроем район нахождения АНПА сеткой с определенным шагом и предположим, что для каждого узла сетки известны по экспертным оценкам или базам данных [2, 17, 18] процентное соотношение типов среды и вероятности изменения процентного соотношения при переходе из одного узла сетки в

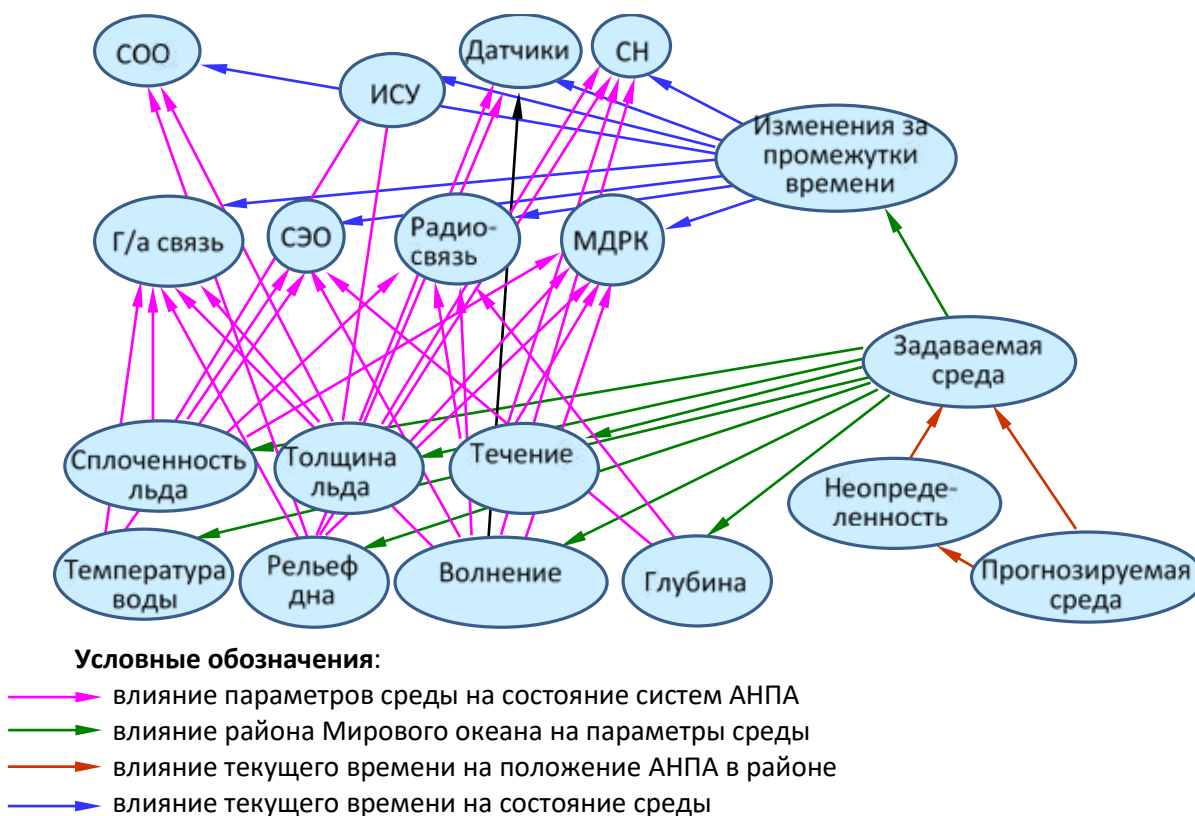


Рис. 2. Структурная схема динамической байесовской сети



другой. Пусть также известны вероятности влияния типов среды на параметры среды, типов среды на состояние систем АНПА и параметров среды на состояние систем АНПА.

Для определения совместной вероятности выполнения маршрутного задания специально разработан алгоритм, на вход которого необходимо подать координаты текущего положения АНПА.

