

Метод оценки риска возникновения аварии АНПА при полном израсходовании энергоресурса*

Мартынова Л.А., Розенгауз М.Б.

АО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»
г. Санкт-Петербург, Российская Федерация
martynowa999@bk.ru, rozengauz_mb@mail.ru

Аннотация. Рассмотрена задача оценки риска возникновения аварии в условиях полного расхода энергоресурса автономного обитаемого подводного аппарата до окончания выполнения маршрутного задания. Описаны возможные сценарии развития событий, связанных с возможностью выхода аппарата на связь для передачи аварийного сигнала, со столкновением аппарата с судами, льдинами, с попаданием в течения, водовороты, мусорные острова и т.п. С учетом всех ситуаций разработан алгоритм определения вероятности повреждения аппарата с использованием байесовской сети и таблиц условной вероятности. В зависимости от окружения аппарата в момент полного расхода энергоресурса проведена оценка размера ущерба. Разработан метод оценки риска возникновения аварии, включающий в себя определение вероятности повреждения аппарата, оценку размера ущерба и оценку риска возникновения аварии. На конкретном примере показано применение разработанного метода оценки риска возникновения аварии в различных условиях ледохода и временных задержек прибытия поисково-спасательных средств из-за сложных погодных условий. Результаты исследований подтвердили правильность разработанного метода. Разработанный метод оценки риска возникновения аварии позволяет уже на этапе формирования маршрутного задания аппарату сделать вывод о необходимости: пересмотра маршрутного задания, выбора более энергосодержащего аппарата или замены аккумуляторной батареи, ожидания более благоприятных условий и т.д. для того, чтобы снизить риски аварии в случае отсутствия у аппарата энергии.

Ключевые слова: автономный подводный аппарат, авария, общее потребление энергии, байесовская сеть, условная вероятность, ущерб.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время при планировании маршрутного задания (МЗ) автономному обитаемому подводному аппарату (АНПА), предназначенному для решения задач подводного наблюдения [1], поиска полезных ископаемых и объектов на дне, остро стоит задача обеспечения достаточности энергоресурса, особенно для АНПА дальнего радиуса действия порядка 10 000 км. С развитием подводной робототехники возникают инциденты, связанные с АНПА и имеющие определенные негативные последствия. Это требует ответственного подхода к формированию АНПА и его МЗ для снижения пагубных последствий возникновения нештатных ситуаций на АНПА [2]. Одним из таких инцидентов может оказаться полный расход энергоресурса до того, как АНПА прибывает в конечную

точку маршрута, поскольку возникающие последствия могут оказаться катастрофическими: авария или затопление АНПА способны привести к невыполнению поставленной в МЗ задачи, потере полезной нагрузки, дополнительными финансовыми и временными расходами на поиск и подъем АНПА, ремонт или списание аппарата в случае нецелесообразности ремонта, к экологическим негативным последствиям, авариям вплоть до угрозы человеческим жизням. Под аварией будем понимать возникновение негативных событий, приводящих к существенным материальным затратам. В худшем случае авария способна угрожать человеческим жизням и способна привести к катастрофе с человеческими жертвами. В связи с этим перед выполнением МЗ требуется оценка риска возникновения аварии АНПА при полном израсходовании энергоресурса. Эти результаты позволили бы при нехватке энергоресурса в случае высокого риска возникновения аварии – увеличить запас энергоресурса, скорректировать МЗ, заменить АНПА на более надежный, дождаться более благоприятных условий внешней среды и т.д. Этим определяется актуальность работы.

Проблемам потери АНПА и подходам к оценке риска его потери посвящен ряд публикаций, преимущественно, зарубежных. Так, в [3] разработана система управления рисками (RMF) для беспилотных подводных аппаратов (UUV) по результатам исследований рисков потери и прерывания МЗ АНПА с использованием результатов анализа надежности, дерева отказов и дерева событий. В качестве меры по снижению риска предложены улучшение и адаптация процедур технического обслуживания, планирования миссий, распознавание и устранение неисправностей. В [4] на этапах проектирования и эксплуатации АНПА предложено определять вероятность потери АНПА с учетом возникновения неисправностей или происшествий по результатам эксплуатации АНПА. Показан агрегированный риск оценки, полученный на основе экспертных заключений, который был использован для создания модели риска. Для оценки выживания АНПА с увеличением расстоянием миссии использована статистическая функция выживания, основанная на непараметрической оценке Каплана-Мейера. В [5] выявлены критические факторы риска и причинно-следственные связи эксплуатации АНПА. Предложено их разделение на качественные, полуквантитативные и количественные, отмечено влияние

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00803, <https://rscf.ru/project/23-29-00803/>. Статья публикуется по рекомендации программного комитета Всероссийской научно-технической конференции "Автоматизация", <https://rusautocon.org>

на риск: окружающей среды, человеческого фактора и их интерактивного воздействия. Предложено использовать методы количественного динамического анализа риска. Описаны типы аварий при эксплуатации АНПА и их тяжесть в зависимости от уровня повреждения самого АНПА, что способно привести к задержкам или даже прекращению исследовательских проектов, к потере ценных собранных данных и потенциально нанести вред окружающей среде. Одной из критических причин аварии АНПА в [6] отмечена потеря связи с морской автономной системой, которая является одновременно фундаментальной и труднодиагностируемой: в случае потери АНПА задача диагностики основной причины осложняется отсутствием достаточных знаний, которые зачастую не удается выразить количественно формализованным образом.

