

# К ВОПРОСУ ОБ АВТОНОМНЫХ И БЕЗЭКИПАЖНЫХ СУДАХ: ВЫЗОВЫ И ПРЕИМУЩЕСТВА ДЛЯ ОТРАСЛИ ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ

DOI: 10.36724/2072-8735-2020-14-11-46-56

**Янчин Иван Андреевич,**  
Санкт-Петербургский государственный морской технический  
университет, Санкт-Петербург, Россия,  
[yanchin@pm.me](mailto:yanchin@pm.me)

**Петров Олег Николаевич,**  
Санкт-Петербургский государственный морской технический  
университет, Санкт-Петербург, Россия,  
[petr\\_oleg@mail.ru](mailto:petr_oleg@mail.ru)

**Manuscript received** 25 June 2020  
**Accepted** 28 September 2020

**Ключевые слова:** автономные суда, морская  
навигация, мореходные качества, система  
управления судном, машинное обучение

Рассматривается вопрос о функциях бортовой системы управления автономным судном. Работа посвящена вопросам автономной морской навигации, то есть задаче поиска оптимального и безопасного маршрута автономного судна в условиях отсутствия экипажа и задаче движения автономного судна по построенному маршруту с сохранением мореходных качеств и контролем отклонения от маршрута. Также в работе рассматриваются вопросы обеспечения взаимодействия автономных судов и автономных судов и судов, управляемых экипажем для принятия совместного решения о безопасном расхождении. Так как ожидается, что автономное судно будет оборудовано значительным количеством датчиков, контролирующих его состояние, в работе рассматривается вопрос удалённого мониторинга и контроля состояния автономного судна во время рейса. Также, в работе рассматривается вопрос обеспечения надёжности бортовой системы управления автономным судном. В качестве решения задачи планирования маршрута судна в работе предлагается подход на основе эволюционных вычислений, позволяющий выполнять многокритериальную оптимизацию нескольких решений одновременно. Для решения задачи обеспечения движения по маршруту и контроля мореходных качеств в работе предлагается использовать технологии машинного обучения, обеспечивающие решение задач в условиях неопределённости и изменчивости окружающей среды. С целью организации взаимодействия автономных судов между собой рассматривается применение алгоритмов распределённого консенсуса, используемых в системах параллельных и распределённых вычислений. Для решения задачи обеспечения надёжности бортовой системы управления автономным судном, предлагается использовать многоагентный подход, позволяющий представить систему как множество элементарных компонентов, взаимодействующих в распределённой вычислительной среде.

## Информация об авторах

**Янчин Иван Андреевич,** аспирант, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия  
**Петров Олег Николаевич,** доцент, к.т.н., доцент, Санкт-Петербургский государственный морской технический университет, Санкт-Петербург, Россия

## Для цитирования:

Янчин И.А., Петров О.Н. К вопросу об автономных и безэкипажных судах: вызовы и преимущества для отрасли информационных технологий и телекоммуникаций // Т-Comm: Телекоммуникации и транспорт. 2020. Том 14. №11. С. 46-56

## For citation:

Yanchin I.A., Petrov O.N. (2020) On autonomous and smart ships: challenges and benefits for compute sciences and telecommunications. T-Comm, vol. 14, no. 11, pp. 46-56. (in Russian)

## Введение

Не вызывает сомнений то, что автономные суда – будущее морской индустрии [40]. Согласно планам Rolls-Royce, первое полностью автономное судно должно отправиться в первый рейс уже в 2035 году [40], что означает, что соответствующие исследования должны проводиться уже сейчас. В то же время, автономный морской транспорт представляет серьезный вызов для отрасли информационных технологий и телекоммуникаций, в области бортовых управляющих систем. В отличие от автономных автомобилей, автономные суда будут действовать в пространствах гораздо большего размера, выполняя рейсы на гораздо большие расстояния. Выделяют три класса судов в контексте автономности: обычные суда, где все решения принимаются экипажем и все операции также выполняются экипажем, «умные» суда, где решения принимаются экипажем, но выполняются автоматически, а также автономные суда, где решения принимаются автоматизированной системой управления, а затем также выполняются автоматически [19]. В общем случае не гарантируется того, что экипаж «умного» судна находится на борту. Такие суда могут управляться из берегового управляющего центра [16, 36]. В то же время, выглядит маловероятным появление полностью удалённо-управляемого «умного» судна, так как в этом случае потребуются обеспечить надёжную связь между береговым центром управления и судном, в том числе в случаях трансокеанских рейсов [36].

Следовательно, ожидается, что «умные» суда будут иметь некоторую степень автономности, то есть возможность действовать автономно в условиях отсутствия связи с береговым центром управления. Кроме того, ожидается, что автономное судно также может управляться из берегового центра управления, то есть, в рамках одного маршрута могут быть этапы, на которых судно действует автономно и этапе, на которых судно действует под контролем берегового центра [38]. Удалённое управление может быть задействовано на наиболее опасных или сложных этапах рейса, например, при движении в условиях порта [36]. Настоящая работа посвящена движению судна в полностью автономном режиме, то есть, случаю автономного судна или «умного» судна, действующего в автономном режиме.

Настоящая работа посвящена тем вызовам для отрасли информационных технологий и телекоммуникаций, которые исходят от вопроса о разработке автономных и «умных» судов. Ожидается, что успех в этих областях окажет существенное влияние на всю отрасль морских перевозок как наиболее важная веха на пути к практическому внедрению автономных судов [38].

В рамках настоящей работы предполагается, что автономное судно контролируется и управляется единой бортовой системой управления. Эта система выполняется на бортовых ЭВМ, объединённых в единую сеть. Работа не описывает устройство этой сети или самой системы управления, но ссылается на них при описании компонентов, которые отвечают на вызовы, исходящие от появления автономных и «умных» судов.

## 2. Задача поиска маршрута автономного судна

Поиск и планирование маршрута автономного судна – важная функция бортовой системы управления. Экипаж использует бортовую систему управления для получения оптимального и безопасного маршрута, который учитывает погодные условия, правовые требования, экономию топлива и другие требования [33]. Если, по какой-то причине, система оказывается неспособна построить маршрут, или маршрут оказывается неприемлемым, экипаж имеет возможность вмешаться в процесс и внести исправления. В случае автономного судна, на борту нет экипажа, который мог бы внести коррективы в маршрут. Поиск маршрута автономного судна представляет более сложную задачу, чем поиск маршрута обычного судна [16].

В настоящей работе под оптимальным и безопасным маршрутом понимается кратчайший маршрут с точки зрения времени, необходимого для прохождения по нему, и который не ставит судно в опасность тем или иным образом. Это определение может быть расширено для учёта иных требований. Например, компонент поиска маршрута может учитывать расход топлива во время рейса, тем самым пытаясь достигнуть компромисса между скоростью движения (и, следовательно, временем, необходимым для прохождения маршрута) и расходом топлива.

В случае автономных судов, возможны два подхода к построению маршрута. В первом случае, маршрут строится бортовой системой навигации судна. Во втором – маршрут строится береговым центром управления, а затем передаётся на борт [43, 6]. Во втором случае маршрут может быть предварительно проверен экспертом [43]. В обоих случаях, входными данными являются расположение пункта назначения и ограничения, накладываемые на маршрут (потребление топлива, время прибытия и т.п.).

