

## ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТЫ ЛЕДОКОЛЬНОГО ФЛОТА В ИМИТАЦИОННЫХ МОДЕЛЯХ МОРСКИХ АРКТИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ

А.Г. Топаж, С.В. Егоров, А.С. Буянов, А.А. Карпенко (Санкт-Петербург),  
А.А. Малыханов (Ульяновск)

### Введение

Освоение арктических территорий России в ближайшем будущем должно сыграть важнейшую роль в наращивании экономического потенциала государства. Ключевым звеном в решении поставленных для достижения этой цели амбициозных задач выступает Арктическая транспортная система, основными элементами которой являются:

- северный морской путь (СМП), представляющий собой исторически сложившуюся единую внутреннюю транспортную коммуникацию. Более того, в последнее время настойчиво продвигается концепция использования СМП как участка транснациональной транспортной морской артерии евро-азиатского транзита контейнерных грузов и перспективной альтернативы традиционного маршрута, проходящего через Суэцкий канал (<http://morvesti.ru/news/1679/89268/>);
- комплекс транспортных средств морского и речного флота;
- ледоколы, обеспечивающие эффективное и безопасное судоходство по СМП;
- береговая инфраструктура, в которую входят порты, различные средства навигационно-гидрографического и гидрометеорологического обеспечения, средства связи, сопровождающие транспортную деятельность в арктической зоне вместе с системой меридионально ориентированных транспортных путей.

Стоимость возможных ошибок и экономический ущерб от принятия неоптимальных решений на стадии проектирования и стратегического планирования перспективных арктических транспортных систем могут достигать критических величин, сопоставимых с существенными долями национального ВВП. Это объясняется исключительно высоким уровнем капитальных и эксплуатационных затрат любых проектов, реализуемых в труднодостижимых районах Крайнего Севера. Поэтому первостепенное значение приобретают подходы, позволяющие проанализировать последствия любых стратегических решений при помощи детальной компьютерной симуляции, то есть с помощью специально созданных качественных и адекватных имитационных моделей морских арктических транспортных систем.

Существующие в России и за рубежом наработки в области создания подобных моделей могут служить весомой основой для создания принципиально нового инструментария стратегического планирования и проектной организации судоходства в Арктическом регионе (Тимофеев и др., 2019). Этот инструмент должен представлять собой достаточно детализированную динамическую модель, описывающую как непосредственно процесс грузоперевозок, так и все сопряженные транспортно-технологические процессы обеспечения (ледокольное сопровождение, грузовые операции в портах, формирование грузопотоков, динамика внешней среды). На базе многофакторных оптимизационных вычислительных экспериментов с построенной моделью можно будет принимать обоснованные решения о наиболее эффективных стратегиях развития Северного Морского Транспортного Коридора (СМТК) и всей инфраструктуры арктического мореплавания. В частности, конечной целью подобной исследовательской работы должно стать научное обеспечение перспективной стратегии развития атомного ледокольного флота России на период до 2050 года в части количества и типов ледоколов, а также принципов их рационального использования для обеспечения транспортного судоходства.

Принципиальным логическим компонентом подобной модели должен являться модуль, описывающий функционирование системы управления работы ледокольного флота. С точки зрения агентной и дискретно-событийной парадигм имитационного моделирования ледоколы можно рассматривать как ресурсы, с помощью которых осуществляется продвижение заявок (рейсов транспортных судов) по процессной диаграмме. Однако ледокольное сопровождение имеет ряд принципиальных особенностей, не позволяющих однозначно описать его в понятиях стандартных процедур захвата, использования и освобождения «обычного» ресурса. Эти особенности таковы:

1. ледокол представляет собой *движущийся* ресурс, то есть он может самостоятельно перемещаться к месту своего использования согласно собственной модели движения;

2. ледокол представляет собой *разделяемый* ресурс, то есть один ледокол может использоваться для одновременного обеспечения движения нескольких транспортных судов (каравана) на одном и том же участке рейса;

3. ледокол представляет собой *необязательный* к использованию ресурс, так как большинство современных транспортных судов ледового плавания способно к самостоятельному движению в достаточно широком спектре ледовых условий;

4. ледокол является *редким и дорогим* ресурсом. Действительно, привлечение ледокола зачастую может существенно увеличить скорость прохождения тяжёлого ледового участка, но потребовать от эксплуатанта транспортного судна значительных финансовых затрат. В то же время, ограниченное количество мощных ледоколов (к 2025 году планируемое число атомных отечественных ледоколов в эксплуатации должно составить 6–8 экземпляров) при одновременном резком увеличении грузопотока неизбежно приведёт к конкуренции за них различных транспортных компаний.

Все перечисленные выше соображения приводят к выводу о том, что в любой, претендующей на достоверность и практическую востребованность имитационной модели транспортной системы СМП должен в обязательном порядке быть реализован некий интеллектуальный алгоритм оперативного планирования работы ледоколов, который бы достаточно адекватно отражал логику их диспетчеризации в реальной практике управления ледокольным флотом. Этот алгоритм должен непосредственно в ходе исполнения имитационной модели давать ответы на следующие вопросы в пределах выбранного временного горизонта планирования:

- какова рациональная очередность проводки судов имеющимися ледоколами?
- какие суда войдут в караван для каждого ледокола?
- где должны находиться точки сбора и роспуска караванов?
- какие суда при этом смогут пройти по всему или части маршрута рейса самостоятельно и с какими затратами времени и топлива?

То есть для рассмотренной задачи имитационная модель обретает прогностическую и исследовательскую ценность только в сочетании с моделью интеллектуального процесса управления моделируемыми объектами и процессами в ходе их фактической эксплуатации. Эта тенденция характерна для проблемы математического имитационного моделирования во множестве смежных предметных областей (Топаж и др., 2019).

С математической точки зрения поставленная проблема сводится к решению транспортной задачи в исключительно сложной постановке, специфическими факторами в которой выступают ограниченность ледокольного ресурса, высокий уровень неопределенности будущей динамики природных условий, а также пространственная неоднородность и непрерывность среды функционирования

транспортных объектов. В отличие от логистических задач автомобильных или железнодорожных перевозок место сбора или роспуска каравана, то есть захвата или освобождения судами вспомогательного ресурса ледокольного сопровождения, может находиться в любой географической точке морской акватории. Единственным перспективным способом решения поставленной проблемы может служить ее упрощение, то есть сведение к виду, пригодному для решения одним из методов эвристической оптимизации, математического программирования и/или исследования операций.

#### **Постановка задачи**

Планирование ледокольного обеспечения можно отнести к подвиду проблемы тактического планирования работы флота, для решения которой используются различные методы, которые можно разделить на следующие основные группы:

- метод полного перебора;
- использование эвристик «жадного» типа;
- полная или полуэвристическая комбинаторная оптимизация.

Метод *полного перебора* является формально наиболее простым с математической и алгоритмической точки зрения, а также позволяет найти строго оптимальное решение, однако обладает крайне низкой производительностью. Включение полного алгоритма перебора в логику исполнения имитационной модели окажет критически негативное влияние на её быстродействие и на практике неприменимо.