В ряде публикаций для оценки риска предложено использовать байесовскую сеть. Так, в [7] обоснована необходимость использования в модели рисков байесовской сети доверия для оценки эффективности взаимосвязи между оператором и АНПА перед проведением МЗ, и при необходимости, проведение корректировки МЗ. В [8] предложено использовать байесовскую сеть доверия (BBN), в которой в качестве начальной априорной вероятности потерь из-за неудачи принимаются экспертные оценки. Топология сети фиксирует причинные воздействия окружающей среды отдельно на АНПА и на платформу поддержки, и объединяет их для получения обновленной вероятности потерь из-за сбоя. В [9] отмечена необходимость проведения прогнозирования рисков для повышения безопасности выполнения МЗ. При этом учитываются как динамические условия, так и потенциальные функциональные отказы АНПА. Предложен подход, основанный на связях, для оценки риска потери глайдера в динамической подводной среде. Разработанная причинно-следственная байесовская сеть (CBN) интегрировала функции связи в традиционную байесовскую сеть доверия (BBN), целью которой является обработка нелинейных зависимостей между переменными окружающей среды и присущими техническими сбоями. С помощью BBN были зафиксированы потенциальные факторы риска с причинами и последствиями. Затем использовалась связь Гаусса для измерения коррелирующих зависимостей между выявленными факторами риска. Кроме того, был проведен анализ зависимости и выводы CBN для оценки уровня риска потери транспортных средств с учетом различных наблюдений за окружающей средой.

Исследования, связанные с оценкой рисков возникновения аварий АНПА по причине электроснабжения, отражены в [10]. Отмечается, что свыше 50% случаев потери АНПА приходится на аварии электроснабжения. Как только АНПА потеряет основную мощность, он, в конце концов, погрузится на морское дно. Меры снижения риска включают в себя: контроль напряжения на клеммах аккумулятора, проверку внутреннего сопротивления, контроль заряда/разряда, компенсацию температуры окружающей среды, оценку остаточной емкости, выявление дефектов батареи.

Таким образом, из обзора публикаций следует, что, несмотря на широкий анализ проблемам потери АНПА, вскрытия причин его возникновения и оценки риска перед выполнением маршрутного задания, в публикациях отсут-

ствует обсуждение оценки риска потери АНПА по причине окончания энергоресурса до окончания выполнения маршрутного задания.

В связи с этим целью работы явилась оценка риска возникновения аварии в случае полного расхода энергоресурса АНПА.

РИСК ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИИ

Количественная оценка риска характеризует степень угрозы возникновения аварийных ситуаций и возникающего при этом ущерба, и определяется произведением вероятности негативного события (аварии) на величину возможного ущерба от него [11]:

$$R = P \cdot Y, \quad (1)$$

где R – величина риска; P – вероятность возникновения аварии АНПА; Y – ущерб от аварии, выраженный в финансовых затратах.

Из выражения (1) следует, что для оценки риска возникновения аварии необходимо определить вероятность возникновения аварии и ущерб от ее возникновения. Авария может возникнуть по причине самовозгорания на АНПА, пожара, взрыва, в связи с чем необходимо определить вероятность возникновения условий, способных привести к возникновению аварии. Для этого, прежде всего, проанализируем причины полного расхода энергоресурса и возможные повреждения АНПА, способные привести к условиям возникновения аварии.

ПРИЧИНЫ ПОЛНОГО РАСХОДА ЭНЕРГОРЕСУРСА

Причинами полного расхода энергоресурса АНПА могут оказаться непредвиденные внешние условия:

- необходимость обхода внезапно возникших препятствий; из-за ограниченности сектора обзора средств обнаружения АНПА выбранный путь обхода может оказаться не самым энергоэкономичным;
- ледоход, требующий осторожного движения АНПА с неоптимальной скоростью во избежание столкновений с льдинами. Кроме того, для предотвращения столкновений с морским льдом и айсбергами АНПА вынужден их обходить или расходиться с ними, увеличивая, тем самым, проходимый путь;
- течения, приводящие к увеличению проходимого пути по сравнению с прогнозируемым для постоянной корректировки местоположения АНПА;
- неоптимальный режим работы устройств, приборов и механизмов из-за возможного повреждения корпуса и бортовых приборов и устройств АНПА, неоптимальных условий и режимов работы источников электроэнергии;
- преждевременная деградация аккумуляторной батареи из-за понижения температуры в холодной воде или после превышения допустимого для нормальной работы аккумуляторной батареи количества циклов заряда-разряда.

При полном расходе энергоресурса должен остаться аварийный запас электроэнергии для передачи аварийного сообщения на пункт сопровождения и излучения аварийного сигнала акустическим маяком АНПА в течение определенного времени – для возможности обнаружения АНПА поисково-спасательной службой (ПСС).

При отсутствии энергоресурса АНПА по заложенным в систему управления алгоритмам [12-13] он сбрасывает

аварийный балласт для экстренного всплытия в случае отсутствия необходимости соблюдения режима скрытности, и заглубляется для покладки на грунт в случае необходимости сохранения его скрытности.

При всплытии вероятность возникновения аварии определяется моментом времени всплытия, местом всплытия и условиями внешней среды в месте всплытия.