Погодные условия оказывают влияние на безопасность судна и его способность следовать по маршруту. Учёт погодных условий не только позволяет избежать отрицательных воздействий на судно [43, 38], но и сокращает экономические издержки, сокращая время рейса и потребление топлива [44, 25]. Таким образом, способность учесть погодные условия становится важным требованием для бортовой системы навигации [33, 41, 27].

Одним из наиболее известных алгоритмов, используемых для поиска пути, является  $A^*$ . Этот алгоритм способен найти кратчайший путь между двумя вершинами графа или сетки. Этот алгоритм может быть модифицирован для учёта специфических для задачи требований, например, погодных условий [33], ледовых полей [1] или с целью уменьшения времени, необходимого для поиска решения [39]. Однако, он очень чувствителен к свойствам выбранной эвристической функции, которая используется для выбора следующего узла графа и отличается высокими затратами памяти в случае пространства поиска большого размера [34]. Потребление памяти может быть уменьшено путём уменьшения числа узлов графа. Это приводит к уменьшению степени свободы алгоритма и делает полученное решение менее оптимальным.

Поиск маршрута судна – сложная задача, требующая внимания ко многим факторам, поэтому опытные навигаторы используют не только технические средства и нормативные документы, но накопленный опыт [38]. Адаптация формализованного алгоритма, вроде  $A^*$ , для учёта этого опыта само по себе является непростой задачей. Поэтому морская отрасль может воспользоваться преимуществами, которые даёт использование алгоритмов и техник, традиционно относимых к сфере искусственного интеллекта и машинного обучения. Эти алгоритмы и техники могут быть разделены на две группы: в первом случае некоторый агент обучается решать задачу на основе своего или внешнего опыта, а во втором случае используется эвристический, нечеткий подход или подход, основанный на использовании принципа конкуренции [5].

Наиболее известными техниками, относящимися к первой группе, являются обучение с подкреплением и его разновидности, глубокое обучение с подкреплением. Обучение с подкреплением использует таблицу  $\pi$ , называемую политикой действия, которая позволяет проанализировать, почему агент выбрал некоторое действие в некоторой ситуации, тем самым делая метод принятия решений объяснимым для оператора. В то же время, эта таблица формируется на этапе подготовки к обучению, и должна содержать все возможные ситуации, которые могут произойти с агентом и все возможные действия, которые он может предпринять, тем самым усложняя этот этап. Глубокое обучение с подкреплением не требует наличия предопределённых состояний, вместо этого используя глубокую нейронную сеть, на вход которой подаётся представление текущей ситуации. Нейронная сеть заменяет таблицу  $\pi$ . Глубокое обучение с подкреплением демонстрирует хорошие результаты при обучении агента игре в Го [42], шахматы [20], или видеоигры [45], позволяя достичь уровня, превышающего уровень профессиональных игроков.

На практике, даже эксперт часто оказывается не в состоянии сформировать корректную функцию награды агента, что приводит к тому, что агент оказывается способен достичь высокой «награды», не решая саму задачу [30]. Кроме того, на данный момент имеется не так много удачных попыток применить обучение с подкреплением к задачам, отличным от игр [30]. Процесс обучения агента или нейронной сети подразумевает перебор всех возможных комбинаций состояний и действия, что само по себе может представлять непростую задачу.

Ещё одной сложностью, связанной с обучением с подкреплением, является необходимость наличия среды, с которой взаимодействует агент в процессе обучения [30]. Как уже было отмечено, агент должен иметь возможность рассмотреть все возможные ситуации и состояния, причем по несколько раз и с некоторой вариативностью ситуаций. Таким образом, использование естественных пространств для обучения агента поиску маршрута судна должно подразумевать рассмотрение, в том числе, ситуаций, которые приводят к столкновению судна с препятствием или иным судном, что означает значительные финансовые затраты.

Альтернативой является использование симулятора, воспроизводящего все естественные процессы с достаточной точностью, чтобы агент смог использовать свой опыт, полученный в процессе симуляции, при действиях в реальных

условиях. Разработка такого симулятора, в свою очередь, представляет сложную задачу.

Таким образом, использование подходов, основанных на обучении, не является подходящим вариантом при построении системы поиска маршрута судна по причине высокой стоимости проведения множества натуральных экспериментов с реальными судами, а также высокой сложности и стоимости разработки точных симуляций естественных процессов.

Система поиска маршрута судна должна быть основана на подходах, способных адаптироваться к изменению окружения и которые способны учитывать сложносоставные критерии успеха, но не требуют предварительного обучения.

Одним из таких подходов являются генетические алгоритмы [28]. Функция приспособления алгоритма может быть представлена как взвешенная сумма значений, представляющих различные свойства маршрута, требуя от генетического алгоритма максимизировать значение этой функции путём формирования оптимального маршрута. Генетические алгоритмы допускают эффективное применение параллельных вычислений, за счёт использования модели островов, тем самым позволяя эффективно использовать распределённые бортовые вычислительные системы [10,23]. Так как в каждый момент времени генетический алгоритм оперирует набором решений, становится возможным получить, в результате, набор Парето-оптимальных решений, и выбрать из них итоговое решение, используя иной метод [49]. Ещё одним преимуществом генетического алгоритма является возможность ограничить время поиска решения, получив при этом набор субоптимальных решений [10].

Как уже было сказано, навигаторы используют свой опыт для оценки качества маршрута. Опыт – субъективное понятие и он не может быть формализован для использования автоматической системой поиска маршрутов. В работе [8] предлагается набор характеристических коэффициентов, которые могут быть использованы для численного выражения свойств маршрута, позволяя, тем самым, выполнять сравнение маршрутов между собой. Функция приспособления генетического алгоритма может быть представлена как взвешенная сумма значений этих коэффициентов. Профессиональные навигаторы могут быть опрошены для получения их представления о том, какими характеристиками обладает оптимальный маршрут, а затем полученные результаты могут быть выражены через набор коэффициентов. Предлагаемый в работе [8] подход к оценке свойств маршрута на основе коэффициентов может быть расширен путём введения дополнительных коэффициентов или за счёт выбора используемого набора коэффициентов для конкретной задачи.

Используемый алгоритм поиска маршрута должен быть надёжным, способным решать задачу в условиях, отличающихся от тех, которые использовались при его разработке, а результат его работы должны быть интерпретируемым. Поэтому такой алгоритм требует серьезного тестирования и верификации [38]. Для формальных алгоритмов, таких как  $A^*$ , имеется строгое доказательство их способности найти решение, но их использование подразумевает строгие требования к пространству поиска и входным данным [18]. В случае эвристических алгоритмов, например, генетического алгоритма, требования к пространству поиска и входным данным могут быть смягчены, но при этом может не быть

доказательства корректности. В этом случае требуется использовать тестирования и верификацию этих алгоритмов, как для стандартных, так и для экстремальных ситуаций. Существует ряд техник, применяемых в таких случаях, схема Балчи является одной из них [11, 12].