Шаг 1. Поскольку неопределенность оценки местоположения АНПА зависит от внешних условий, то расчет вероятности фактической внешней среды в месте положения АНПА определим сочетанием прогнозируемой внешней среды и прогнозируемого положения АНПА с использованием таблиц условной вероятности.

Шаг 2. Расчет вероятности изменения процентного соотношения типов среды в процессе движения АНПА при переходе от момента времени  $t-1$  к моменту  $t$ .

Шаг 3. Расчет вероятности влияния состояния среды на параметры среды (температура воды, рельеф дна, волнение, глубина, сплоченность льда, толщина льда, течение).

Шаг 4. Расчет вероятности влияния параметров среды на отказы в системах АНПА – по каждой системе АНПА.

При возникновении отказов оборудования АНПА его функционирование продолжается в соответствии с алгоритмами, заложенными в ИСУ АНПА, в том числе и на случай возникновения отказов оборудования или систем [16]. Оценку влияния отказов на безопасность движения АНПА целесообразно проводить на цифровом полигоне – стенде имитационного моделирования функционирования АНПА.

Рассмотрим подробнее организацию цифрового полигона в виде стенда моделирования.

## ■ Влияние отказов на движение АНПА

При разработке стенда моделирования наиболее полное воспроизведение функционирования систем АНПА потребовало формирования адекватных данных, подаваемых на вход каждой из систем АНПА [18]. По результатам анализа данных, поступающих на вход алгоритмов функционирования систем АНПА, определен состав программных модулей и цифровых двойников (программных имитаторов) оборудования, которые должны быть размещены на стенде моделирования для полноценной работы штатных алгоритмов функционирования АНПА.

Стенд моделирования функционирования АНПА включает в свой состав программу ИСУ АНПА и

цифровые двойники оборудования систем АНПА в виде их программных имитаторов, управляемых по командам ИСУ АНПА.

Цифровой полигон функционирования АНПА в общем случае включает в свой состав следующие цифровые двойники оборудования и сенсоров АНПА (в случае их наличия в АНПА) в виде программных имитаторов: имитатор тактической обстановки; имитатор помехо-сигнальной обстановки; модель движения АНПА; имитатор гидроакустической системы освещения обстановки; имитатор системы навигации; имитатор гидроакустической навигационной системы; имитатор акустического маяка; имитатор прибора светосигнальной системы; имитатор датчиков; имитатор уравнительно-дифференциальной системы; имитатор оборудования радиосвязи; имитатор гидроакустической связи; имитатор устройства отдачи аварийного балласта; имитатор многоканального преобразователя напряжения; имитатор электроэнергетической сети; имитатор литий-ионной аккумуляторной батареи; имитатор маршевого движительно-рулевого комплекса.

Цифровые двойники (программы) обмениваются между собой информацией по сети Ethernet, структура информационных пакетов соответствует штатным протоколам информационно-технического взаимодействия (ИТВ). В сообщениях от программных имитаторов оборудования в программы систем АНПА входят параметры состояния оборудования и сообщения об отказах. В целом для стенда моделирования функционирования АНПА разработано порядка семидесяти программных имитаторов оборудования АНПА и исполнительных механизмов.

Для обеспечения формирования отказов без затрагивания штатных протоколов ИТВ и алгоритмов управления системами АНПА разработан специальный алгоритм формирования отказов, создан банк данных вероятных отказов по каждой из систем АНПА, разработаны протоколы ИТВ программы для автоматизированного рабочего места (АРМ) оператора с имитаторами оборудования, разработан интерфейс для взаимодействия оператора с имитаторами оборудования. Все перечисленное было реализовано в виде программы задания режимов симуляции отказов.

Пусть у нас имеется  $N$  систем, в которых из-за влияния внешних условий может произойти отказ. В нашем случае, как следует из графа байесовской сети,  $N=8$ .

Пусть протоколами ИТВ определены  $M_i$  неисправностей в каждой  $i$ -й системе; в общем случае  $M_i$  у каждой системы может быть различным.