Всплытие может произойти в открытых водах, прибрежных водах, среди морского льда или берегового припая [14].

Всплытие в открытых водах (рис.1 верхний слева), удаленных от прибрежной и транспортной полосы, опасно сильным волнением, шквалистым ветром и повышенным судходством.



Рис. 1. Условия внешней среды

Шторм и высокая волна способны повредить АНПА, из-за сильного волнения невозможна устойчивая связь для передачи аварийного сообщения, что не позволит своевременно прибыть ПСС для спасения АНПА. Ветер вызывает дрейф АНПА, крен и изменение его скорости. На волнении АНПА подвергается качке, заливанию, сильным динамическим нагрузкам на корпус. В районах с низкой температурой возможно обледенение. Сила удара волны способна достигать 3–10 т/м², что представляет собой серьезную опасность для АНПА.

Попадание АНПА при всплытии в мусорные образования из бытовых отходов приводят к его застреванию в них, облипанию ими корпуса АНПА. Это приводит к осложнению проведения поисковых работ, так как на фоне мусора АНПА обнаружить сложнее, чем на фоне чистой воды.

Всплытие в прибрежных водах (рис.1 верхний справа) между сушей и океаном опасно высокой плотностью судов, наличием инженерных сооружений и рыболовных сетей, проведением водолазных работ, сильными течениями, быстрым пространственным и временным изменением глубины, возможным появлением группы нескольких островов со сложной топологией. В таких условиях возможно столкновение с судами, шквалистый ветер способен прибить АНПА к скалам или инженерным сооружениям и повредить АНПА. После столкновения АНПА в зависимости от тяжести полученных повреждений он может утонуть или остаться на плаву, дрейфуя под действием течений и ветра в произвольном направлении в ожида-

нии помощи [15]. Возможное попадание АНПА в рыболовные сети связано с наличием потерянных или брошенных сетей тралов, специальных ловушек для ловли омаров, крабов и других видов промысловых снастей. В совокупности они образуют огромные плавучие ловушки, которые существуют и в Арктике, и у отдаленных островов Тихого океана, и у коралловых рифов. Такие блуждающие снасти (ghost gear) опасны для АНПА: ежегодно в мировом океане появляется 640 тыс. тонн такого мусора, после того как сети и тралы теряются, рвутся или выбрасываются самими рыбаками по причине их ветхости и непригодности для ремонта, браконьерами при приближении судов береговой охраны или других правоохранительных органов. По оценкам промысловиками каждый год теряется 6% всех рыболовных сетей, используемых в море. Особую опасность представляют собой глубоководные одностенные сети, погружаемые на глубину до 500 м. Блуждающие снасти мигрируют по мировому океану в территориальных водах разных государств [16].

Всплытие в условиях морского льда (рис.1 нижний слева) опасно из-за возможного столкновением с льдинами, что способно привести к повреждениям АНПА. В зависимости от густоты ледохода, равной отношению площади льдин к площади водной поверхности, а также – от степени покрытия ледяными образованиями водной поверхности акватории, интенсивности и характера движения льда, зависят повреждения АНПА. Движение льда зависит, в свою очередь, от погодных условий, календарного времени замерзания или вскрытия, гидравлических характеристик водного потока и строения акватории.

Всплытие в условиях припая (рис. 1 нижний справа) не позволяет АНПА оказаться на морской поверхности и передать аварийное сообщение. В таких случаях или при необходимости соблюдения режима скрытности происходит покладка АНПА на грунт – маневр, который применяется в целях сбережения оставшегося на борту энергоресурса и достижения максимальной скрытности, а также – в ситуациях, которые вынуждают АНПА находиться в погруженном положении с отключенными двигателями.

Покладка АНПА на грунт сопровождается быстрым заглублением АНПА, при этом возможен удар корпуса о грунт и неровности рельефа дна, рифы, скалы, в результате которого могут произойти: повреждение корпуса, смещение внутритотсечного оборудования, разгерметизация корпуса АНПА и т.д. Удар о грунт способен привести к самовозгоранию, пожару или взрыву; повреждение АНПА способно привести невосполнимой потере оборудования АНПА и АНПА в целом, к заполнению АНПА водой и т.д.

Кроме того, при заглублении возможны: реакция морской фауны на АНПА, нападение рыб и морских животных, попадание в подводные течения, водовороты, источники подводной вулканической деятельности.

Кроме условий внешней среды, негативные последствия для АНПА могут оказать всплытие в зоне коммерческих, административных, политических интересов, что может привести к буксировке АНПА на базу конкурентов. Время всплытия также может оказать влияние, так как, например, в ночное время или в плохую видимость, шторм, поисково-спасательные операции АНПА затруднены, и промедление с обнаружением АНПА способно привести к аварии.

УСЛОВИЯ, СПОСОБНЫЕ ПРИВЕСТИ К АВАРИИ

Условия, способные привести к аварии, определяются вероятностью повреждения АНПА и ущербом от их повреждения. Из-за невозможности точного прогнозирования условий, способных в момент расхода энергоресурса АНПА привести к повреждению АНПА, которые носят стохастический характер, для оценки вероятности повреждения, сформируем динамическую байесовскую сеть [17-20] в виде взвешенного ориентированного графа, внешний вид которого представлен на рис. 2. Полагаем, что для определенных точек района нахождения АНПА (назовем точки «узлами») известно процентное соотношение открытой воды, прибрежной зоны, морского льда, припая из баз данных [21-23] или по результатам экспертных оценок.