### Управление автономным судном

После того, как маршрут получен судно, задачей становится прохождение по этому маршруту. Это означает, что бортовая система управления должна иметь возможность управлять судном при использовании автономного режима. Ожидается, что компонент бортовой системы управления, предназначенный для решения этих задач, будет наиболее сложным компонентом системы. В задачи этого компонента входит обеспечение движения судна по маршруту, контроль мореходных качеств судна и обеспечение безопасности судна в процессе движения.

### Обеспечение движения по маршруту

Обеспечение движения по маршруту – первоочередная задача бортовой системы управления автономного судна во время рейса. Система анализирует движение судна и удостоверяется, что фактический маршрут движения не отличается от предписанного больше, чем допустимо. При обнаружении отклонения, система выдаёт управляющие команды для устранения этого отклонения [3].

Так как ожидается, что предписанный маршрут допускает некоторую свободу при движении (т.е. маршрут не предписывает точное расположение промежуточных точек маршрута), то задачей бортовой системы управления становится планирование конкретных маневров, необходимых для следования по маршруту [36]. Например, если маршрут предписывает судну пройти под мостом, то бортовая система управления должна спланировать манёвр таким образом, чтобы судно прошло под судоводным пролётом моста на безопасном расстоянии от опор, предварительно убедившись, что высота пролёта достаточна. Хотя мосты, шлюзы и другие объекты морской инфраструктуры могут быть обнаружены ещё на этапе планирования маршрута, фактический маршрут движения судна влияет на то, в какой момент судна придёт к указанному объекту инфраструктуры и каково будет фактическое расположение судна относительно этого объекта. По этой причине от бортовой системы управления требуется возможность планировать маршруты и контролировать их выполнение, как следствие, требуя от бортовой системы возможность анализировать текущую навигационную ситуацию и генерировать управляющие воздействия с учётом требуемого манёвра и ситуации.

Ожидается, что бортовая система управления автономным судном может быть основана на технологиях искусственного интеллекта, как позволяющих ей функционировать в условиях неопределённости и адаптировать к изменениям окружения [38, 5].

Бортовая система управления может использовать древовидный подход к классификации навигационных ситуаций [4]. Такой подход подразумевает существование набора классификаторов, организованных в древовидную структуру. Каждый классификатор принимает представление навигационной ситуации, которое включает, но не ограничивает-

ся, изображения камер наблюдения за окружением, данные, полученные с бортовых радарных установок, данные с гироскопов и акселерометров, которые измеряют состояние судна. Корневой классификатор, соответствующий корневому узлу дерева, выполняет начальную классификацию ситуации, определяя, к какому типу она относится: открытое пространство, приближение к мосту, приближение к шлюзам и т.п. Когда определён общий тип ситуации, ее представление передаётся классификатору, расположенному на уровне ниже в дереве. Классификаторы этого уровня специализированы для анализа ситуаций конкретного типа и детектирования подтипов ситуаций. Рисунок 1 иллюстрирует древовидную организацию классификаторов.

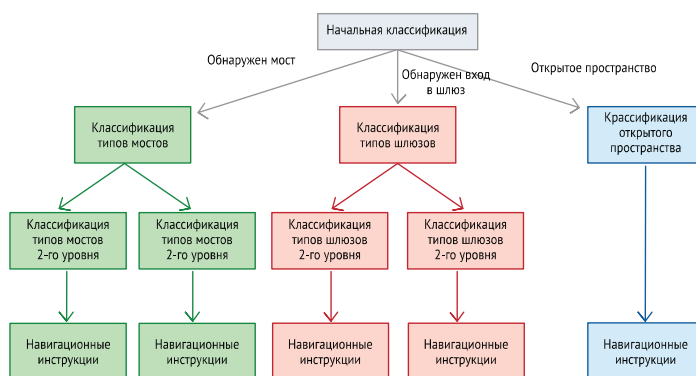


Рис. 1. Древовидная организация классификаторов.

Каждый уровень дерева уточняет выход, полученный от предыдущего, пока не будет получено итоговое решение

Таким образом, каждый слой древовидной классификации уточняет решение предыдущего слоя, тем самым позволяя бортовой системе управления судном учесть все важные характеристики ситуации [4]. Уточнение завершается, когда процесс обхода дерева достигает листа, который содержит инструкции по поведению судна в навигационной ситуации, подвергнутой классификации [4]. Использование древовидной классификации позволяет сохранить каждый отдельный классификатор специализированным для решения конкретной задачи, тем самым делая проще его проектирование, обучение, обеспечение его функционирования, интерпретацию его выхода. Это упрощает добавление новой ситуации, распознаваемой деревом: в этом случае достаточно выполнить переобучение того классификатора, который выполняет классификацию ситуации на требуемом уровне дерева, и добавить к дереву новую ветвь, движение по которой может быть инициализировано переобученным классификатором. Благодаря гибкости древовидного представления, классификаторы могут быть обновлены или заменены независимо от остальных, при условии соблюдения контракта входных и выходных значений.

Классификатор может представлять собой глубокую нейронную сеть, или более простую модель машинного обучения, более подходящую для решаемой конкретным классификатором задачи. Свёрточные нейронные сети демонстрируют хорошие результаты при обработке изображений, видеоряда или иных пространственно-распределённых данных [29].

Если входные данные сети содержат как пространственно-распределённые данные (или изображения), так и данные другого типа, то в этом случае может быть использована сеть, имеющая несколько независимых ветвей (рис. 2). В этом случае одна из ветвей обрабатывает пространственно-распределённые данные, а другие ветви – данные других типов. Ветви объединяют свои выходы, после чего результат объединения также обрабатывается несколькими слоями. Ветвистые нейронные сети демонстрируют хорошие результаты при обработке данных разной природы одной нейронной сетью [47].

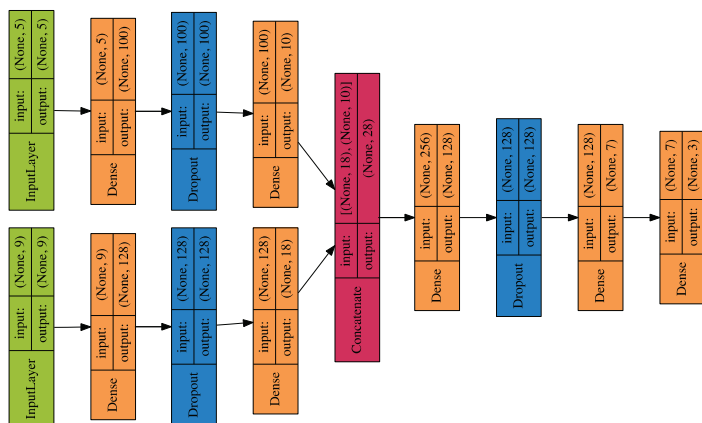


Рис. 2. Нейронная сеть с двумя ветвями

**Обеспечение корректности маршрута во время движения**

Как уже было сказано, отдельные свойства маршрута и его совокупное качество может быть оценено с использованием характеристических коэффициентов. Эти коэффициенты также могут быть использованы для контроля того, что фактический маршрут судна не отличается от предписанного сильнее, чем допускается.