*Эвристические «жадные» алгоритмы планирования* осуществляют пошаговое планирование «от начала к концу». Они имеют характерную особенность: принятие решения на каждом этапе планирования осуществляется для локального момента времени согласно принятому критерию эффективности, не охватывая ни весь период эксплуатации системы, ни даже ограниченный горизонт планирования. При этом, как правило, учитывается только текущее состояние объекта моделирования, например, производится удовлетворение наилучшим образом потребностей текущего рейса или задания на перевозку. Преимуществом эвристических алгоритмов планирования жадного типа или так называемых ситуационных планировщиков является быстрота работы, которая при большом количестве действующих элементов системы («агентов») и широком горизонте планирования может быть очень важна. Кроме того, логика ситуационного планирования может быть явным образом запрограммирована в коде самой имитационной модели, не требуя дополнительных усилий по интеграции с внешними решателями.

Наиболее многочисленная группа методов тактического планирования работы морского транспорта – методы, основанные на алгоритмах *комбинаторной оптимизации*. Они позволяют формировать расписание (план) рейсов судов, достигая в идеале оптимальной схемы эксплуатации. Однако для решения сложных и детализированных задач планирования работы флота методы абсолютной комбинаторной оптимизации также оказываются неприменимы вследствие ограничений по быстродействию, обусловленных «проклятием размерности». Поэтому для целей практического использования многие строгие методы комбинаторной оптимизации трансформируются путем замены процедур поиска абсолютного экстремума на эвристические алгоритмы. Получающиеся в результате эвристические методы комбинаторной оптимизации, как и «жадные» алгоритмы не находят формально наилучшего решения, однако обладают заметно большей производительностью, позволяющей использовать их непосредственно в ходе прогона имитационной модели.

Следует отметить, что с точки зрения программной архитектуры, внедрение алгоритмов комбинаторной оптимизации в имитационную модель может производиться двояко. Первый способ предполагает вызов из кода имитационной модели функций внешних программных инструментов – специализированных решателей. Благо к настоящему времени на свободном рынке присутствует достаточное число как коммерческих, так и открытых инструментов, предназначенных для программирования в ограничениях и решения сложных комбинаторных задач планирования. К наиболее известным коммерческим решениям следует отнести системы IBM ILOG CPLEX и Microsoft Solver Foundation (.Net). Среди популярных полностью или условно свободно распространяемых библиотек выделяются Google Optimization Tools (OR-Tools) и OptaPlanner (Java). При этом использование любого внешнего решателя не снимает с исследователя необходимость правильно сформулировать решаемую задачу в терминах его понятий, внутренней объектной модели и поддерживаемого программного интерфейса взаимодействия. Иными словами, возникает необходимость корректной интеграции разнородных программных продуктов. Второй способ состоит в создании и развитии принципиально нового класса решений в области информационных технологий – сред и платформ имитационного моделирования с уже встроенными в них инструментами комбинаторного планирования и дискретной оптимизации. Пример такого решения от компании «Амальгама» будет рассмотрен далее в настоящей статье.

Далее в статье приводится описание и сравнение нескольких альтернативных подходов к решению проблемы описания логики ледокольного обеспечения в рамках выбранной тестовой имитационной модели максимально упрощённой и идеализированной транспортной системы арктического судоходства. В рамках данного совместного исследования делается попытка представить максимально широкий спектр возможных взглядов на проблему и конкретных реализаций от различных команд разработчиков, а также осветить сильные и слабые стороны предложенных решений.

### **Материалы и методы**

В качестве тестового полигона для сравнения и анализа альтернативных алгоритмов оперативного управления работой ледокольного флота в составе арктической транспортной системы была создана очень простая имитационная модель линейных перевозок транспортными судами ледового плавания по условному макету Северного Морского Пути. Географическая среда перемещения модельных судов представляет собой одномерный граф, состоящий из шести узлов и пяти последовательных рёбер (участков). Длина каждого участка принята равной 300 морским милям, а полная протяжённость единичного рейса составляет, соответственно, 1500 миль. Ледовая обстановка на каждом отдельном участке изменяется независимо с заданной частотой обновления (по умолчанию – одна неделя модельного времени). При этом на протяжении каждого отдельного участка ледовые условия приняты одинаковыми. В качестве показателя текущей благоприятности ледовых условий на участке выбирается единственная целочисленная характеристика – код тяжести, принимающий значения от 0 (чистая вода) до 5 (экстремально тяжёлые льды). Элементарные заявки представляют собой рейсы транспортных судов, которые могут осуществляться в направлении либо с востока на запад, либо с запада на восток. Рассматривается только один типоразмер судов. Суда могут проходить участки рейса как самостоятельно, так и в сопровождении ледокола. Число доступных ледоколов в транспортной системе и их начальное расположение задаются параметрами конфигурации очередного прогона (в базовой конфигурации рассматривается работа двух ледоколов). Зависимость достижимой скорости самостоятельного перемещения судна от текущей тяжести льда на участке его местонахождения представляет собой

предопределённую табличную функцию, где максимальная скорость составляет 10 узлов для чистой воды и 0.2 узла для экстремально затруднённых условий. Скорость самостоятельного движения ледокола и скорость движения судна в составе каравана принимаются равными 10 узлам независимо от текущей тяжести ледовых условий на данном участке. Караван судов, следующих под проводкой ледокола, может составляться и распускаться только в узлах графа перемещения, то есть на границах участков. Максимальная длина каравана (число судов, следующих под проводкой одного ледокола) ограничена величиной статического параметра модели.

Логика исполнения модели подчиняется следующим правилам. В момент прихода очередной заявки (транспортного судна) в узел графа перемещений осуществляется запрос на получение последовательности его дальнейших действий. В случае использования того или иного алгоритма ситуативного «жадного» планирования происходит определение способа движения только данного судна на следующем участке. Оно может двигаться самостоятельно, вызвать для сопровождения конкретный ледокол или присоединиться к имеющемуся попутному каравану. В случае использования внешнего или внутреннего движка комбинаторной оптимизации происходит перепланирование оперативного расписания движения всех рейсов транспортных судов и заданий ледоколов и его исполнение в потоке модельного времени вплоть до следующего такта перепланирования. В качестве входных данных модулю планирования в каждый момент подаётся текущее состояние системы (местоположения и прогнозные сроки прибытия в очередные узлы маршрута транспортных судов, караванов и ледоколов для текущих рейсов и ледовые условия на участках маршрута) и прогноз динамики системы на следующий ограниченный интервал времени (времена прихода новых судов в начальные точки маршрутов и будущие характеристики ледовой обстановки на всех участках пути). Предполагается, что прогноз будущего состояния на горизонт планирования реализуется точно, то есть обладает стопроцентной оправдываемостью.

Внутренняя логика реализации описанной модели в виде процессной диаграммы среды AnyLogic приведена на рис. 1, а пример головного окна в режиме её прогона с визуализацией движения судов и ледоколов в условном географическом пространстве представлен на рис. 2.