Кроме того, в точке всплытия на текущий момент времени известны плотность судоходства, сплоченность льда, наличие инженерных сооружений.

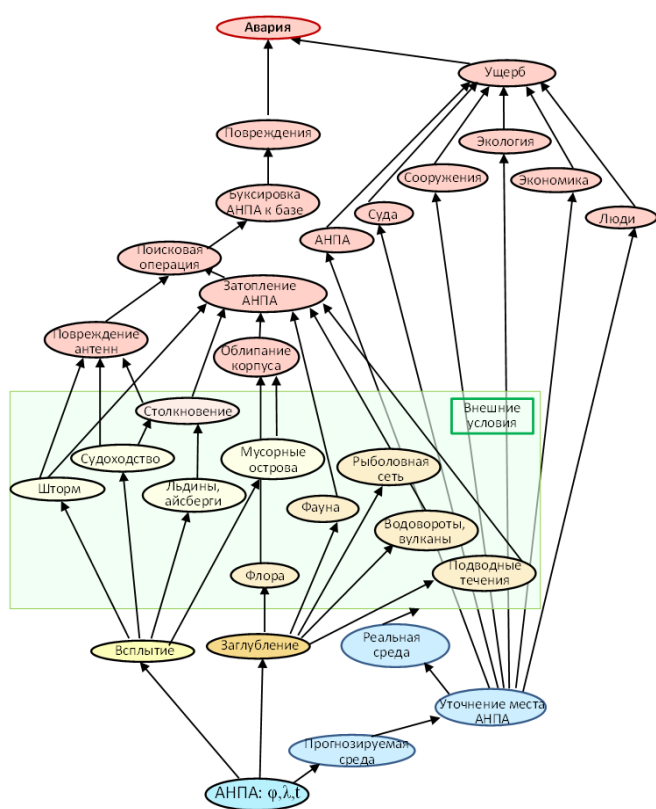


Рис. 2. Вид графа байесовской сети

Для определения вероятности изменения состояния среды с течением времени в одном и том же узле, используем таблицы условной вероятности (СРТ – Conditional probability table) [24] с учетом состояния окружающей среды в моменты времени, предшествующие текущему. Для определения вероятности состояния АНПА также используем таблицы условной вероятности СРТ.

На вход алгоритма расчета вероятности повреждения АНПА и возникновения ущерба с использованием разработанной динамической байесовской сети поступают данные: - текущие место-время окончания у АНПА запаса энергоресурса; - процентное соотношение типов среды для каждого узла рассматриваемого района;

- вероятности изменения состояния среды при переходе из одного узла в другой и при переходе от одного момента времени в другой (рис. 3);
- вероятности влияния условий внешней среды на состояние АНПА.

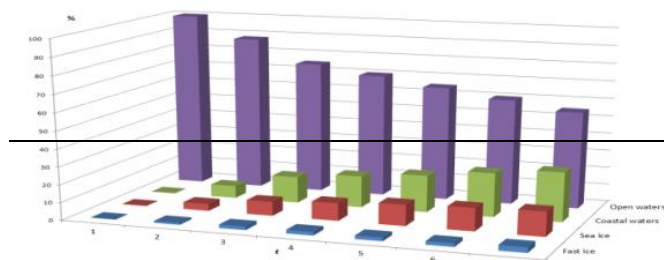


Рис. 3. Изменение процентного соотношения типов внешней среды с течением времени

Шаг 1. Определение фактической внешней среды в точке положения АНПА в момент окончания энергоресурса.

Для определения фактической внешней среды в точке положения АНПА используем координаты АНПА и таблицу зависимости степени неопределенности местоположения АНПА от состояния среды. Фактическая внешняя среда в точке положения АНПА определяется сочетанием прогнозируемой внешней среды и прогнозированием неопределенности местоположения АНПА. При определении вероятности учитывается тот факт, что неопределенность оценки местоположения в открытой воде низкая из-за относительно точной навигации, в то же время неопределенность определения местоположения подо льдом существенно выше из-за относительно неточной подводной навигации, поскольку сигналы спутниковых навигационных систем не проникают через толщу воды или льда, а использование других методов навигации в указанных условиях способно привести к относительно высокой неопределенности предсказания местоположения АНПА.

Вероятность того, что состояние внешней среды в месте нахождения АНПА с определенным процентным сочетанием типов среды, определяется выражением:

$$P(V_i, V_j) = \prod_{i=1}^n P(V_i | V_j) P(V_j)$$

где V_i, V_j – случайные величины; $i=1, \dots, 4$ – типы внешней среды (открытая вода, прибрежные воды, морской лед и айсберги, береговой припай); $j=1, \dots, 3$ – степень неопределенности (низкая, средняя, высокая).

Результатом выполнения шага 1 является определение вероятности нахождения АНПА в точке с координатами (x, y, z) в зависимости от условий внешней среды.

Шаг 2. Имея вероятности нахождения АНПА в точке с координатами (x, y, z) , определяем вероятность процентного соотношения типов внешней среды в этой точке. Результатом выполнения шага 2 является определение вероятности того, что в месте нахождения АНПА внешняя среда характеризуется определенным процентным соотношением типов среды.

Шаг 3. Определение влияния состояния внешней среды и требований скрытности на принятие решения АНПА на всплытие или заглубление.