Рассмотрим предписанный маршрут и фактический маршрут, обновляемый в процессе движения судна. Чтобы убедиться, что фактический маршрут не ведёт к аварийной ситуации, следует вычислить его характеристические коэффициенты и сравнить полученные значения с коэффициентами предписанного маршрута [8]. Это позволяет определить, какие свойства маршрута хуже, чем ожидалось. Чтобы определить долгосрочный тренд и понять, может ли фактический маршрут привести к аварийной ситуации в долгосрочной перспективе, следует построить график изменения суммы характеристических коэффициентов с течением времени [8]. В результате, становится возможным определить тренд изменения маршрута. Если тренд положителен или стабилен, то качество фактического маршрута сохраняется или растёт, если тренд отрицателен, то это говорит о том, что качество маршрута снижается [5]. Рисунок 3 демонстрирует пример графика изменения суммы характеристических коэффициентов.

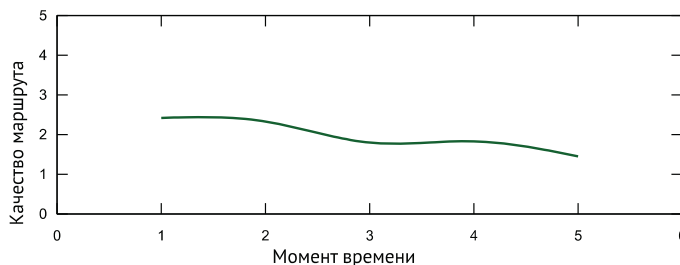


Рис. 3. Совокупное качество маршрута уменьшается с течением времени, что указывает на негативный тренд

Согласно графику на рисунке 3, наблюдается негативный тренд, указывающий на снижение качества маршрута. Когда сумма характеристических коэффициентов маршрута достигнет порогового значения, указывающего на недопустимо низкое качество маршрута, процедура планирования маршрута должна быть выполнена снова.

**Коллективные действия автономных судов**

Ожидается, что в некоторых случаях, бортовая система управления автономным судном при планировании манёвров должна учесть не только показания сенсоров, установленных на самом судне и отражающих его состояние, но и действия окружающих судов. Это необходимо для обеспечения безопасности мореплавания и соответствия действий судна требованиям МППСС и другим правовым нормам, регулирующим совместные действия судом [38, 2]. Рассмотрим две ситуации: в первом случае в некоторой акватории действуют только автономные суда, а во втором – автономные судна действуют совместно с обыкновенными суднами, управляемыми экипажем. В обоих случаях задачей является безопасное расхождение этих судов.

В первом случае, автономные суда могут взаимодействовать между собой с целью получения общего решения [6]. Основной сложностью в данном случае является обеспечение того, чтобы все суда пришли к единому решению, с учётом того, что все суда рассматриваются как равноправные. Для решения этой могут быть использованы алгоритмы распределённого консенсуса, например PAXOS [31] или Raft [21], широко используемые в распределённых вычислительных системах. Эти алгоритмы позволяют узлам распределённой вычислительной системы получить одинаковый результат при решении некоторой задачи, тем самым придя к консенсусу. Эти алгоритмы могут быть использованы автономными судами для получения единой картины действий при расхождении. Оба алгоритма гарантируют, что в результате их применения, все узлы придут к одинаковому состоянию конечного автомата, лежащего в основе алгоритмов. Это означает, что все рассматриваемые суда способны «договориться» о том, какие действия выполнять при безопасном расхождении.

Во втором случае, автономные суда должны взаимодействовать с обыкновенными суднами, находящимися под управлением людей, с целью получения единого решения задачи расхождения [6].

Задача взаимодействия судов может быть решена за счёт установки на борту обыкновенных судов специальных коммуникационных комплексов, обеспечивающих связь с автономными судами (в этом случае, очевидно, требуется стандартизация протоколов связи), которые позволят экипажу обыкновенных судов сообщить бортовой системе управления автономным судном о том, какие действия им запланированы. Получив информацию о планируемых действиях экипажа, автономные суда получают возможность принять собственное решение, принимая во внимание действия обыкновенных судов. Автономные суда по-прежнему могут использовать алгоритмы PAXOS или Raft для принятия решения. Ещё одним решением может быть рассмотрение таких коммуникационных комплексов как полноправных участников процесса получения консенсуса о расхождении. То есть, обыкновенное судно в автоматическом режиме принимает участие в процессе поиска консенсуса наравне с автономными. В этом случае, экипаж обыкновенного судна должен подчиниться коллективному решению.

### **Контроль мореходных качеств судна**

Одной из важнейших задач экипажа во время рейса является контроль мореходных качеств судна. В случае автономного судна, контроль этих качеств также возлагается на бортовую систему управления. Так как на борту нет экипажа, некому предотвратить развитие аварийной ситуации, в результате, задачей бортовой системы управления является прогнозирование и предотвращение возникновения опасных ситуаций, до того, как возникнет риск перехода к неблагоприятным режимам движения [5]. Задача осложняется тем, что суда относятся к классу систем с неполным управлением. То есть в некоторых ситуациях судно может не отвечать на воздействия со стороны органов управления [38], в результате, бортовая система управления автономным судном должна учитывать, что выданные ею предписания могут быть исполнены только частично, или вообще не привести ни к какому результату. Ещё одной проблемой является неопределённость в состоянии судна вследствие того, что информация о состоянии судна, поступающая с бортовых датчиков, детекторов или акселерометров может быть неполной или уже неактуальной [7].

Одним из процессов, влияющих на мореходные качества судна, является волнение. Волнение провоцирует качку, которая, в свою очередь, сказывается на остойчивости судна. Волнение является стохастическим нестационарным процессом, в результате чего прогнозирование его параметров представляет непростую задачу [9]. Хотя параметры волнения могут быть получены с использованием волнового спектра [26], спектры волнения предоставляют лишь усреднённые параметры и для получения точных параметров должны быть адаптированы к конкретной акватории за счёт выбора настроечных коэффициентов [14]. Выбор этих коэффициентов осуществляется в результате анализа продолжительных временных рядов, полученных в результате наблюдения за процессом. Необходимость продолжительных наблюдений приводит к тому, что данные не могут быть собраны во время рейса при прохождении через целевую акваторию. Кроме того, в общем случае, судно может не иметь на борту оборудования, необходимого для сбора параметров волнения, таких как период или длина волны.

Решением является установка на борту акселерометров и гироскопов для измерения параметров качки. Полученные результаты измерений формируют временной ряд, который может быть проанализирован глубокой нейронной сетью, для прогнозирования дальнейшего развития ситуации [48, 17], или с использованием методов обнаружения аномалий с целью выявления характерных шаблонов в параметрах процесса.

Целостность корпуса влияет на остойчивость и плавучесть судна. В случае пробойки, отсеки оказываются затопленными, приводя к возникновению статического крена. Наличие забортной воды внутри корпуса приводит к изменению плавучести судна. Для бортовой системы управления важной задачей является контроль целостности корпуса и затопления отсеков. Эта задача может быть решена с помощью Системы Мониторинга Корпуса (Hull Monitoring System) [24] и детекторов затопления, расположенных в каждом отсеке.