Пусть по каждому  $j$ -му оборудованию каждой  $i$ -й системы протоколами ИТВ с ИСУ определены типы неисправностей, обозначим их  $J_m$ . Для каждого оборудования количество типов неисправностей в общем случае может быть различным.

Пусть заранее сформирован так называемый Протокол задания режимов симуляции АРМ оператора с каждым имитатором системы.

Поскольку возникновение отказов в ходе выполнения маршрутного задания носит вероятностный характер, и прогнозирование момента времени, в который произойдет отказ, невозможно, использована вероятностная модель формирования отказа. Появление отказа в случайный момент времени позволяет исключить человеческий фактор из процесса формирования отказов, так как отказ может произойти при произвольном сочетании параметров систем АНПА, в том числе – одновременно в разных системах.

В качестве входных данных оператор по каждой системе задает порог  $P_i^*$  для определения момента возникновения отказа в пределах от 0 до 1. Для задания порога  $P_i^*$  используются результаты вероятностных оценок влияния внешней среды на работоспособность систем АНПА. Поскольку по мере движения АНПА меняется процентное соотношение характеристик внешней среды, то, соответственно, меняется и пороговое значение возникновения отказа в оборудовании АНПА.

Кроме порога  $P_i^*$  оператор задает длительность процесса функционирования АНПА на стенде моделирования. При тестировании алгоритмов длительность функционирования АНПА необходимо задать так, чтобы по крайней мере один раз возник отказ.

В случае полного «прогона» миссии на стенде моделирования процесса функционирования АНПА необходимо организовать возникновение одного из следующих событий:

- прибытие АНПА в конечную точку маршрута;
- исчерпание энергоресурса АНПА;
- возникновение аварийной ситуации и возможного сброса аварийного балласта.

Запускаем процесс имитации заданной длительности; продолжительность каждого такта в данном случае значения не имеет.

Определение неисправности и момента ее возникновения происходит по следующему алгоритму:

Шаг 1. В ходе имитации в каждом  $k$ -м такте разыгрывается равномерно случайное число  $\xi_1$  из диапазона  $[0;1]$ , которое получается с использованием стандартного генератора случайных чисел.

Шаг 2. Производится сравнение случайного числа  $\xi_1$  с заданным порогом  $P_i^*$ .

Если случайное число  $\xi_1$  оказалось меньше вероятности неисправности  $P_i^*$ , т.е. выполняется условие:

$$\xi_1 < P_i^*,$$

то принимается, что в текущий момент времени  $t_k$  произошла неисправность и осуществляется переход к шагу 3, в противном случае считается, что неисправность не произошла.

Шаг 3. Определяется система, в которой произошла неисправность. Для этого определяется на момент  $t_k$  количество  $I$  активно работающих систем.

Иницируется датчик случайных чисел, и по равномерному закону разыгрывается случайное целое число  $\xi_2$  из диапазона  $[1, I]$ . Осуществляется переход к шагу 4.

Шаг 4. В цикле по  $i$  от 1 до  $I$  анализируется выполнение равенства:

$$i = \xi_2.$$

При выполнении равенства принимается, что неисправность произошла в  $i$ -й системе в момент времени  $t_k$  и осуществляется переход к шагу 5.

Шаг 5. Определяется оборудование  $j$  в выявленной системе  $i$ . Для этого иницируется датчик случайных чисел и по равномерному закону разыгрывается случайное число  $\xi_3$  из диапазона  $[1, M_i]$ . Осуществляется переход к шагу 6.

Шаг 6. В цикле по  $m$  видам оборудования анализируется выполнение равенства:

$$m = \xi_3.$$

При выполнении равенства принимается, что неисправность произошла в  $m$ -м оборудовании  $i$ -й системы. Осуществляется переход к шагу 7.

Шаг 7. Определение типа неисправности  $m$ -го оборудования в  $i$ -й системе. Для этого иницируется датчик случайных чисел и по равномерному закону разыгрывается случайное число  $\xi_4$  из диапазона  $[1, J_m]$ . Осуществляется переход к шагу 8.