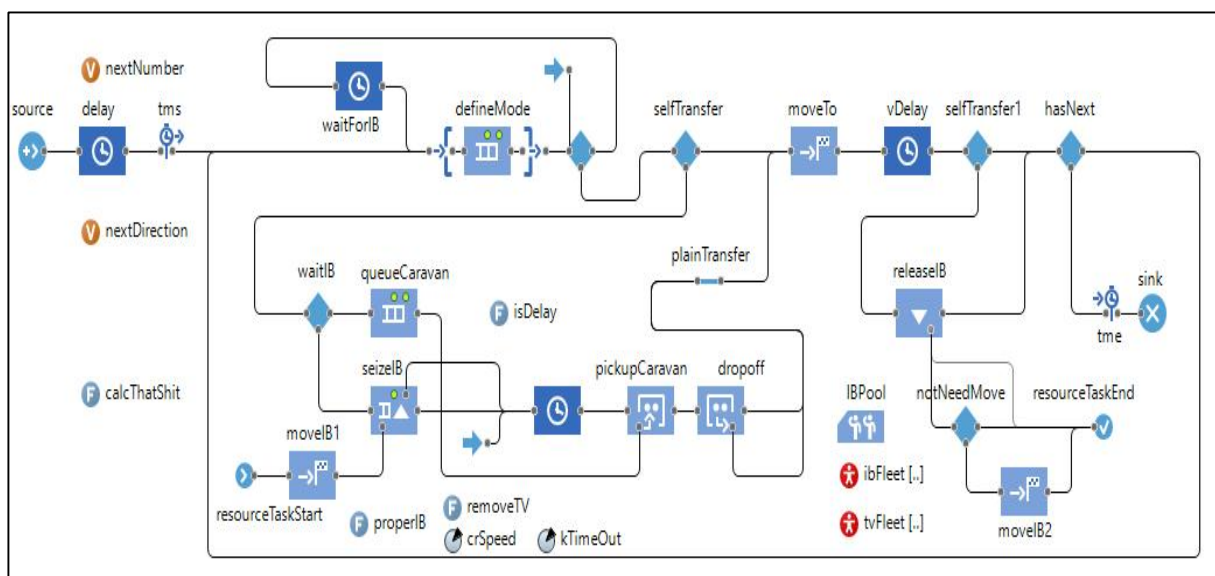


Рис. 1. Процессная диаграмма имитационной модели рейсов транспортных судов с ледокольным сопровождением в нотации среды AnyLogic

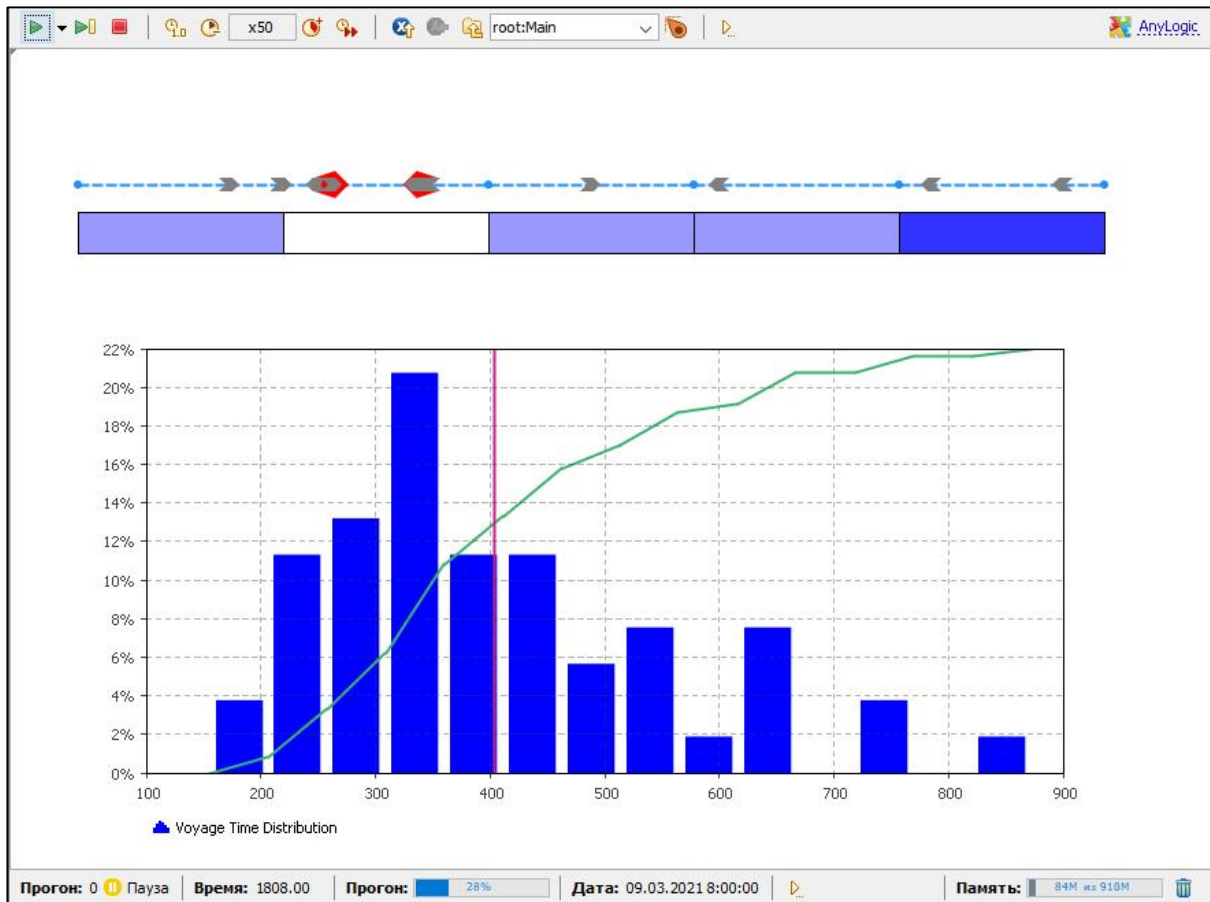


Рис. 2. Имитация движения судов и караванов по участкам линейного маршрута в режиме прогона тестовой имитационной модели. Цвет участка соответствует текущей тяжести ледовых условий

В качестве альтернативных подходов к формированию оперативного плана работы ледоколов в описанной тестовой имитационной модели рассматривались следующие варианты:

- несколько реализаций простых ситуативных «жадных» алгоритмов, сформулированных в виде предопределённого набора правил (дерева решений) для определения факта необходимости сопровождения ледоколом текущего судна на очередном участке рейса и подбора соответствующего ледокола;
- более сложный вариант ситуативного алгоритма, основанный на принципе определения зон дежурства и оптимальной расстановки ледоколов по ним на каждом временном интервале, равном заданному горизонту планирования. Можно отметить, что реализованная в этом варианте логика управления ледокольным флотом во многом схожа со сложившейся к настоящему времени практикой их реального использования;
- получение расписания работы ледоколов на каждом такте перепланирования путём обращения к внешнему движку комбинаторной оптимизации – библиотеке *OptaPlanner*. Это достигается путём вызова функций программного интерфейса специально разработанного компонента – адаптера, в котором производится сопоставление характеристик текущего состояния транспортной системы в терминах объектов описанной выше имитационной модели AnyLogic с входными и выходными переменными и сущностями используемой внешней платформы дискретной оптимизации;
- реализация и исследование описанной модели в альтернативной высокоуровневой информационной среде *Amalgama Platform*

(<https://amalgamasimulation.com/>), разработанной компанией «Амальгама» и объединяющей функциональность имитационного моделирования и комбинаторной оптимизации.