Шаг 4. Определение влияния негативных факторов на повреждение АНПА. При этом вероятность того, что шторм приведет к аварии, пропорциональна уровню волн (в баллах) и силе ветра. Вероятность столкновения с судами пропорциональна плотности судоходства, которую можно получить по данным, например, на сайте MarineTraffic.com; в этом случае это может быть не просто столкновение с кораблем, а корабль способен утащить АНПА перед собой, то есть сместить АНПА из исходного положения. Вероятность попадания АНПА в мусорные образования из бытовых отходов пропорциональна, по аналогии с ледовым покрытием, отношению площади, покрытой мусором, к площади акватории, в которой АНПА остался без энергии.

При заглублинии вероятность повреждения АНПА определяется рельефом морского дна. Вероятность определяется процентным соотношением площади гладких участков, с незначительными возвышенностями и сложными участками с хребтами и ущельями. Вероятность попадания в рыболовные сети определяется вероятностью попадания АНПА в районы активного рыболовства. Вероятности влияния подводной флоры и фауны, попадания АНПА в подводные течения, водовороты и подводные вулканы крайне мала, и может быть принята равной, например, 0,005. Вероятность повреждения антенн, винтов, рулей, корпуса АНПА принимается равной вероятности столкновения с объектом.

Шаг 5. Вероятность проведения своевременной поисковой операции определяется состоянием среды, удаленностью места погружения /всплытия АНПА от баз, положением АНПА (в мусорном острове или среди льда). Вероятность способности АНПА к буксировке до базы определяется состоянием АНПА и состоянием среды при переходе от места всплытия до базы.

На этом алгоритм оценки вероятности возникновения повреждений закончен. На выходе разработанного алгоритма определяется значение вероятности повреждения АНПА, способного, в зависимости от окружения АНПА, привести к ущербу разного размера, который определяет возникновение аварии. Таким образом, для оценки риска возникновения аварии необходимо также получить вероятность возникновения ущерба и оценить его размер.

УЩЕРБ ОТ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ АНПА

Будем исходить из того, что если АНПА по связи не смог своевременно сообщить об аварии, то его начнут искать по тайм-ауту, то есть по прошествии некоторого контрольного времени, означающего, что на АНПА произошла нештатная ситуация. В этом случае ключевую роль в оценке повреждений играет время, прошедшее с момента расхода энергоресурса.

Вероятность повреждения антенн оказывает влияние на вероятность выхода на связь, и если вероятность выхода на связь низкая, то поисково-спасательные операции начнутся позже, чем если бы аварийное сообщение удалось бы передать своевременно. Вероятность своевременного начала операции, то есть когда АНПА на плаву или с активным аварийным маяком-ответчиком, способно обеспечить высокую вероятность успешного проведения поисково-спасательной операции. Промедление в выполнении поисково-спасательной операции способно привести к затоплению и/или потере АНПА, или к взрыву.

При незначительных повреждениях, не приводящих к фатальным последствиям, ущерб оценивается затратами на проведение поисковых операций и на транспортировку АНПА в случае невозможности самостоятельного его движения. Кроме того, в ущерб включаются затраты на ликвидацию повреждений АНПА. Так, повреждение корпуса, рулей винтов приводит к ущербу, выраженному затратами на проведение ремонтных работ АНПА, низкой вероятности буксировки. Размер ущерба в виде затрат на ремонт только АНПА определяется отсутствием в зоне вокруг АНПА кораблей, судов, зданий, инженерных сооружений и т.д. При возникновении взрыва на борту АНПА ущерб оценивается не только затратами на операции, связанные с поиском, обнаружением и транспортировкой АНПА, но и экологическим загрязнением окружающей среды, требующим дополнительных затрат на ее очистку и локализацию для дальнейшего нераспространения. Размер ущерба окружающего имущества вызван нахождением в зоне взрыва АНПА причалов, сооружений, судов, кораблей и т.д., и оценивается затратами на их ремонт. Размер ущерба, связанного с нарушением экологии, вызван взрывом или выделением вредных веществ и определяется затратами на предотвращение выделения вредных веществ в окружающую среду и на устранение последствий их негативного влияния на экологию.

Экономический ущерб от возникновения аварии на АНПА может быть значительным не только в результате потери/затопления АНПА, но и в результате создания ситуации, препятствующей штатной работе других морских объектов. При повреждении АНПА ущерб может достигать значительных размеров, например, в случае катастрофы, влекущей за собой загрязнение окружающей среды, экономические издержки типа блокировки Суэцкого канала контейнеровозом "Ever Given" в 2021.

Размер ущерба, связанного с появлением пострадавших, зависит от нахождения непосредственно рядом с АНПА во время взрыва людей, обслуживающего персонала, разработчиков, заказчиков и определяются затратами на лечение, выплату компенсаций, страховок, предоставления льгот и т.д.

В случае аварийного заглублиния АНПА ущерб оценивается дополнительными затратами на проведение поисковых операций под водой, обнаружению, подъему и транспортировке АНПА к пункту назначения. Ущерб определяется не только затратами, но и ценностью технологий, реализованных в АНПА, закрытостью информации, и т.д.

В связи со сказанным на рис.2 приведены варианты размера ущерба в зависимости от окружения АНПА в момент окончания энергоресурса.