Система Мониторинга Корпуса состоит из ряда сенсоров, расположенных по всему корпусу и измеряющих напряжённость корпусных конструкций и деформирующие воздействия на них со стороны внешней среды [46, 24]. Собранные данные используются для анализа воздействия внешней среды и маневров судна на прочность корпуса. Данные могут быть использованы для выявления мест высокой напряжённости, в которых может произойти нарушение целостности корпуса вследствие неблагоприятных режимов движения, например слеминга, и обнаружения уже имеющихся повреждений. Датчики затопления позволяют определить, затоплен ли некоторый отсек и если да, то в какой мере. Бортовая система управления автономным судном использует данные, полученные от Системы Мониторинга Корпуса и датчики затопления для контроля целостности корпуса. При обнаружении затопления, система использует диаграммы статической остойчивости, для принятия соответствующего ситуационного решения и минимизации негативных последствий.

Техники машинного обучения способны действовать в условиях отсутствия некоторых входных значений [17] (например, в результате кратковременного сбоя датчика) и адаптироваться к изменениям, произошедшим в закономерностях в данных с момента обучения [32]. Как следствие, ожидается, что машинное обучение и глубокое обучение станут основой системы анализа состояния судна, необходимой для контроля его мореходных качеств. Чтобы иметь возможность анализировать состояние судна, бортовая система управления должна иметь доступ к данным, собранным установленными на борту датчиками статических и динамических параметров движения судна, таких как углы крена, ускорение качки и её амплитуды. На основе этих данных может быть сформирована цифровая модель судна. С использованием этой модели, становится возможным не только анализировать текущее состояние модели, но и прогнозировать развитие текущей ситуации в зависимости от принятых решений [37].

### **Удалённый мониторинг автономного судна**

Данные, собранные датчиками, расположенными на борту судна и используемыми для обеспечения его мореходных качеств, также могут быть переданы на береговой центр

управления для выполнения удалённого мониторинга состояния судна [2, 36, 19]. По причине распределённой природы этих датчиков, судно можно рассматривать как много-агентную IoT-систему, в которой каждый элемент судового оборудования представляет собой независимый агент [38]. Ожидается, что количество таких IoT-агентов будет приводить к формированию больших наборов данных [38]. Если судовладелец имеет флот автономных судов, объемы данных вырастают на порядок. В то же время, судовладелец может извлечь ряд преимуществ из этих данных, за счет получения общей статистики, чья точность увеличивается при росте объема данных. Это означает, что в распоряжении судовладельца должен иметься отдел, специализирующийся на анализе данных, для обеспечения успешных сбора, обработки и анализа данных, с использованием техник больших данных и машинного обучения. Ожидается, что вся морская отрасль получит развитие вследствие появления таким наборов данных и соответствующего программного обеспечения [13].

Анализ собранных наборов данных, позволит судовладельцам прогнозировать необходимость обслуживания [36, 16]. За счёт анализа поведения бортового оборудования, судовладелец может обнаружить, что какое-либо устройство близко к выходу из строя. Это позволит более эффективно планировать обслуживание [38,36]. Система мониторинга состояния бортового оборудования может быть установлена и на обычном судне, позволяя экипажу получать информацию о состоянии судна в реальном времени и рекомендации экспертной системы о том, как действовать, чтобы продлить его срок службы.

### Надежность бортовой системы управления

Основной причиной инцидентов на во время рейса или стоянки в порту являются действия экипажа [19]. В случае автономного судна, действующего в условиях отсутствия экипажа, основной причиной инцидентов, как ожидается, станут технические и технологические факторы. Бортовая система управления автономным судном становится единой точкой отказа [2], неисправность которой может привести к невозможности судна продолжать рейс. Так как на борту нет экипажа, некому выполнить восстановительные работы. Бортовая система управления должна иметь возможность выявлять собственные неисправности и полностью восстанавливаться после сбоя или перенаправлять вычислительную нагрузку с целью сохранить возможность судна действовать с использованием оставшегося оборудования.

Для обеспечения надежности, бортовая система управления должна быть разработана с применением распределённых подходов, при использовании которых система состоит из ряда сетевых узлов, объединённых в единую сеть для решения общей задачи. Если один из узлов выходит из строя, другие принимают на себя его нагрузку. Возможным инструментом для достижения распределённого подхода являются многоагентные вычисления, также известные как акторный подход. Существуют различные реализации этого подхода для разных языков программирования и программных сред [15, 22, 35].

При использовании акторного подхода, вся программная система представляется как множество независимых компо-

нентов, называемых акторами. Акторы взаимодействуют между собой за счёт обмена сообщениями. Как следствие, разные акторы могут быть физически расположены в памяти разных сетевых узлов [15], делая программную систему распределённой.

Распределённая природа программной системы, разработанной с использованием акторного подхода, делает её более надёжными, повышая способность восстанавливаться после сбоев. В случае отказа одного из сетевых узлов, программная система обнаруживает это и перераспределяет те акторы, которые располагались на отказавшем узле по оставшимся узлам и перенаправляет к ним сообщения, отправленные ранее на сбойный узел [15].

Так как возможность функционировать, несмотря на выход отдельных компонентов из строя, является важным требованием к системе управления автономным судном, то использование акторного подхода может стать эффективным решением этой задачи.

В то же время, акторный подход не может справиться со сбоями оборудования, существующего в единственном экземпляре. Поэтому сенсоры, на показания которых опирается бортовая система управления, должны быть дублированы.

Несмотря на возможность распределённых программных систем восстанавливаться после сбоев, по-прежнему возможен выход из строя бортовой системы управления автономным судном в целом или бортового оборудования, существующего в единственном экземпляре из-за нерациональности дублирования (например, пропульсивного комплекса). Ожидается, что в случае такого сбоя, судно должно перейти в некий «безопасный режим», который позволяет сохранить некоторую способность судна к функционированию и дожидаться помощи от береговых служб [36].

### Выводы

Прежде чем первое автономное судно отправится в первый рейс, по-прежнему предстоит много работы. Это означает, что уже сейчас требуются исследования вопросов, связанных с автономными судами, в области судостроения, правового обеспечения деятельности их деятельность, портовых операций, информационных технологий, телекоммуникаций и других. Настоящая работа посвящена обсуждению вопросов, связанных с информационными технологиями и телекоммуникациями в контексте автономной морской навигации и движения автономных судов. Ожидается, что автономные суда будут иметь специальную бортовую систему управления, ответственную за планирование маршрута, обеспечение автономной навигации и контроля его состояния.

Предполагается, что компонент планирования маршрута не будет реализован с использованием технологий, основанных на использовании предыдущего опыта, так как обучение системы в этом случае требует множества экспериментов в реальных условиях, которые могут привести к аварии; либо требует сложных систем симуляции окружающей среды, которые точно моделируют физические процессы, так как в противном случае знания агента об окружающей среде и механизмах взаимодействия с нею могут оказаться неверны.

Ожидается, что компонент управления судном во время рейса, будет реализован с использованием интеллектуаль-

ных технологий, анализирующих состояние судна и окружающей среды, принимающих решения о том, какие действия предпринять, чтобы сохранить судно на маршруте и сохранить его мореходные качества.