Шаг 8. В цикле по  $j$  типам неисправностей анализируется выполнение равенства:

$$j = \xi_4.$$

При выполнении равенства принимается, что произошла неисправность в  $j$ -го типа в  $m$ -м оборудовании  $i$ -й системы. Осуществляется переход к шагу 9.

Шаг 9. Формируется сообщение в имитатор  $i$ -й системы в соответствии с Протоколом задания режимов симуляции с этой системой с указанием  $j$ -го типа неисправности, и сообщение отправляется в имитатор  $i$ -й системы.

На этом алгоритм формирования неисправности в оборудовании в автоматическом режиме закончен.

Передача информации об отказе в имитаторы оборудования осуществляется по специальным протоколам задания режимов симуляции, которые включают в себя параметры состояния внешней, а также индивидуально для каждой системы – состояние оборудования системы и типы отказов этого оборудования.

После получения системой сообщения об отказе эта система по штатному протоколу ИТВ передает свое состояние с отказом в ИСУ АНПА. При получении такого сообщения ИСУ анализирует сложившуюся ситуацию и принимает меры, если это возможно, по продолжению движения АНПА до конечной точки заданного маршрута.

Для оценки безопасности АНПА, выраженной способностью АНПА прибыть в конечную точку маршрута, целесообразно рассчитать вероятность прибытия АНПА в конечную точку маршрута. Для этого воспользуемся методом статистических испытаний (методом Монте-Карло) и оценим вероятность того, что АНПА дойдет до конечной точки маршрута.

В том случае, если эта вероятность выше заданного критерия, например, 0,80, то считаем, что рассматриваемый АНПА способен выполнить маршрутное задание, в противном случае:

- на этапе подготовки АНПА к выполнению маршрутного задания принимаем решение по повышению надежности забортного оборудования и стойкости корпуса АНПА к воздействию внешних условий, по сокращению маршрута и прокладке его в более благоприятных внешних условиях;

- на этапе эксплуатации АНПА принимаем решение о выполнении мер, направленных на повышение безопасности, например, путем реконфигурации системы управления движением [17].

## ■ Результаты численного эксперимента

Рассмотрим движение АНПА по одному из самых сложных участков Северного морского пути через пролив Вилькицкого, который в августе характеризуется участками открытой воды, прибрежными водами, участками сплоченного льда разной балльности и участками припая (рис. 1 вверху).

На первом этапе определялись вероятности возникновения отказов оборудования систем АНПА в зависимости от условий внешней среды. Для получения данных о процентном соотношении характеристик в узлах рассматриваемого района использована база данных [3]. По этим данным сформированы таблицы вероятности перехода АНПА из состояния на момент времени  $t-1$  в состояние на момент  $t$ . В ходе

проведения численного эксперимента полагалось, что в начальный момент времени АНПА находится в открытой воде до  $t=220$  тактов (под тактом понимается некоторый интервал времени между моментами измерений параметров среды), затем входит в район морского льда, а затем с  $t=385$  входит в район припая и находится в нем до  $t=585$ . Затем АНПА покидает район припая и входит в зону морского льда, а с  $t=710$  АНПА входит в область открытой воды и находится до окончания движения по проливу Вилькицкого до  $t=990$  такта.

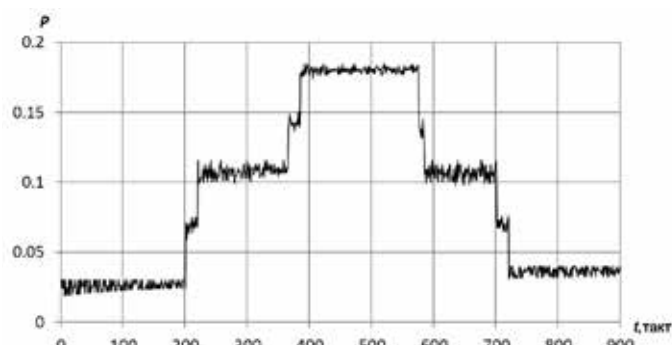


Рис. 3. Вероятность отказов оборудования систем АНПА в процессе выполнения маршрутного задания

Результаты численного эксперимента приведены на рис. 3.