Таким образом, в результате расчета условной вероятности по алгоритму в соответствии с байесовской динамической сетью, представленной в виде графа, определяется вероятность возникновения ущерба определенного размера. Полученные данные позволяют оценить риск возникновения аварии путем подстановки полученных значений вероятности возникновения ущерба определенного размера и затрат, необходимых для устранения ущерба, в выражение (1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Для демонстрации разработанного метода проведены численные эксперименты, направленные на оценку вероятности повреждений, приводящих к возникновению ущерба определенного размера и аварии.

При проведении численного эксперимента рассматривалось положение АНПА в момент окончания энергоресурса в ледовой обстановке. Расчет вероятности повреждения АНПА и возникновения аварии происходил с использованием ветки графа: АНПА φ, λ, t → Всплытие → Лыдины, айсберги → Столкновение → Повреждение антенн → Поисковая операция → Буксировка АНПА к базе → Повреждение → АНПА → Ущерб → Авария.

Для определения вероятности возникновения аварии рассмотрены следующие три варианта аварийного всплытия АНПА.:

Вариант 1. АНПА всплыл в условиях льда с низкой плотностью ледохода и минимальным волнением с передачей аварийного сообщения и ожидания прибытия ПСС. База расположена рядом с местом всплытия АНПА, поэтому ПСС прибыла оперативно, быстро нашла АНПА и смогла его отбуксировать к базе. В ходе буксировки повреждений АНПА не произошло. Соответственно, состояние АНПА не причинило ущерба ни АНПА, ни окружению; требуется лишь подзаряд аккумуляторной батареи.

Вариант 2. АНПА всплыл в районе со средней плотностью ледохода, поэтому с течением времени возможно возникновение повреждений АНПА. Поисково-спасательная служба прибыла оперативно, быстро нашла АНПА и смогла его отбуксировать, однако при движении в условиях средней плотности льда из-за скорости буксира влияние плотности льда усилилось, в результате чего в ходе буксировки возникли незначительные повреждения АНПА. Ущерб определяется затратами на ремонт АНПА.

Вариант 3. АНПА всплыл в условиях густого льда, из-за чего из-за усилившегося волнения связь оказалась неустойчивой, и на передачу аварийного сообщения было затрачено определенное количество времени, сообщение было передано не сразу. В условиях темного времени суток и сильного ветра ПСС прибыли через значительное время. За это время из-за густого льда произошло повреждение АНПА (если бы ПСС прибыли раньше, то повреждений бы не произошло). За время ожидания ПСС АНПА отнесло течением от точки выхода на сеанс связи. Из-за погодных условий поисковая операция затянулась, вероятность обнаружения АНПА снизилась, в результате чего потребовалось длительное время на обнаружение АНПА. База, к которой необходимо отбуксировать АНПА, оказалась на значительном расстоянии от места обнаружения АНПА, и при движении в условиях густого льда из-за скорости буксира влияние густого льда усилилось, что привело к серьезным повреждениям АНПА, заполнению водой внутриотсечного помещения. В результате АНПА получил значительные повреждения и неспособность к восстановлению.

Весь временной процесс спасения АНПА от момента выхода его на связь с базой до прибытия в базу разделим на три периода: от выхода на связь и передачи аварийного сигнала – до прибытия ПСС; от прибытия ПСС до поиска и момента обнаружения АНПА ПСС; от обнаружения АНПА ПСС до буксировки АНПА к базе. Продолжительность

этих периодов не зависит от действий АНПА, но зависит от оперативности работы ПСС, удаленности базы, погодных условий, времени суток и т.д. Таким образом, при оценке вероятности возникновения повреждения АНПА учитывалось время, которое АНПА пришлось находиться на морской поверхности после всплытия.

В ходе численного эксперимента определялась зависимость вероятности повреждения АНПА для различных ледовых условий, и затем – по времени, потребовавшемуся для приведения АНПА к базе – оценивалась вероятность возникновения аварии.

Для определения вероятности повреждения АНПА от столкновения с N льдинами использовалось выражение: $P=1-(1-P_0)^N$, где P_0 – вероятность повреждения АНПА от столкновения с одиночной лыдиной. Для определения количества льдин N , с которыми АНПА столкнется, учитывалось, что N зависит от интенсивности, которая определяется, в свою очередь, количеством льдин, проходящих рядом с АНПА в единицу времени в заданном коридоре ± 10 м по сторонам от АНПА; при этом предполагалось однородное распределение льда по ширине коридора вокруг АНПА.

Результаты численных экспериментов приведены на рис. 4, по горизонтальной оси отложено время в часах, по вертикальной – вероятность повреждения АНПА.

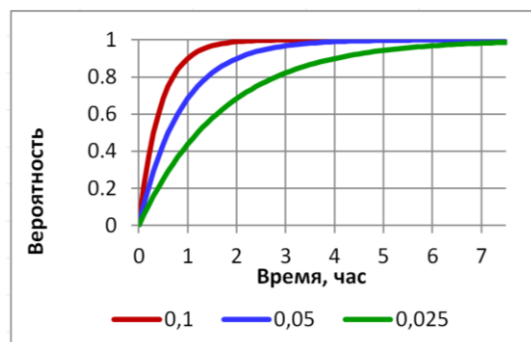


Рис. 4. Зависимость вероятности повреждения АНПА от времени его нахождения на морской поверхности в обесточенном состоянии

На рис. 4 представленные три кривые, соответствующие описанным выше вариантам аварийного всплытия АНПА: нижняя линия зеленого цвета соответствует низкой густоте и интенсивности движения льдин 0,025 м²/час, линия синего цвета – средней густоте и интенсивности движения льдин 0,05 м²/час, верхняя линия – высокой густоте и интенсивности движения 0,1 м²/час.