Необходимость бортовой системы контролировать автономное судно и отслеживать его состояние означает, что такие суда будут оборудованы множеством сенсоров, датчиков и детекторов, способных измерять различные статические и динамические характеристики судна и окружающей среды. Это позволяет осуществлять удалённый мониторинг судна, накапливать наборы данных и выполнять их анализ для принятия дальнейших решений, а также осуществлять предиктивное обслуживание судна, прогнозируя выход из строя бортового оборудования.

Для обеспечения надёжности бортовой системы управления автономным судном, он может быть реализован с использованием акторного подхода, обеспечивая естественную поддержку параллельных и распределённых вычислений.

Большая часть технологий, описанных в настоящей работе, и требуемых для обеспечения функционирования бортовой системы управления автономным судном, уже существуют. Но эти технологии должны быть адаптированы к требованиям морской отрасли.

### Литература

1. *Войткунская А.Я., Звягин П.Н.* Маршрутизация судна в дрейфующем льду // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2018. Т. 2 (40) Т. 1. С. 166-172.
2. *Дмитриев В.И., Каретников В.В.* Методы обеспечения безопасности мореплавания при внедрении беспилотных технологий // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. С. 1149-1158.
3. *Каретников В.В., Пащенко И.В., Соколов А.И.* Перспективы внедрения безэкипажного судоходства на внутренних водных путях Российской Федерации // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2017. С. 619-627.
4. *Нечаев Ю., Петров О.* Интеллектуальная технология контроля динамической непотопляемости беспилотного судна // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2020. Т. 3, № 1. С. 133-138.
5. *Нечаев Ю.И.* Теория катастроф: современный подход при принятии решений: монография. Арт-Экспресс, 2011. С. 392.
6. *Пинский А.С.* Е-Навигация и безэкипажное судоходство // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, практике, экономике. 2016. С. 50-54.
7. *Суслов А., Одегова О., Сунь Тяньши.* О подходах к созданию системы автоматизированного мониторинга устойчивости судна // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2020. Т. 3, № 1. С. 72-74.
8. *Янчин И.А.* Анализ навигационной аварии с использованием аппарата современной теории катастроф // Морские Интеллектуальные Технологии. Труды Санкт-Петербургского государственного морского технического университета. 2020. Т. 3, № 1. С. 139-144.
9. *A. Castro et al.* Performance of artificial neural networks in nearshore wave power prediction // Applied Soft Computing. 2014. Vol. 23. P. 194-201.
10. *Hassani A., Treijs J.* An overview of standard and parallel genetic algorithms // IDT workshop on interesting results in computer science and engineering. 2009. P. 1-7.
11. *Balci O.* Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study // Annals of Operations Research. 1994. Vol. 53, № 1. P. 121-173.
12. *Balci O.* Verification, Validation, and Accreditation // Proceedings of the 30th Conference on Winter Simulation. 1998. P. 41-48.
13. *Benson C., Sumanth P., Colling A.P.* A Quantitative Analysis of Possible Futures of Autonomous Transport // INEC 2018 Conference. 2018. P. 1-12.
14. *Bergdahl L.* Comparison of measured shallow-water wave spectra with theoretical spectra // Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, Sweden, 2009. 2009. P. 100-105.
15. *Bernstein P. et al.* Orleans: Distributed Virtual Actors for Programmability and Scalability. 2014. P. 1-13.
16. *Blanke M., Henriques M., Bang J.* A pre-analysis on autonomous ships // Technical University of Denmark. 2016. P. 1-27.
17. *Che Z. et al.* Recurrent Neural Networks for Multivariate Time Series with Missing Values // Scientific Reports. 2018. Vol. 8, № 1. P. 6085.
18. *Cormen T.H. et al.* Introduction to Algorithms. MIT Press and McGraw-Hill, 2009. P. 1-14.
19. *Cross J. F., Meadow G.* Autonomous Ships 101 // Journal of Ocean Technology. 2017. Vol. Vol 12. P. 23-27.
20. *David Silver et al.* Mastering Chess and Shogi by Self-Play with a General Reinforcement Learning Algorithm // CoRR. 2017. Vol. abs/1712.01815. P. 1-19.
21. *Diego Ongaro, John Ousterhout.* In Search of an Understandable Consensus Algorithm // 2014 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 14). 2014. P. 305-319.
22. *Dominik Charousset et al.* Native Actors – A Scalable Software Platform for Distributed, Heterogeneous Environments // Proc. of the 4rd ACM SIGPLAN Conference on Systems, Programming, and Applications (SPLASH '13), Workshop AGERE!. 2013. P. 87-96.
23. *E. Cantú-Paz.* A survey of parallel genetic algorithms // Calculateurs paralleles, reseaux et systems repartis. 1998. № 10. P. 1-30.
24. *Global Maritime Engineering.* Hull Stress Monitoring System Electric Sensors' Solution. Measure stresses, torsions, caused by Waves, Cargo Operations and Motions. [Электронный ресурс] / Global Maritime Engineering. Режим доступа: [http://gmeng.com/sub/gme\\\_hsmes\\\_catalog.pdf](http://gmeng.com/sub/gme\_hsmes\_catalog.pdf), свободный. Дата обращения: 21.06.2020.
25. *Grifoll M., Martínez de Osés F.X., Castells M.* Potential economic benefits of using a weather ship routing system at Short Sea Shipping // WMU Journal of Maritime Affairs. 2018. Vol. 17, № 2. P. 195-211.
26. *Hasselmann K. et al.* Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP) // Deut. Hydrogr. Z. 1973. Vol. 8. P. 1-95.
27. *Hinnenthal Jörn, Harries Stefan.* A Systematic Study on Posing and Solving the Problem of Pareto Optimal Ship Routing // 3rd International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries. 2004. P. 27-36.
28. *Holland J.H.* Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, 1975. P. 183.
29. *Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville.* Deep Learning. MIT Press, 2016. P. 775.
30. *Irpan A.* Deep Reinforcement Learning Doesn't Work Yet [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.alexirpan.com/2018/02/14/rl-hard.html>, свободный. Дата обращения: 21.06.2020.
31. *Lamport L.* Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System // Commun. ACM. Association for Computing Machinery, 1978. Vol. 21, № 7. P. 558-565.
32. *LeCun Y., Bengio Y., Hinton G.* Deep learning // Nature. Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited. All Rights Reserved. SN, 2015. Vol. 521. P. 436 EP.