Из результатов, приведенных на рис. 3, видно влияние внешней среды на вероятность отказов оборудования: в открытой воде вероятность отказов оборудования не превышает 0,05, при входе в район сплоченного льда – повышается до 0,10, при входе в район припая составляет около 0,18. Полученные результаты численного эксперимента в виде вероятностей были использованы в стенде моделирования для определения случайного момента времени возникновения отказов оборудования АНПА.

По результатам моделирования серии испытаний получено значение вероятности 0,92, что рассматриваемый АНПА способен выполнить маршрутное задание и прибыть в конечную точку маршрута. Поскольку полученное значение превышает заданный критерий 0,80, то по результатам сравнительного анализа принимается решение о возможности использования рассматриваемого АНПА для движения по заданному маршруту в сложных внешних условиях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00803, <https://rscf.ru/project/23-29-00803/>

## ЛИТЕРАТУРА

1. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress. 2021. 31 p. URL: <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf> (дата обращения: 20.10.2023).
2. Мартынова Л.А., Машошин А.И., Пашкевич И.В., Соколов А.И. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2015. № 1 (162). С. 50–58.
3. Generalized charts of the state of the ice cover in the arctic and freezing seas of russia and the greenland sea. URL: <http://www.old.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> (дата обращения: 20.10.2023).
4. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Определение эффективного поведения группы АНПА в сетцентрической системе освещения подводной обстановки // Информационно-управляющие системы. 2017. № 3 (88). С. 47–57.
5. Афонин А.Б., Королёв И.Ю., Тезиков А.Л. Исследование факторов, влияющих на навигационную аварийность в условиях мелководья // Вестн. гос. ун-та морского и речного флота имени адмирала С.О. Макарова. 2017. Т. 9, № 4. С. 735–743.
6. Joseph A. Vertical Profiling of Currents Using Acoustic Doppler Current Profilers: Measuring Ocean Currents: Tools, Technologies, and Data. Chapter: 11. Oxford: Elsevier, UK, 2013. DOI:10.1016/B978-0-12-415990-7.00011-9.
7. Naem W., Irwin G.W., Evasive Decision Making in Uninhabited Maritime Vehicles // Preprints of the 18th IFAC World Congress. Milano (Italy), 2011. P. 12833–12838.
8. Jeevith H., Henriksen E.H., Utne I.B., Schjølberg I. Development of dynamic safety envelopes for autonomous remotely operated underwater vehicles // Safety and Reliability—Safe Societies in a Changing World. Trondheim, Norway, 2018.
9. Ferreira F., Petrocchia R., Alves J. Increasing the operational safety of Autonomous Underwater Vehicles using the JANUS communication standard // IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV). 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729757.
10. Madhan R., Desa E., Navelkar G., Afzulpurkar S. Safety Aspects for Underwater Vehicles // Trends in Intelligent Robotics // 13th FIRA Robot World Congress. Bangalore, India, 2010. DOI:10.1007/978-3-642-15810-0\_2.
11. Ortiz A., Proenza J., Bernat G., Oliver G. Improving the safety of AUVs // Oceans '99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. 1999. DOI: 10.1109/OCEANS.1999.805005.
12. Loh T. Y., Brito M. P., Bose N., Xu J., Tenekedjiev K. A Fuzzy – Based Risk Assessment Framework for Autonomous Underwater Vehicle Under – Ice Missions // Risk Analysis. 2019. Vol. 39, Iss. 12. P. 2744–2765.
13. Brito M.P., Griffiths G., Art T. Eliciting expert judgment on the probability of Loss of an AUV operating in four environments. 2008. P. 139–149. URL: [https://www.researchgate.net/publication/313157878\\_Eliciting\\_expert\\_judgment\\_on\\_the\\_probability\\_of\\_Loss\\_of\\_an\\_AUV\\_operating\\_in\\_four\\_environments](https://www.researchgate.net/publication/313157878_Eliciting_expert_judgment_on_the_probability_of_Loss_of_an_AUV_operating_in_four_environments) (дата обращения: 20.10.2023).
14. Button R.W., Kamp J., Curtin T.B., Dryden J. A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles. RAND Corporation, 2009. 223 p.
15. Jensen F.V., Nielsen T.D. Bayesian Networks and Decision Graphs. New York: Springer, 2007. 447 p.
16. Yang R., Liu Y., Utne I.B., Paltrinieri N. Dynamic Risk Analysis of Operation of the Autonomous Underwater Vehicle // The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Control. Italy, 2020. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0\_4118-cd.
17. Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б. Подход к реконфигурации системы управления движением автономного необитаемого подводного аппарата // Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28, № 2 (109). С. 131–146.
18. Мартынова Л.А., Гриненков А.В., Пронин А.О., Куликовских Ю.В. Имитационное моделирование функционирования мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата // Имитационное моделирование: Теория и практика: Восьмая Всеросс. науч.-практ. конф. по имитационному моделированию и его применению в науке и промышленности. 2017. С. 474–479.