Следует отметить, что каждая из альтернативных реализаций общей логики имитационной модели (на платформе AnyLogic и в среде Amalgama Platform) может работать в двух режимах – с включением в модель стохастической составляющей (при этом поток заявок и динамика изменения ледовой обстановки генерируются при прогоне модели случайным образом методом Монте-Карло) и для детерминированной последовательности соответствующих событий, заданной явным образом. Для обеспечения сопоставимости результатов, полученных прогоном моделей, разработанных на разных платформах, использовался именно второй режим их запуска. Для этого был разработан и согласован общий формат представления входных и выходных данных, описывающих текущую исследуемую конфигурацию. Входной набор данных (конфигурационный файл) при этом составляют предопределённое расписание рейсов транспортных судов в начальные точки маршрута и динамика изменения ледовых условий на всех сегментах полного пути на всём временном интервале моделирования.

Ниже приводится краткое описание внутренней алгоритмической логики и принципов реализации для каждого из перечисленных выше подходов.

#### «Жадные» ситуативные алгоритмы

В качестве опорных вариантов простой логики управления ледоколами (некоторого аналога контрольной выборки в лабораторном эксперименте) в данной работе рассматривались два ситуативных алгоритма. Первый отвечает самому элементарному случаю, когда независимо от наличия или близости ледокола сопровождения и тяжести ледовых условий на очередном участке маршрута все суда двигаются самостоятельно. Второй простой ситуативный алгоритм планирования заключается в том, что судно вызывает ближайший свободный ледокол для перехода на очередном участке маршрута только в том случае, если скорость самостоятельного перемещения на нём, обусловленная текущей степенью тяжести ледовых условий, не превышает величину критической скорости  $V_{cr}$ . При этом оптимальное значение единственного параметра алгоритма  $V_{cr}$  определялось в ходе предварительного проводимого оптимизационного эксперимента с повторностями на множестве реализаций модели с заданными закономерностями случайной смены ледовых условий на участках маршрута и поступления заданий на перевозку транспортными судами.

#### Метод определения зон дежурства и оптимальной расстановки ледоколов

Организация ледокольного обеспечения транспортного флота по принципу дежурства ледоколов состоит из двух последовательно решаемых задач: кластеризации ледовых участков и расстановки ледоколов между ними.

Роль кластеризации ледовых участков в ледокольном обеспечении сводится к следующему. Определение наиболее сложных ледовых участков на всем протяжении морского пути должно учитывать не только влияние какого-либо участка на длительность хода судна, но и относительное сходство между каждым из участков. В таком случае влияние каждого из участков пути на его пропускную способность возможно сопоставить друг с другом и определить потребность в наличии ледоколов именно на этом участке. Например, если два и более рассматриваемых тяжелых ледовых участка являются достаточно схожими, имеет смысл определить между ними

равное число дежурных ледоколов с целью равномерного увеличения пропускной способности морского пути.

Рассмотрим возможные критерии кластеризации ледовых участков в реальной практике арктического судоходства:

- критерий ледовых и гидрометеорологических условий навигации – интегральный показатель, учитывающий толщину льда, торосистость, заснеженность, сжатие льда, температуру окружающей среды и пр. Этот показатель может быть предварительно оценен на основе ретроспективных данных, полученных из ряда источников (ФГБУ ААНИИ, Гидрометцентр и др.), или спрогнозирован с требуемой точностью на определенный период. Может быть представлен как в виде балльной оценки степени тяжести ледовых условий, так и в виде приведенной толщины льда эквивалентных механических характеристик (Milaković et al., 2020). Однако при использовании только этого показателя не будут учитываться технико-эксплуатационные возможности транспортного и ледокольного флота;

- технико-эксплуатационный критерий – показатель, характеризующий технико-эксплуатационные возможности работы судов во льдах и их совместной работы с ледоколом. Может быть представлен в виде достижимой скорости хода судна во льдах самостоятельно, под проводкой ледокола или в караване судов под ледокольной проводкой. В условиях безальтернативной необходимости в ледокольной проводке данный показатель является обязательным для использования, поскольку на протяжении ледовых участков с непроходимыми для транспортного флота условиями должен находиться хотя бы один ледокол. Однако для его расчета необходима определенная информация, которая не всегда может быть известна на начальных этапах исследования (например, исходные данные для расчета достижимой скорости хода судна во льдах).

Выбор одного из вышеперечисленных критериев зависит как от наличия определенных исходных данных для расчета, так и от целей моделирования. В частности, рассматриваемая простая модель предполагает абсолютную идентичность рассматриваемых судов транспортного флота. Поэтому для кластеризации ледовых участков выбран критерий ледовых и гидрометеорологических условий навигации.

Кластеризация ледовых участков по выбранному критерию происходит в следующем порядке:

1. множество участков сортируется в порядке убывания критерия кластеризации;
2. участок с наибольшим значением критерия становится первым элементом первого кластера;
3. участки, у которых значение критерия отличается менее, чем в  $(1-k)$  раз ( $0 \leq k \leq 1$ ), попадают к нему в кластер и сортируются в порядке убывания значения критерия;
4. первый участок, который не попадает в кластер к участку с наибольшим значением критерия, становится первым элементом во втором кластере и т.д.

По результатам кластеризации ледовых участков решается задача расстановки ледоколов по ледовым участкам. Алгоритм расстановки ледоколов по ледовым участкам представлен на рис. 3.

Выбор определенного ледокола для дежурства на определенном ледовом участке происходит по критерию минимума расстояния от ледокола до участка. С этой



целью строится матрица расстояний от каждого ледокола до каждого морского участка. По ней в порядке убывания значения критерия кластеризации определяется, какой ледокол необходимо отправить на дежурство на рассматриваемый ледовый участок. Периодичность выполнения задачи расстановки ледоколов и периодичность выполнения задачи кластеризации ледовых участков одинаковы и зависят от дискретности данных для расчета критерия кластеризации.