33. *Manel Grifoll et al.* Ship weather routing using pathfinding algorithms: the case of Barcelona – Palma de Mallorca // XIII Congreso de Ingeniería del Transporte. 2018. P. 1-11.
34. *Masoud Nosrati, Ronak Karimi, Hojat Allah Hasanvand.* Investigation of the \* (Star) Search Algorithms: Characteristics, Methods and Approaches // World Applied Programming. 2012. Vol. 2, № 4. P. 251-256.
35. *McKee H., White O.* Akka A to Z. An Architect's Guide To Designing, Building, And Running Reactive Systems. Lightbend, Inc., 2018. P. 35.
36. MUNIN Project. Research in maritime autonomous systems project results and technology potentials. 2016. P. 1-12.
37. *Nikitakos N.* Fourth Industrial Revolution in Maritime Sector // University of the Aegean. 2019. P. 1-89.
38. *Perera L.* Deep Learning towards Autonomous Ship Navigation and Possible COLREGs Failures // Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering. 2019.
39. *Leigh R., Louis S.J., Miles C.* Using a Genetic Algorithm to Explore A\*-like Pathfinding Algorithms // 2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games. 2007. P. 72-79.
40. Rolls-Royce Ship Intelligence. Autonomous ships. The next step // Rolls-Royce Marine. 2016. P. 1-8.
41. *Shao W., Zhou P., Thong S.K.* Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing // Journal of Marine Science and Technology. 2012. Vol. 17, № 2. P. 239-251.
42. *Silver D.* et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search // Nature. 2016. Vol. 529, № 7587. P. 484-489.
43. *Simonsen M. H.* et al. State-of-the-Art Within Ship Weather Routing // ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. 2015. P. 11.
44. *Takashima K., Mezaoui B., Shoji R.* On the Fuel Saving Operation for Coastal Merchant Ships using Weather Routing // TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation. 2009. Vol. 3. P. 401-406.
45. *Vinyals O.* et al. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning // Nature. 2019. Vol. 575, № 7782. P. 350-354.
46. *Wärtsilä.* Stress monitoring system, hull stress surveillance system [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/stress-monitoring-system-hull-stress-surveillance-system>, свободный. Дата обращения: 21.06.2020.
47. *Wang L., Li Y., Lazebnik S.* Learning Two-Branch Neural Networks for Image-Text Matching Tasks // CoRR. 2017. Vol. abs/1704.03470. P. 1-17.
48. *Yang H., Pan Z., Tao Q.* Robust and Adaptive Online Time Series Prediction with Long Short-Term Memory // Computational Intelligence and Neuroscience. 2017. Vol. 2017. P. 1-9.
49. *Abdullah Konak, David W. Coit, Alice E. Smith.* Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial // Reliability Engineering & System Safety. 2006. Vol. 91, № 9. P. 992-1007.

## ON AUTONOMOUS AND SMART SHIPS: CHALLENGES AND BENEFITS FOR COMPUTE SCIENCES AND TELECOMMUNICATIONS

**Ivan A. Yanchin**, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia, [yanchin@pm.me](mailto:yanchin@pm.me)  
**Oleg N. Petrov**, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia, [petr\\_oleg@mail.ru](mailto:petr_oleg@mail.ru)

### Abstract

The paper is dedicated to the overview of the autonomous ship onboard control system functionality. The paper is dedicated to autonomous maritime navigation, i.e. to planning a safe and optimal route for an autonomous ship amid the absence of crew on board and to handling an autonomous ship when underway, ensuring seaworthiness and route correctness. Moreover, the paper describes communications of several autonomous ships and autonomous and ordinary ships to infer a collective decision on how to pass safely through a particular area. Since it is expected that autonomous ships are going to be equipped with dozens of sensors and detectors, the paper describes remote monitoring of an autonomous ship when underway. Since an autonomous ship highly depends on its onboard control system, the paper also pays attention to the robustness of the system. The paper suggests evolutionary computations as a solution for the route planning problem because this approach enables to perform multicriteria optimization of a set of solutions simultaneously. For autonomous ship handling and seaworthiness control, the paper suggests machine learning techniques because these techniques can solve problems in case of uncertainty and the environmental mutability. For inter-ship communications, the paper suggests distributed consensus algorithms, widely used in parallel and distributed computation systems. To ensure the onboard control system robustness, the paper suggests the actor approach that represents that the entire software system consists of a set of elementary agents communicating in the distributed computational environment.