## Об авторах

**ПРОКОПОВИЧ Виталий Владимирович**, инженер-программист I категории

Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»,

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, Россия

**Область научных интересов:** гидроакустика, обработка информации, математическое моделирование

Тел.: +7-911-027-40-25,

E-mail: [vm.prokopovich@yandex.ru](mailto:vm.prokopovich@yandex.ru)

**ПОДШИВАЛОВ Георгий Андреевич**, инженер-программист I категории

Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»,

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, Россия,

**Область научных интересов:** гидроакустика, обработка информации, математическое моделирование

Тел.: +7-921-310-18-89,

E-mail: [930730@mail.ru](mailto:930730@mail.ru)

**МАРТЫНОВА Любовь Александровна**, д.т.н., с.н.с, в.н.с.

«Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»,

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, Россия),

**Область научных интересов:** системный анализ, математическое моделирование, обработка информации

Тел.: +7-921-941-13-95, E-mail: [martynowa999@bk.ru](mailto:martynowa999@bk.ru)

ORCID: 0000-0002-5613-0838

**ПАШКЕВИЧ Иван Владимирович**, главный специалист по направлению

Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»,

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, Россия,

**Область научных интересов:** гидроакустика, системы управления, моделирование, робототехника

Тел.: +7-911-933-00-06,

E-mail: [iv@bk.ru](mailto:iv@bk.ru)

ORCID: 0000-0002-6706-5592

**БЫКОВА Валентина Сергеевна**, начальник сектора

Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»»,

Адрес: 197046, Санкт-Петербург, ул. Малая Посадская, д. 30, Россия,

**Область научных интересов:** системы распознавания и управления

Тел.: +7-921-350-22-93. E-mail: [zvs.2011@yandex.ru](mailto:zvs.2011@yandex.ru)

ORCID: 0000-0003-1633-2758



# ASSESSMENT OF MOTION SAFETY OF A LARGE AUTONOMOUS UNDERWATER VEHICLE

V.V. Prokopovich, G.A. Podshivalov, L.A. Martynova, I.V. Pashkevich, V.S. Bykova

The problems of ensuring the safe motion of a large autonomous underwater vehicle (AUV) when it passes through sections with different environmental conditions are considered by the example of the development of the Northern Sea Route. An analysis was made of the influence of various environmental conditions - open and coastal water, fast ice and ice conditions - on the safety of the operation of a large AUV. An approach is proposed to assess the vehicle safety in various environments using a dynamic Bayesian network and conditional probability tables. To test the algorithms for controlling the the vehicle motion and the vehicle itself, a digital test site was developed in the form of a stand for simulating the functioning of the AUV. The development of digital twins in the form of software simulators of the vehicle devices and mechanisms made it possible to test control algorithms on the simulation stand both during normal operation of its systems and in the event of malfunctions due to functioning in various environments. The results obtained on a simulation stand for a large AUV operating on the farthest and most complicated part of the Northern Sea Route - the Vilkitski Strait, helped us to assess the safety of the vehicle operation and outline the ways to improve the safety by upgrading the algorithms for controlling the AUV motion in difficult environmental conditions.