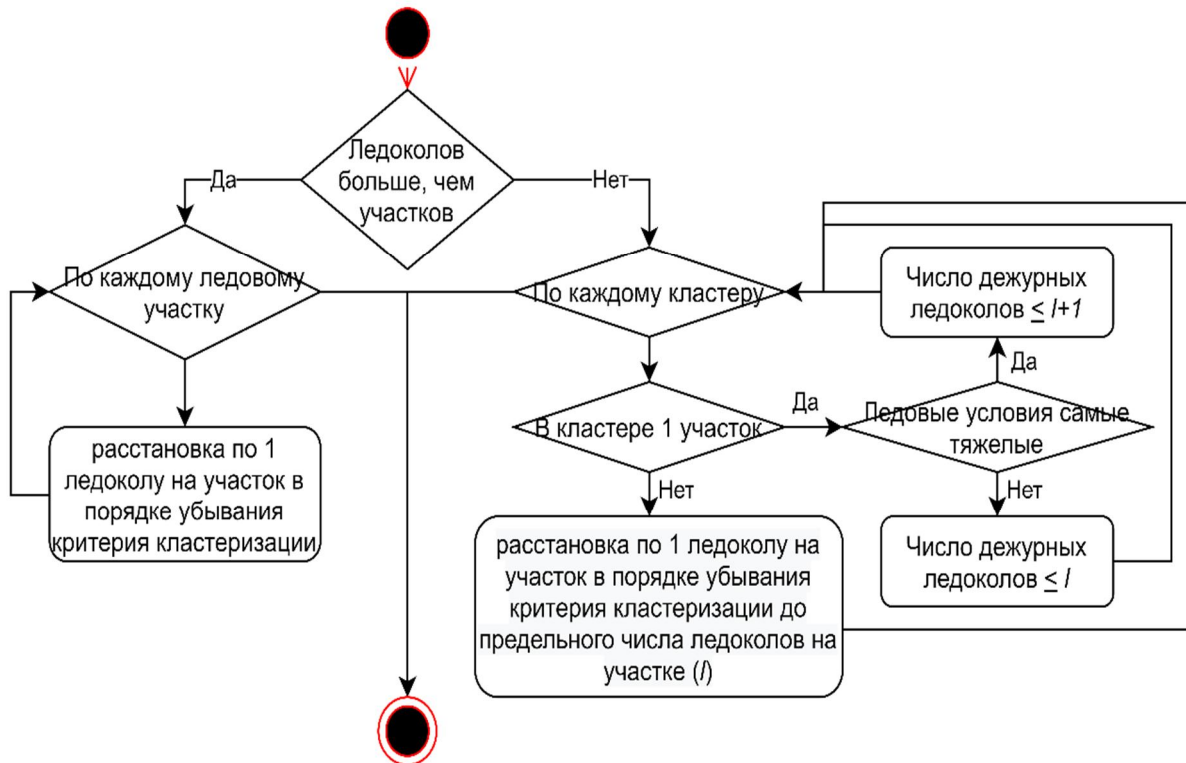


Рис. 3. Алгоритм расстановки ледокольного флота по ледовым участкам

В ходе исполнения рейса модельное судно при прохождении маршрута будет рассматривать возможность выполнения ледокольной проводки только вблизи дежурных ледовых участков. Определение необходимости ледокольной проводки судна происходит по следующему алгоритму. Считается, что для прохождения ледового участка судну не нужна ледокольная проводка, если:

1. скорость самостоятельного хода судна на участке не меньше допустимой;
2. участок является дежурным, но дожидаться ледокола невыгодно – быстрее будет преодолеть участок самостоятельно;
3. участок не является дежурным и после смены погодных условий на этом участке не ожидается самых суровых ледовых условий.

И, наоборот, для прохождения ледового участка судну нужна ледокольная проводка, если:

1. участок является дежурным, и выгоднее дожидаться ледокол и преодолеть участок под ледокольным сопровождением, чем без него;
2. участок не является дежурным, но после смены погодных условий на этом участке ожидаются самые суровые ледовые условия.

Подбор наилучших значений параметров описанных алгоритмов проводится в рамках оптимизационного эксперимента AnyLogic со стохастическими повторностями, то есть с применением метода Монте-Карло. Случайными величинами в рамках

эксперимента являются: интервал времени между прибытиями судов (экспоненциальный закон распределения), направление движения новоприбывших судов (равновероятно). Параметрами, определяемыми в ходе оптимизации, являются: предельная доля отклонения критерия кластеризации при сравнении пары участков ( $k$ ), предельное количество дежурных ледоколов на участке ( $l$ ), допустимая скорость самостоятельного хода судна на ледовом участке  $V_{cr}$ , необходимость в уходе до начала проводки по тайм-ауту, логический тип ( $i_{TO}$ ), длительность тайм-аута, час. ( $k_{TO}$ ).

Таким образом, описанный принцип дежурства ледоколов на ледовых участках удовлетворяет требованиям обеспечения безопасности судоходства – на наиболее затруднительных участках морского пути всегда будет дежурить хотя бы один ледокол при имеющемся количестве таких ледовых участков, не превосходящим имеющееся количество ледоколов; и преимущественного выполнения высокоприоритетных задач – при смене расстановки ледоколы быстрее всего заступят на дежурство на наиболее затруднительные участки маршрута.

#### Использование в ходе имитации внешнего решателя комбинаторной оптимизации OptaPlanner

Суть описываемого варианта реализации состоит в том, что непосредственно в ходе исполнения имитационной модели осуществляется постоянное оперативное перепланирование расписания рейсов транспортных судов и заданий ледоколов. Эта задача решается путём обращения к специально разработанной библиотеке, основанной на использовании внешнего оптимизатора *OptaPlanner*. *OptaPlanner* — это свободно распространяемый в виде библиотеки классов Java набор программных средств, предназначенных для решения широкого круга задач комбинаторной оптимизации (<https://www.optaplanner.org/>). Движок *OptaPlanner* содержит большой набор встроенных инструментов как для формирования корректного исходного приближения, такие как «первый подходящий» и «сильнейший подходящий», так и алгоритмы локального поиска, такие как «поиск с запретами», «имитация отжига», «поиск восхождением к вершине» и др.

Основная задача, которую было необходимо решить для подключения внешних алгоритмов комбинаторной оптимизации к имитационной модели, состояла в создании специального адаптера, то есть сведения модельных описаний к сущностям и терминологии используемого решателя. Следует отметить, что библиотека *OptaPlanner* представляет собой высокоуровневую надстройку над стандартным синтаксисом языка Java, которая позволяет описать конкретную задачу в привычных терминах рассматриваемой предметной области. При этом сущность оптимизационной проблемы технически выражается в специальном аннотировании тех или иных классов информационной модели, то есть указании того, какие ассоциативные связи (переменные планирования) для экземпляров каких сущностей (объектов планирования) должны варьироваться и подбираться из predetermined наборов вариантов для достижения заданного критерия качества всей системы. Укрупнённый вид объектной информационной модели для рассматриваемой задачи определения участков ледокольной проводки в условиях ограниченности ледокольного ресурса приведён на рис. 4.