**Keywords:** *autonomous ships, maritime navigation, seaworthiness, ship control systems, machine learning.*

## References

1. Vojtkunskaya A. YA. & Zvyagin P. N. (2018), Marshrutizaciya sudna v drefuyushchem l'du, 'Morskie Intellektual'nye Tekhnologii. Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta', Vol. 2 (40) T. 1, pp. 166-172.
2. Dmitriev V. I. & Karetnikov V. V. (2017), 'Metody obespecheniya bezopasnosti moreplavaniya pri vnedrenii bespilotnyh tekhnologij', Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, pp. 1149-1158.
3. Karetnikov V. V., Pashchenko I. V. & Sokolov A. I. (2017), 'Perspektivy vnedreniya bezekipazhnogo sudohodstva na vnutrennih vodnyh putyakh Rossijskoj Federacii', Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala S.O. Makarova, pp. 619-627.
4. Nechaev Yu. I. (2011), Teoriya katastrof: sovremennyy podhod pri prinyatii reshenij. Sankt-Peterburg: Art-Ekspress.
5. Nechaev Yu. I. & Petrov O. N. (2020), 'Intellektual'naya tekhnologiya kontrolya dinamicheskoy nepotoplyaemosti bespilotnogo sudna', Morskie Intellektual'nye Tekhnologii. Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta. 3(1), pp. 133-138.
6. Pinskij A. S. (2016), 'E-Navigaciya i bezekipazhnoe sudovozhdenie', Transport Rossijskoj Federacii. Zhurnal O Nauke, Praktike, Ekonomike, pp. 50-54.
7. Suslov A. N., Odegova O. V. & Sun' Tyan'shi. (2020), 'O podhodah k sozdaniyu sistemy avtomatizirovannogo monitoringa ostoichivosti sudna', Morskie Intellektual'nye Tekhnologii. Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta, 3(1), pp. 72-74.
8. Yanchin I. A. (2020), 'Analiz navigacionnoj avarii s ispol'zovaniem apparata sovremennoj teorii katastrof', Morskie Intellektual'nye Tekhnologii. Trudy Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo morskogo tekhnicheskogo universiteta. 3(1), pp. 139-144.
9. A. Castro et al. Performance of artificial neural networks in nearshore wave power prediction. *Applied Soft Computing*. 2014. Vol. 23. P. 194-201.
10. Hassani A. & Treijs J. (2009), 'An overview of standard and parallel genetic algorithms', *IDT workshop on inter-esting results in computer science and engineering*, pp. 1-7.
11. Balci O. (1994), 'Validation, verification, and testing techniques throughout the life cycle of a simulation study', *Annals of Operations Research* 53(1), 121-173. URL: <https://doi.org/10.1007/BF02136828>
12. Balci O. (1998), Verification, validation, and accreditation, in 'Proceedings of the 30th Conference on Winter Simulation', WSC '98, IEEE Computer Society Press, Los Alamitos, CA, USA, pp. 41-48. URL: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=293172.293183>
13. Benson C., Sumanth P. & Colling A. P. (2018), A quantitative analysis of possible futures of autonomous transport. *INEC 2018 Conference*, pp. 1-12.
14. Bergdahl L. (2009), 'Comparison of measured shallow-water wave spectra with theoretical spectra', *Proceedings of the 8th European Wave and Tidal Energy Conference*, Uppsala, Sweden, 2009, pp. 100-105.
15. Bernstein P., Bykov S., Geller A., Kliot G. & Thelin J. (2014), 'Orleans: Distributed virtual actors for programmability and scalability', pp. 1-13.
16. Blanke M., Henriques M. & Bang J. (2016), 'A pre-analysis on autonomous ships', Technical University of Denmark pp. 1-27.
17. Che Z., Purushotham S., Cho K., Sontag D. & Liu Y. (2018), 'Recurrent neural networks for multivariate time series with missing values', *Scientific Reports* 8(1), pp. 1-14. URL: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24271-9>
18. Cormen T.H., Leiserson C.E., Rivest R.L. & Stein C. (2009), Introduction to Algorithms, MIT Press and McGraw-Hill.
19. Cross J.F. & Meadow G. (2017), 'Autonomous ships 101', *Journal of Ocean Technology*. Vol 12, pp. 23-27.
20. Silver D., Hubert T., Schrittwieser J., Antonoglou, I., Lai, M., Guez A., Lanctot M., Sifre L., Kumaran D., Graepel T., Lillicrap T. P., Simonyan K. & Hassabis D. (2017), 'Mastering chess and shogi by self-play with a general reinforcement learning algorithm', CoRR abs/1712.01815, 1-19. URL: <http://arxiv.org/abs/1712.01815>
21. Ongaro D. & Ousterhout J. (2014), In search of an understandable consensus algorithm, in '2014 USENIX Annual Technical Conference (USENIX ATC 14)', USENIX Association, Philadelphia, PA, pp. 305-319. URL: <https://www.usenix.org/conference/atc14/technical-sessions/presentation/ongaro>
22. Dominik Charousset et al. Native Actors - A Scalable Software Platform for Distributed, Heterogeneous Environments. *Proc. of the 4rd ACM SIGPLAN Conference on Systems, Programming, and Applications (SPLASH '13), Workshop AGERE!* 2013. P. 87-96.
23. E. Cantu-Paz. A survey of parallel genetic algorithms. *Calculateurs paralleles, reseaux et systems repartis*. 1998. No. 10. P. 1-30.
24. Global Maritime Engineering. (n.d.), 'Hull Stress Monitoring System Electric Sensors' Solution. Measure stresses, torsions, caused by Waves, Cargo Operations and Motions.' URL: [http://gmeng.com/sub/gme\\_hsmses\\_catalog.pdf](http://gmeng.com/sub/gme_hsmses_catalog.pdf).
25. Grifoll M., Martinez de Osis F. X. & Castells M. (2018), 'Potential economic benefits of using a weather ship routing system at short sea shipping', *WMU Journal of Maritime Affairs* 17(2), pp. 195-211. URL: <https://doi.org/10.1007/s13437-018-0143-6>
26. Hasselmann K., Barnett T., Bouws E., Carlson H., Cartwright D., Enke K., Ewing J., Gienapp H., Hasselmann D., Kruseman P., Meerburg A., Muller P., Olbers, D., Richter, K., Sell, W. & Walden, H. (1973), 'Measurements of wind-wave growth and swell decay during the joint north sea wave project (jonswap)', *Deut. Hydrogr. Z.* 8, pp. 1-95.
27. Hinnenthal Jörn, Harries Stefan. A Systematic Study on Posing and Solving the Problem of Pareto Optimal Ship Routing. *3rd International Conference on Computer and IT Applications in the Maritime Industries*. 2004. P. 27-36.
28. Holland J.H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. University of Michigan Press, 1975. P. 183.
29. Ian Goodfellow, Yoshua Bengio, Aaron Courville. *Deep Learning*. MIT Press, 2016. P. 775.
30. Irpan A. Deep Reinforcement Learning Doesn't Work Yet. <https://www.alexirpan.com/2018/02/14/rl-hard.html>, 21.06.2020.
31. Lamport L. Time, Clocks, and the Ordering of Events in a Distributed System. *Commun. ACM. Association for Computing Machinery*, 1978. Vol. 21, no. 7. P. 558-565.
32. LeCun Y., Bengio Y., Hinton G. Deep learning. *Nature*. Nature Publishing Group, a division of Macmillan Publishers Limited. All Rights Reserved. SN, 2015. Vol. 521. P. 436 EP.

33. Manel Grifoll et al. Ship weather routing using pathfinding algorithms: the case of Barcelona - Palma de Mallorca. *XIII Congreso de Ingenieria del Transporte*. 2018. P. 1-11.
34. Masoud Nosrati, Ronak Karimi, Hojat Allah Hasanvand. In-vestigation of the \* (Star) Search Algorithms: Characteristics, Methods and Approaches. *World Applied Programming*. 2012. Vol. 2, no. 4. P. 251-256.
35. McKee H., White O. Akka A to Z. An Architect's Guide To Designing, Building, And Running Reactive Systems. Lightbend, Inc., 2018. P. 35.
36. MUNIN Project. Research in maritime autonomous systems project results and technology potentials. 2016. P. 1-12.
37. Nikitakos N. Fourth Industrial Revolution in Maritime Sector. University of the Aegean. 2019. P. 1-89.
38. Perera L. Deep Learning towards Autonomous Ship Navigation and Possible COLREGs Failures. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2019.
39. Leigh R., Louis S.J., Miles C. Using a Genetic Algorithm to Explore A\*-like Pathfinding Algorithms. *2007 IEEE Symposium on Computational Intelligence and Games*. 2007. P. 72-79.
40. Rolls-Royce Ship Intelligence. Autonomous ships. The next step. *Rolls-Royce Marine*. 2016. P. 1-8.
41. Shao W., Zhou P., Thong S.K. Development of a novel forward dynamic programming method for weather routing. *Journal of Marine Science and Technology*. 2012. Vol. 17, no. 2. P. 239-251.
42. Silver D. et al. Mastering the game of Go with deep neural networks and tree search. *Nature*. 2016. Vol. 529, № 7587. P. 484-489.
43. Simonsen M. H. et al. State-of-the-Art Within Ship Weather Routing. *ASME 2015 34th International Conference on Ocean, Off-shore and Arctic Engineering*. 2015. P. 11.
44. Takashima K., Mezaoui B., Shoji R. On the Fuel Saving Operation for Coastal Merchant Ships using Weather Routing. *TransNav: International Journal on Marine Navigation and Safety of Sea Transportation*. 2009. Vol. 3. P. 401-406.
45. Vinyals O. et al. Grandmaster level in StarCraft II using multi-agent reinforcement learning. *Nature*. 2019. Vol. 575, No. 7782. P. 350-354.
46. Wartsila. Stress monitoring system, hull stress surveillance system . <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/stress-monitoring-system-hull-stress-surveillance-system>: 21.06.2020.
47. Wang L., Li Y., Lazebnik S. Learning Two-Branch Neural Networks for Image-Text Matching Tasks. *CoRR*. 2017. Vol. abs/1704.03470. P. 1-17.
48. Yang H., Pan Z., Tao Q. Robust and Adaptive Online Time Series Prediction with Long Short-Term Memory. *Computational Intelligence and Neuroscience*. 2017. Vol. 2017. P. 1-9.
49. Abdullah Konak, David W. Coit, Alice E. Smith. Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial. *Reliability Engineering & System Safety*. 2006. Vol. 91, № 9. P. 992-1007.

#### Information about authors:

**Ivan A. Yanchin**, Postgraduate student, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia

**Oleg N. Petrov**, Associate professor, PhD, associate professor, Saint-Petersburg State Marine Technical University, St. Petersburg, Russia