**Keywords:** motion safety assessment, large autonomous underwater vehicle, dynamic Bayesian network, conditional probability tables, statistical test method, digital test site.

## References

1. Navy Large Unmanned Surface and Undersea Vehicles: Background and Issues for Congress, 2021, p. 31. URL: <https://sgp.fas.org/crs/weapons/R45757.pdf> (Access date: 20.10.2023).
2. Martynova L.A., Mashoshin A.I., Pashkevich I.V., Sokolov A.I. Algorithms implemented by the integrated AUV control system. *Izvestiya YUFU. Tekhnicheskoye nauki.* 2015. No. 1 (162). P. 50–58.
3. Generalized charts of the state of ice cover in the Arctic and freezing seas of Russia and the Greenland sea. URL: <http://www.old.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> (Access date: 20.10.2023).
4. Martynova L.A., Rozengauz M.B. Efficient operation of AUV group in a network-centric underwater surveillance system. *Informatsionno-upravlyayushchie sistemy*, 2017. No. 3 (88). P. 47–57.
5. Afonin A., Korolev I., Tezikov A. A study of the factors influencing navigational accidents in shallow water. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*, 2017. Vol. 9. No. 4. P. 735–743.
6. Joseph A. Vertical profiling of currents using acoustic Doppler current profilers. In *Measuring Ocean Currents: Tools, Technologies, and Data*, Chapter 11, Oxford: Elsevier, UK, 2013. DOI:10.1016/B978-0-12-415990-7.00011-9.
7. Naeem W., Irwin G.W. Evasive decision making in uninhabited maritime vehicles. *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy)*, 2011. August 28-September 2. P. 12833–12838.
8. Jeevith H., Henriksen E.H., Utne I.B., Schjølberg I. Development of dynamic safety envelopes for autonomous remotely operated underwater vehicles. *Safety and Reliability—Safe Societies in a Changing World*, 2018. *Proceedings of ESREL 2018*. June 17-21, 2018. Trondheim, Norway.
9. Ferreira F., Petroccia R., Alves J. Increasing the operational safety of Autonomous Underwater Vehicles using the JANUS communication standard, 2018. *IEEE/OES Autonomous Underwater Vehicle Workshop (AUV)*. 06-09 November 2018. DOI: 10.1109/AUV.2018.8729757.
10. Madhan R., Desa E., Navelkar G., Afzulpurkar S. Safety aspects for underwater vehicles. *Trends in Intelligent Robotics*, 2010. 13th FIRA Robot World Congress, FIRA. Bangalore, India. September 15-17 2010. DOI:10.1007/978-3-642-15810-0\_2.
11. Ortiz A., Proenza J., Bernat G., Oliver G. Improving the safety of AUVs,” *Oceans ‘99. MTS/IEEE. Riding the Crest into the 21st Century. Conference and Exhibition. Conference Proceedings (IEEE Cat. No.99CH37008)* 13-16 September 1999. DOI: 10.1109/OCEANS.1999.805005.
12. Loh T.Y., Brito M.P., Bose N., Xu J., Tenekedjiev K. A fuzzy – based risk assessment framework for autonomous underwater vehicle under-ice missions. *Risk Analysis*, 2019. Vol. 39. No. 12. December 2019. P. 2744-2765.
13. Brito M.P., Griffiths G., Art T. Eliciting expert judgment on the probability of loss of an AUV operating in four environments, 2008. P. 139–149. URL: <https://www.researchgate.net/publication/313157878> (Access date: 20.10.2023)
14. Button R.W., Kamp J., Curtin T.B., Dryden J. *A Survey of Missions for Unmanned Undersea Vehicles*, 2009. RAND Corporation.
15. Jensen F.V., Nielsen T.D. *Bayesian Networks and Decision Graphs*, Springer, 2007. New York, NY 10013, USA.
16. Yang R., Liu Y., Utne I.B., Paltrinieri N. Dynamic risk analysis of operation of the autonomous underwater vehicle. *The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Control*, 2020. Italy. June 2020. DOI:10.3850/978-981-14-8593-0\_4118-cd.
17. Martynova L.A. and Rozengauz M.B. Approach to reconfiguration of a motion control system for an autonomous underwater vehicle, 2020. *Gyroscopy and Navigation*. Vol. 11. No. 3. P. 244–253.
18. Martynova L.A., Grinenkov A.V., Pronin A.O., Kulikovskikh Yu.V. Simulation modeling of the functioning of a multi-agent