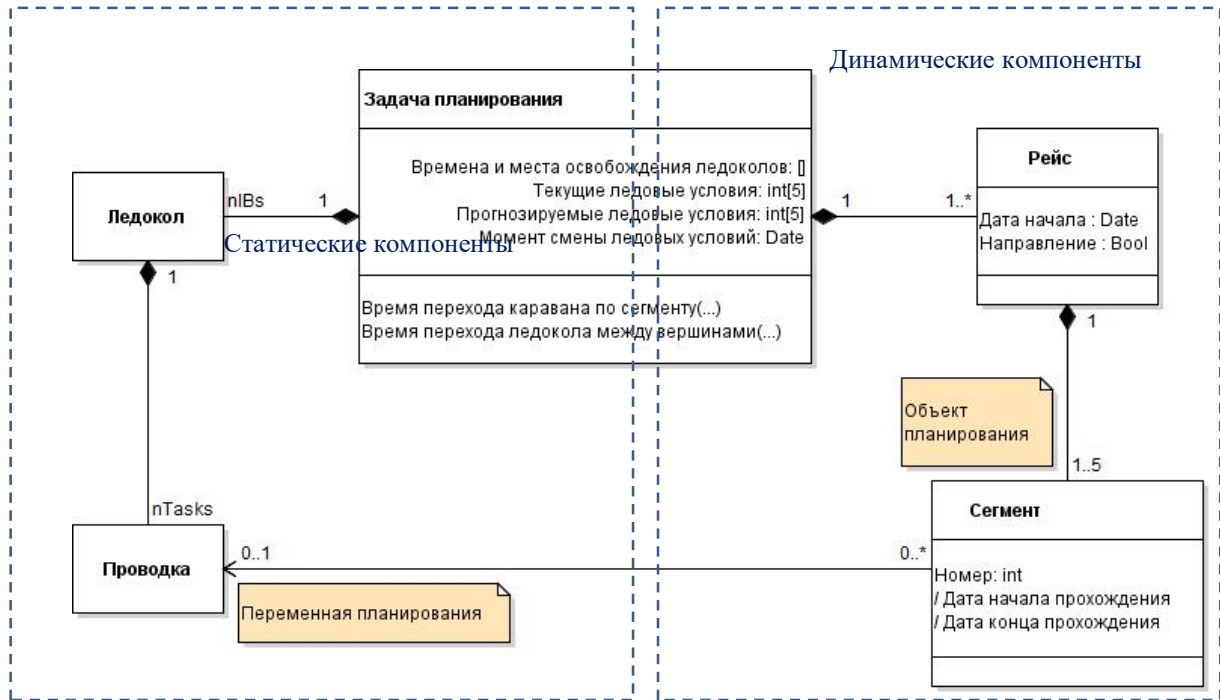


Рис. 4. Объектная модель информационного домена для задачи планирования ледокольного сопровождения рейсов транспортных судов в решателе *OptaPlanner*

Видно, что перебираемыми и оптимизируемыми переменными планирования в данном случае выступают ссылки сегментов (участков) рейсов на экземпляры классов «Проводка», описывающих упорядоченные задания ледоколов на сопровождение транспортных судов. Если соответствующее поле экземпляра класса «Сегмент» имеет значение **null**, это означает, что данный участок рейса преодолевается судном самостоятельно. А если несколько сегментов разных рейсов с одинаковым абсолютным порядковым идентификатором указывают на одно и то же задание ледокола, это отвечает случаю проводки одним ледоколом каравана из нескольких судов.

В коде реализации имитационной модели общение с внешним модулем оперативного планирования осуществляется через специальный класс-прокси. При его первичной инициализации происходит выставление всех статических характеристик решаемой задачи, которые не будут в дальнейшем изменяться в ходе прогона модели (число ледоколов и максимальное число заданий ледоколу на одном такте планирования  $I_{task}$ ). А непосредственно при вызове процедуры поиска решения на каждом такте перепланирования ей передаются в качестве аргументов все характеристики текущего состояния моделируемой системы, в частности – перечень и состав подлежащих планированию рейсов, локации и моменты освобождения ледоколов, а также текущие и прогнозируемые ледовые условия на всех участках маршрута. В качестве минимизируемого показателя (критерия оптимальности) выбирается суммарная длительность всех рассматриваемых рейсов. Ограничение на количество итераций в алгоритмах направленного поиска определяется заданием общего времени расчёта (принято равным одной секунде), то есть в качестве текущего квазиоптимального решения выдаётся лучший план, найденный за это время. Подобная технология взаимодействия с внешним движком оптимизации позволяет избежать критического замедления работы имитационной модели.

Результатом работы модуля планирования является формальное описание заданий на переход транспортным судам и заданий на осуществление проводки ледоколам. Полученный план директивно исполняется в имитационной модели до момента следующего вызова процедуры перепланирования, после чего все незавершившиеся и вновь поступившие заявки на рейсы осуществляются в соответствии с актуализированным планом их выполнения.

### Интегрированная модель со встроенным движком оптимизации на платформе Amalgama Platform

Модель разработана на высокоуровневой платформе имитационного моделирования Amalgama Platform. В модели в точности воспроизводится описанная выше логика работы ледоколов по сопровождению рейсов транспортных судов.

Работа по ледокольному сопровождению представляется как последовательность выполняемых заданий.

Каждое задание определяет сопровождение ледоколом одного или нескольких транспортных судов на ребре транспортной сети. Задания по сопровождению выполняются одновременно и ледоколом, и сопровождаемыми транспортными судами; последовательность выполнения задания судами обоих типов показана на рис. 5.

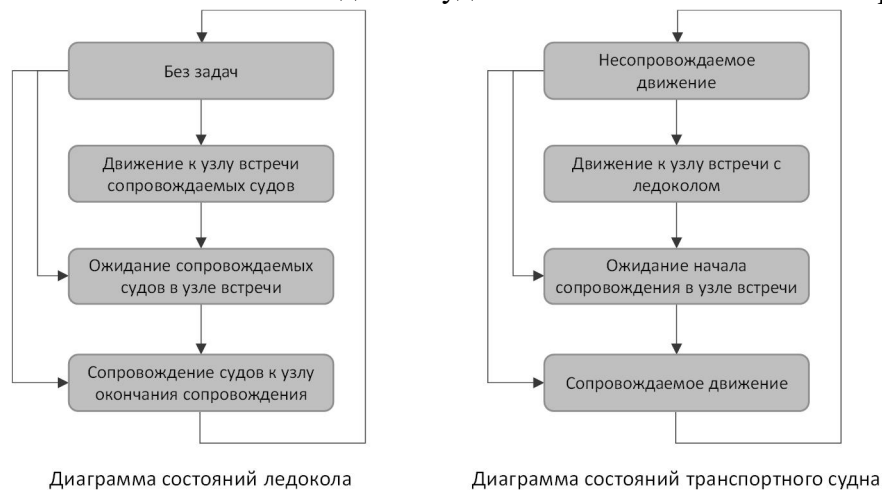


Рис. 5. Диаграммы состояний ледоколов и транспортных судов

Таким образом, выполнение задания по сопровождению ледоколом транспортных судов разбивается на три фазы (рис. 6), при этом фазы 1 и 2 могут отсутствовать, а фаза 2 может иметь варианты А или Б, но не А и Б совместно.