Анализ результатов, приведенных на рис. 4, показал, что в течение первого получаса вероятность повреждения АНПА незначительна и не превышает 0,2 по вероятности. С увеличением времени нахождения АНПА в условиях ледохода вероятность повреждения возрастает, и уже через 2 часа нахождения АНПА на поверхности воды достигает 0,68 в условиях низкой плотности льда, 0,91 – в условиях средней плотности льда и 0,99 – в условиях высокой плотности льда.

Пусть задано критическое значение вероятности P^* повреждения АНПА, при котором возникает ущерб АНПА, способный привести к аварии. Примем, что при

$P^* = 0,25$, возникает авария. Тогда в результате применения описанного выше алгоритма получаем оценку вероятности P возникновения аварии. Для этого проверяем выполнение условия: $P > P^*$, и если это условие выполнено, то считаем, что существует риск возникновения аварии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрена задача оценки риска возникновения аварии в условиях полного расхода энергоресурса АНПА до окончания выполнения маршрутного задания и варианты поведения АНПА в виде всплытия или заглубления. Описаны возможные сценарии развития событий, связанные с возможностью выхода АНПА на связь для передачи аварийного сообщения, со столкновением АНПА с судами, льдинами, с попаданием в течения, водовороты, мусорные острова и т.п. Для всех ситуаций разработан алгоритм определения вероятности повреждения АНПА. В зависимости от окружения АНПА в момент полного расхода энергоресурса проведена оценка размера ущерба.

Разработан метод оценки риска возникновения аварии, включающий в себя определение вероятности повреждения АНПА, вероятности причинения ущерба определенного размера, оценку размера ущерба и риск возникновения аварии.

На конкретном примере показано применение разработанного метода оценки риска возникновения аварии в различных условиях ледохода и временных задержек прибытия поисково-спасательных средств из-за сложных погодных условий. Результаты исследований подтвердили правильность разработанного метода.

Разработанный метод позволяет заблаговременно сделать вывод о необходимости пересмотра маршрутного задания, выборе более энергосодержащего АНПА или заменить аккумуляторную батарею, дождаться более благоприятных условий и т.д. для того, чтобы снизить риски аварии при отсутствии у АНПА энергии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мартынова Л.А. Решение задачи подводного наблюдения в условиях применения интеллектуальных помех // Информационно-управляющие системы. – 2018. – №1(92). – С. 31-41.
2. Kirkwood W.J. AUV incidents and outcomes // Conference: OCEANS 2009, MTS/IEEE Biloxi – Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. (Biloxi, 26-29 October 2009). – Biloxi, 2009. – DOI: 10.23919/OCEANS.2009.5422322.
3. Thieme Ch.A. A Risk Management Framework for Unmanned Underwater Vehicles Focusing on Human and Organizational Factors / Ch.A. Thieme, I.B. Utne, I. Schjølberg // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. (St. John's, Newfoundland, Canada, 31 May – 5 June 2015). – Newfoundland, 2015. – DOI: 10.1115/OMAE2015-41627.
4. Brito M.P. Risk analysis for Autonomous Underwater Vehicle Operations in Extreme Environments / M.P. Brito, G. Griffiths, P. Challenor // Risk Analysis. – 2010. – vol. 30, is. 12. – P. 1771-1788. – DOI: 10.1111/j.1539-6924.2010.01476.x.
5. Chen X. A Review of Risk Analysis Research for the Operations of Autonomous Underwater Vehicles / X. Chen, N.

Bose, M. Brito, F. Khan, B. Thanyamanta, T.Zou // Reliability Engineering & System Safety. – 2021. – vol. 216. – 108011.

6. Brito M.P. Analysis of causation of loss of communication with marine autonomous systems: A probability tree approach / M.P. Brito, D.A. Smeed, G. Griffiths // Methods in Oceanography. – 2014. – vol. 10. – P. 122-137. – DOI: 10.1016/j.mio.2014.07.003.

7. Alexander Ch. A risk model for autonomous marine systems and operation focusing on human–autonomy collaboration / Ch. Alexander, I. Bouwe // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part O Journal of Risk and Reliability. – 2017. – no. 2017231(4). – P. 446-464. – DOI: 10.1177/1748006X17709377.

8. Brito M. A Bayesian approach for predicting risk of autonomous underwater vehicle loss during their missions / M. Brito, G. Griffiths // Reliability Engineering & System Safety. – February 2016. – vol. 146. – P. 55-67. – DOI: 10.1016/j.res.2015.10.004.

9. Chen X. A copula-based method of risk prediction for autonomous underwater gliders in dynamic environments / X. Chen, N. Bose, M. Brito, F. Khan, T. Zou // Risk Analysis. – January 2024. – vol. 44, – is. 1. – P. 244-263. – DOI: 10.1111/risa.14149.

10. Meng L. Enhanced Safety Control and Self-Rescue System Applied in AUV / L. Meng, Y. Qingyu // Conference: Proc. Int Intelligent Computation Technology and Automation (ICICTA) Conf. (Changsha, China, 11-12 May 2010). – Changsha, 2010. – DOI: 10.1109/ICICTA.2010.745.