control system for an autonomous uninhabited underwater vehicle. V sbornike: Imitatsionnoye modelirovaniye. Teoriya i praktika. Vos'maya Vserossiyskaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya po imitatsionnomu modelirovaniyu i yego primeneniyu v nauke i promyshlennosti. 2017. P. 474–479.

## About the authors

### **PROKOPOVICH Vitaly Vladimirovich**

**Position:** Software engineer 1st category

**Place of work:** State Research Center of the Russian Federation  
Concern CSRI Electropribor, JSC

**Organization address:** 197046, St. Petersburg, st. Malaya  
Posadskaya, 30, Russia

**Phone:** +7-911-027-40-25

**E-mail address:** vm.prokopovich@yandex.ru

**Area of scientific interests:** hydroacoustics, information  
processing, mathematical modeling

### **PODSHIVALOV Georgy Andreevich**

**Position:** Software engineer 1st category

**Place of work:** State Research Center of the Russian Federation  
Concern CSRI Electropribor, JSC

**Organization address:** 197046, St. Petersburg, st. Malaya  
Posadskaya, 30, Russia,

**Phone:** +7-921-310-18-89

**E-mail address:** 930730@mail.ru

**Area of scientific interests:** hydroacoustics, information  
processing, mathematical modeling

### **MARTYNOVA Lyubov Aleksandrovna**

**Academic degree:** Doctor of Technical Sciences

**Scientific title:** senior researcher

**Position:** senior researcher

**Place of work:** State Research Center of the Russian Federation  
Concern CSRI Electropribor, JSC

**Organization address:** 197046, St. Petersburg, st. Malaya  
Posadskaya, 30, Russia),

**ORCID:** 0000-0002-5613-0838

**Phone:** +7-921-941-13-95

**E-mail address:** martynowa999@bk.ru

**Area of scientific interests:** system analysis, mathematical  
modeling, information processing

### **PASHKEVICH Ivan Vladimirovich**

**Position:** chief specialist

**Place of work:** State Research Center of the Russian Federation  
Concern CSRI Electropribor, JSC

**Organization address:** 30, Malaya Posadskaya str., Saint  
Petersburg 197046, Russia

**Research interests:** underwater acoustics, robot's control systems

**Phone:** +7(911)9330006

**E-mail address:** iv@bk.ru

**ORCID:** 0000-0002-6706-5592

### **BYKOVA Valentina Sergeevna**

**Position:** head of sector

**Place of work:** State Research Center of the Russian Federation  
Concern CSRI Electropribor, JSC

**Organization address:** 197046, St. Petersburg, st. Malaya  
Posadskaya, 30, Russia,

**ORCID:** 0000-0003-1633-2758

**Phone:** +7-921-350-22-93

**E-mail address:** zvs.2011@yandex.ru

**Area of scientific interests:** recognition and control systems