Рис. 6. Фазы сопровождения транспортных судов ледоколом

Каждый раз, когда одно или несколько судов прибывают в какой-либо узел транспортной сети, выполняется процедура планирования работы судов. Планирование работы судов заключается в определении для каждого ледокола и транспортного судна последовательности выполняемых заданий по сопровождению на заданном горизонте модельного времени. Горизонт является входным параметром модели и для всех приведенных расчетов был равен 7 суткам. Последовательность заданий называется расписанием.

Процедура генерации каждого расписания зависит от следующих параметров:

1.  $T_{ib}$  – максимальное время подхода ледокола к узлу начала сопровождения, задается в сутках; ограничение времени позволяет не назначать ледоколы на слишком отдаленные задания;

2.  $T_{iv}$  – максимальное время подхода транспортного суда к узлу начала сопровождения, задается в сутках; ограничение позволяет планировать сопровождение транспортных судов только от узлов, расположенных достаточно близко к их текущему положению;

3.  $N_{max}$  – максимально возможное число судов в караване.

Каждому набору значений параметров  $\langle T_{ib}, T_{iv}, N_{max} \rangle$  соответствует некоторое расписание. Перед началом имитационного эксперимента строится множество наборов значений этих параметров  $\mathbf{P}$ , состоящее из 168 элементов. Множество  $\mathbf{P}$  получается с помощью перебора параметров генерации расписания в следующих диапазонах с дискретностью 1:

$$T_{ib} = \{0, 1, \dots, 7\}, T_{iv} = \{1, 2, \dots, 7\}, N_{max} = \{1, 2, 3\}$$

Процедура планирования работы судов состоит из двух шагов. На первом шаге для каждого элемента  $p$  из  $\mathbf{P}$  генерируется расписание  $s$ . Множество всех сгенерированных расписаний обозначим как  $\mathbf{S}$ . На втором шаге из всех элементов  $\mathbf{S}$  выбирается такое расписание, которое обеспечивает наибольший неотрицательный суммарный выигрыш времени транспортных судов. Выигрыш времени транспортного судна рассчитывается следующим образом:

1. определяется позиция  $x$ , которую достигнет судно  $s$  с учетом всех запланированных заданий по сопровождению на момент  $t$ , где  $t$  – минимум двух значений: момента окончания горизонта планирования и момента достижения судном конечного узла транспортной сети;

2. определяется момент времени  $t_0$ , в который судно достигло бы позиции  $x$  без сопровождения;

3. вычисляется разность  $t_0 - t$ .

В общем случае выигрыш может быть отрицательным – например, если окажется, что транспортному судну быстрее дойти до точки окончания маршрута, чем дожидаться ледокола в течение длительного времени.

При расчете положений судов в процедуре планирования предполагается, что график изменения ледовой обстановки полностью известен на величину горизонта планирования, а за границами горизонта используется последнее известное значение. Также предполагается, что расписание появления транспортных судов в системе известно на величину горизонта планирования.

После того, как выполнится процедура планирования, задания полученного расписания начинают последовательно исполняться ледоколами и транспортными судами. При достаточно большом (по сравнению со временем выполнения заданий) горизонте планирования велика вероятность того, что не все задания расписания будут выполнены, так как следующий момент выполнения процедуры планирования наступит до времени начала последнего задания. Однако такие задания все же могут быть полезными, например, чтобы транспортные суда дожидались начала сопровождения ледоколами, заканчивающими выполнение предыдущих заданий.

Внешний вид пользовательского интерфейса модели со встроенным движком оптимизации на платформе Amalgama Platform показан на рис. 7.

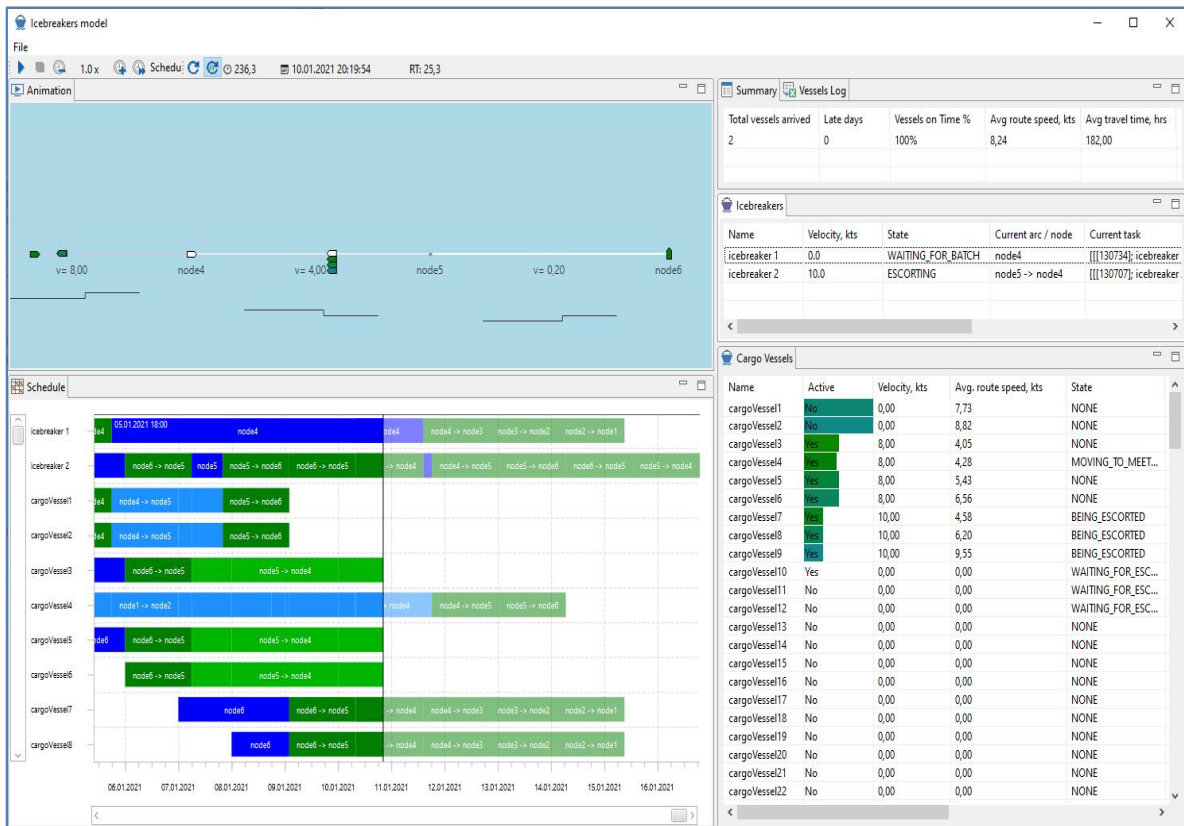


Рис. 7. Внешний вид модели на платформе Amalgama Platform

### Результаты и обсуждение

Сравнение предложенных подходов к управлению работой ледоколов в имитационной модели арктической транспортной системы проводилось для набора тестовых сценариев, описывающих динамику ледовой обстановки на участках маршрута и предопределённое расписание рейсов транспортных судов. В таблице 1 представлены выборочные результаты этого сравнения для трёх опорных сценариев.