11. Фаустова О.Г. Разработка метода интегральной оценки и управления риском возникновения чрезвычайных ситуаций для повышения безопасности морских судов. Дис. канд. техн. наук. – Калининград. – 2016. – 200 с.

12. Мартынова Л.А. Метод выбора архитектуры мультиагентной системы управления автономного необитаемого подводного аппарата / Л.А. Мартынова, Н.К. Киселев, А.А. Мысливый // Информационно-управляющие системы. – 2020. – № 4 (107). – С. 31-41.

13. Мартынова Л.А. Алгоритмы, реализуемые интегрированной системой управления АНПА / Л.А. Мартынова, А.И. Машошин, И.В. Пашкевич, А.И. Соколов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2015. – № 1 (162). – С. 50-58.

14. Yang R. Dynamic Risk Analysis of Operation of the Autonomous Underwater Vehicle / R. Yang, I. B. Utne, Y. Liu N. Paltrinieri // The 30th European Safety and Reliability Conference and the 15th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (Venice, Italy, 1-5 November 2020). – Venice, 2020. – DOI: 10.3850/978-981-14-8593-0_4118-cd.

15. Математическая модель оценки риска столкновения в потоке судов с произвольным направлением движения / Е.П. Бураковский, П.Е. Бураковский, В.А. Дмитровский // Морские интеллектуальные технологии. – 2018. – № 4 (42). – т. 3. – С.11-18.

16. Хвостик Е. Мировой океан попался в сети. – URL: <https://www.kommersant.ru/doc/4149702> (дата обращения 24.05.2023).

17. Jensen F.V. Bayesian Networks and Decision Graphs / F.V. Jensen, T.D. Nielsen. – New York: Springer, 2007. – 447 p.

18. Neil M. Using Bayesian Networks to model Expected and Unexpected Operational Losses / M. Neil, N. Fenton, M.

Taylor // Risk Analysis: An International Journal. – 2005. – vol 25(4). – P. 963-972.

19. Castillo E. Expert Systems and Probabilistic Network Models. / E. Castillo, J.M. Gutiérrez, A.S. Hadi. New York: Springer-Verlag, 1997. – 605 p.

20. Korb K.B. Bayesian Artificial Intelligence / Korb K.B.; Nicholson A.E. – London: CRC Press, 2023. – 492 p.

21. База недельных карт общей сплоченности льда и ежемесячные статистики общей сплоченности льда ААНИИ за 1972-1994 гг. – URL: <http://www.aari.nw.ru> (дата обращения 24.05.2023).

22. Annual 2022 Global Climate Report. – URL: <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202213> (дата обращения 24.05.2023).

23. Генерализованные карты состояния ледяного покрова в арктических и замерзающих морях России и гренландского моря. – URL: <http://www.old.aari.ru/main.php?lg=0&id=17> (дата обращения 24.05.2023).

24. Conditional probability table (CPT). – URL: https://wiki5.ru/wiki/Conditional_probability_table (дата обращения 24.05.2023).

DOI: 10.24892/RIJE/20240403

Method for Assessing the Risk of an AUV Accident when Energy Resources are Completely Consumed

Martynova L.A., Rozengauz M.B.

JSC Concern Central Research Institute Elektropribor

Saint-Petersburg, Russian Federation

martynowa999@bk.ru, rozengauz_mb@mail.ru

Abstract. The problem of assessing the risk of an accident in the conditions of complete consumption of the energy resource of an autonomous uninhabited underwater vehicle before the completion of the route task and options for the behavior of the device in the form of ascent or burial with laying on the ground are considered. Possible scenarios for the development of events related to the possibility of the device getting in touch to transmit an emergency signal, the collision of the device with ships, ice floes, getting into currents, whirlpools, garbage islands, etc. are described. For all situations, an algorithm has been developed to determine the probability of damage to the device. Depending on the environment of the device at the moment of complete consumption of energy resources, an assessment of the amount of damage was carried out. A method has been developed for assessing the risk of an accident, which includes determining the probability of damage to the device, the probability of causing damage of a certain size, assessing the amount of damage and the

risk of an accident. A specific example shows the use of the developed method for assessing the risk of an accident in various conditions of ice drift and temporary delays in the arrival of search and rescue equipment due to difficult weather conditions. The research results confirmed the correctness of the developed method. The results of assessing the risk of an accident at the stage of forming the route assignment of the device using the developed method allow us to conclude that it is necessary to revise the route assignment, select a more energy-containing device or replace the battery, wait for more favorable conditions, etc. in order to reduce the risk of an accident if the device lacks energy.

Keywords: autonomous underwater vehicle, accident, total energy consumption, Bayesian network, conditional probability, damage.

Библиографическое описание статьи

Мартынова Л.А. Метод оценки риска возникновения аварии АНПА при полном израсходовании энергоресурса / Л.А. Мартынова, М.Б. Розенгауз // Машиностроение: сетевой электронный научный журнал. – 2024. – Т.11, №4. – С. 15-22. DOI: 10.24892/RIJE/20240403

Reference to article

Martynova L.A., Rozengauz M.B. Method for assessing the risk of an AUV accident when energy resources are completely consumed, *Russian Internet Journal of Industrial Engineering*, 2024, vol.11, no.4, pp. 15-22. DOI: 10.24892/RIJE/20240403