**Сценарий 1.** Регулярный график прихода судов (1 рейс в сутки) и равномерное случайное распределение условной тяжести ледовых условий, вычисляемой на каждом недельном шаге их обновления независимо на всех участках маршрута (то есть с отсутствием временной и пространственной коррелированности данного случайного процесса). Всего 150 рейсов транспортных судов, два ледокола.

**Сценарий 2.** Случайный график прихода судов (пуассоновский поток заявок с интенсивностью 1 рейс в сутки) и динамика ледовых условий на участках маршрута, сгенерированная согласно случайному процессу, обладающему существенной временной связностью и большой величиной средней тяжести. Всего 156 рейсов транспортных судов, 2 ледокола.

**Сценарий 3.** Случайный график прихода судов (пуассоновский поток заявок с интенсивностью 1 рейс в сутки), сравнительно лёгкие ледовые условия на участках маршрута, сгенерированные как реализация случайного процесса с существенной пространственной связностью, но сравнительно большей динамичностью во времени. Всего 141 рейс транспортных судов, 2 ледокола.

В качестве показателя качества использованного алгоритма планирования выбирался критерий среднего времени рейса в часах  $T_{ave}$ .

Таблица 1. Результаты сравнения алгоритмов планирования работы ледоколов

Алгоритм планирования	Сценарий 1		Сценарий 2		Сценарий 3	
	$T_{ave}$	параметры алгоритма	$T_{ave}$	параметры алгоритма	$T_{ave}$	параметры алгоритма
Самостоятельное движение судов	<b>603.4</b>	–	<b>792.0</b>	–	<b>358.5</b>	–
«Жадный» ситуационный алгоритм	<b>427.7</b>	$V_{cr} = 1.0$	<b>717.8</b>	$V_{cr} = 1.0$	<b>350.5</b>	$V_{cr} = 1.0$
Алгоритм расстановки ледоколов по зонам дежурства	<b>321.9</b>	$k = 0.297$ $l = 1$ $V_{cr} = 6$ $i_{TO} = true$ $k_{TO} = 1557$	<b>644.3</b>	$k = 0.109$ $l = 1$ $V_{cr} = 10$ $i_{TO} = false$	<b>306.9</b>	$k = 0.193$ $l = 1$ $V_{cr} = 10$ $i_{TO} = false$
Комбинаторная оптимизация OptaPlanner	<b>340.3</b>	$I_{task}=5$	<b>591.5</b>	$I_{task}=5$	<b>312.5</b>	$I_{task}=5$
Интегрированная имитационная модель с оптимизатором	<b>309.7</b>	свои на каждом такте планирования	<b>421.1</b>	свои на каждом такте планирования	<b>259.4</b>	свои на каждом такте планирования

Анализ полученных результатов доказывает, что при включении в логику имитационного моделирования арктических морских транспортных систем алгоритмов интеллектуального управления работой ледокольного флота модельные показатели эффективности данной транспортной системы существенно повышаются. Этот эффект оказывается тем выше, чем более сложными оказываются как структура рассматриваемой системы (число рейсов транспортных судов и объём доступного ледокольного ресурса), так и внешние условия её функционирования (тяжесть, а также временная и пространственная связность ледовых условий на различных участках маршрута). При этом выгода, получаемая от применения специализированных методов оперативного комбинаторного планирования непосредственно в ходе исполнения имитационной модели, оказывается примерно сравнимой с эвристическим алгоритмом, основанным на динамическом назначении зон дежурства и расстановкой ледоколов на них.

Для того, чтобы сделать более обоснованные и содержательные выводы о сравнительной эффективности сравниваемых подходов необходимо расширение рассмотренной опорной тестовой имитационной модели с целью приближения её к реальной практике арктического судоходства. Это относится не только к степени детальности и адекватности самой модели, но и к выбору показателей эффективности исследуемой транспортной системы. Например, важным условием эффективной эксплуатации линейных транспортных систем вывоза углеводородов, требующих согласованной работы судов, терминальных грузовых узлов и всей береговой инфраструктуры, выступает обеспечение регулярности рейсов (Tarovik et al., 2017). Последнее, в свою очередь, предполагает необходимость того, что ледокол осуществляет проводку каждого судна на линии в примерно одинаковом объёме. Скорее всего, это наиболее просто обеспечивается именно в рамках концепции дежурства ледоколов на наиболее тяжёлых и относительно коротких участках



маршрута. При исследовании приближенной к реальности транспортной системы и это и другие соображения экономического характера (минимизация привлечения ледоколов с целью экономии затрат на фрахт, штрафные санкции за опоздание и т.д.), зависящие от характера конкретного рейса, также могут учитываться при формулировке критерия оптимизации работы ледокольного флота.

В то же время нельзя исключать, что «научоёмкие» подходы к планированию ледокольного обеспечения, основанные на решении задач комбинаторной оптимизации в полной постановке, окажутся более востребованными и экономически оправданными по мере существенного усложнения структуры арктических перевозок и развития ледокольного и транспортного флота, как в количественном, так и в качественном отношении. В любом случае, адекватные имитационные модели, а также интегрированные платформы, сочетающие функционал имитационного моделирования и исследования операций, представляются наиболее адекватным инструментом для сравнения нескольких альтернативных управленческих стратегий, а также упреждающего и предпроектного анализа подобных перспективных транспортных систем.

### Литература

1. <http://morvesti.ru/news/1679/89268/>.
2. Тимофеев О.Я., Таровик О.В., Топаж А.Г., Миронов Е.У., Фролов С.В., Буянов А.С., Горбачев М.А., Бенгерт А.А. Концепция централизованной информационной системы для планирования работы флота в Арктике // Арктика: экология и экономика. 2019, №1(33). С. 129-143.
3. Топаж А.Г., Таровик О.В., Реуцкий А.С., Киселёв В.А. Оперативное планирование и комбинаторная оптимизация в имитационных моделях транспортной логистики проектного уровня // Сборник трудов Девятой всероссийской научно-практической конференции «Имитационное моделирование. Теория и практика (ИММОД-2019)», Москва, 16-18 октября 2019 г., С. 235-241.
4. Aleksandar-Saša Milaković, Fang Li, Rüdiger Ulrich Franz von Bock und Polach & Sören Ehlers. Equivalent ice thickness in ship ice transit simulations: overview of existing definitions and proposition of an improved one // Ship Technology Research, 2020, 67:2, 84-100.
5. <https://www.optaplanner.org>.
6. <https://amalgamasimulation.ru>.
7. Tarovik O.V., Topaj A.G., Bakharev A.A., Kosorotov A.V., Krestyantsev A.B., Kondratenko A.A. Multidisciplinary approach to design and analysis of arctic marine transport systems // Proceedings of the 36th International Conference on Ocean, Offshore & Arctic Engineering (OMAЕ 2017). 2017.