

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ МАРШРУТИЗАЦИЯ СУДОВ ВО ЛЬДАХ: ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ И ИНСТРУМЕНТЫ РЕШЕНИЯ

А. Г. Топаж, О. В. Таровик, А. А. Бахарев

ООО «Бюро Гиперборея» (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 28 сентября 2021 г.

*Описана математическая постановка задачи маршрутизации судов во льдах на основе универсального экономического критерия, позволяющего учитывать возможность ледокольного сопровождения, движение кормой или носом вперед, а также другие аспекты ледовой навигации. Сформулирован перечень научно-технических задач, которые необходимо решить для комплексного понимания и дальнейшего внедрения технологий ледовой маршрутизации в практику информационного сопровождения судоходства в Арктике. Приведено описание функционала программного приложения Boreas, позволяющего решать указанные задачи. На ряде практических примеров продемонстрированы возможности созданных программных инструментов.*

**Ключевые слова:** арктическое судоходство, ледовая маршрутизация, исследование операций, ледовая ходкость судов, программное обеспечение.

### Введение

Интенсификация арктического судоходства делает актуальным развитие различных цифровых сервисов, направленных на повышение эффективности морских перевозок и снижение рисков ледовой эксплуатации судов. Одной из наиболее важных задач в этой сфере является создание прикладных решений для автоматического поиска оптимального пути судна в изменяющихся ледовых условиях. Такие решения являются закономерным развитием существующих сервисов оптимизации маршрута на чистой воде (погодный роутинг), которые показали свою эффективность и возможность экономить топливо на 2—10%, существенно снижая при этом вероятность плаванья в условиях шторма [1]. Поскольку лед в общем случае влияет на скорость судна в гораздо большей степени, чем ветер и волны, можно ожидать, что и эффект от оптимизации маршрута во льдах окажется гораздо более значимым, чем в случае открытой воды.

По сравнению с роутингом на чистой воде автоматический поиск оптимального маршрута во льдах требует применения иных критериев и учета гораздо большего количества входных данных. Особенности маршрутизации судов во льдах обусловлены тремя главными факторами:

- существенной пространственно-временной изменчивостью условий среды, в которой движутся суда;
- сильным, а иногда и определяющим влиянием ледовых условий на скорость судна;
- возможностью использования различных тактических приемов и внешних ресурсов для обеспечения движения в сложных ледовых условиях, таких как движение кормой вперед или привлечение ледокола.

Первые попытки разработки инструментов для автоматического поиска маршрутов во льдах были предприняты в конце 1990-х годов в рамках проекта ARCDEV [2]. Однако активное развитие методов ледовой маршрутизации началось лишь в 2000-х годах с ростом объемов арктического судоходства и появлением принципиально нового источника

информации о состоянии ледового покрова — пассивной и радиолокационной спутниковой съемки. Сегодня научные исследования вопросов ледового роутинга начинают все больше переходить в практическую плоскость. Основная сложность практической реализации состоит в том, что комплексное решение задачи маршрутизации во льдах предполагает совместное рассмотрение нескольких предметных областей. Поэтому любая прикладная система ледовой маршрутизации должна включать в себя следующие компоненты:

- геоинформационный компонент — инструменты мониторинга и прогнозирования динамики ледовой обстановки в регионе интереса в течение всего времени анализируемого рейса;
- технологический компонент — модель движения судна в произвольных погодных и ледовых условиях, которая учитывает ледовые возможности конкретного судна;
- экономическая составляющая — критерии и ограничения решаемой задачи оптимизации, которые могут быть записаны в универсальном стоимостном выражении;
- математический компонент — используемые математические методы и алгоритмы поиска оптимального маршрута по выбранным критериям с учетом заданных ограничений.

Существует множество исследований, в которых основное внимание уделяется какой-либо одной из перечисленных составляющих. Например, целый пласт работ посвящен исследованию вопросов мониторинга и прогнозирования природных условий [3]. Моделирование ходовых качеств судов во льдах также представляет собой отдельное направление [4], соответствующие модели строятся главным образом на основе вероятностного подхода или полуэмпирических формул. В целом ряде работ анализируются формальная математическая постановка и численные алгоритмы поиска оптимального пути во льдах [5]. В качестве математического аппарата решения этой оптимизационной задачи могут использоваться разные методы, например генетический алгоритм [6] или пошаговый «жадный» подход с использованием метода Пауэлла [7].

В то же время существует крайне ограниченное число публикаций, в которых все перечисленные аспекты рассматриваются одновременно и с более или менее равной степенью детализации. Однако с практической точки зрения основной интерес представляет именно комплексная постановка задачи ледового роутинга, которая объединяет все указанные компоненты. Неизбежным негативным эффектом такой постановки является наличие множества факторов неопределенности, которые характерны для каждого из компонентов по отдельности и, объединяясь в рамках одного решения, могут сильно влиять на конечный результат. Наиболее остро здесь стоит проблема точности входных данных о параметрах ледовых условий

[8], вследствие которой зачастую оказывается невозможно получить однозначный рекомендуемый маршрут, которым можно уверенно руководствоваться на практике. По этим причинам многие судоводители до сих пор скептически относятся к перспективам автоматической ледовой маршрутизации [9], несмотря на общую увлеченность индустрии данной идеей.

Тем не менее, невзирая на сложности текущего момента, потенциал автоматических сервисов ледовой маршрутизации представляется неоспоримым. Однако их практическому внедрению должны предшествовать исследования, позволяющие понять и детально проанализировать ограничения, особенности, степень влияния, а также сильные и слабые стороны различных подходов к реализации каждого компонента интегрального решения. В настоящей статье описано прикладное программное решение для выполнения соответствующих исследований, представлена общая постановка задачи ледовой маршрутизации, а также приведены примеры решения практических задач.

### Постановка задачи оптимальной маршрутизации судна во льдах

Любая задача математической оптимизации должна быть сформулирована в базовых понятиях управляющих переменных, критерия оптимизации и ограничений.

При движении судна во льдах в каждой точке пространства варьированию могут подвергаться переменные трех типов:

- скорость судна (или мощность энергетической установки);
- траектория движения (маршрут);
- дополнительные характеристики режима движения, такие как использование ледокола, движение носом или кормой вперед и т. д.

Для погодного роутинга в качестве варьируемых переменных традиционно выступают скорость и маршрут [10]. В некоторых случаях ищется только оптимальная траектория при условии заданной постоянной величины модуля скорости [11], в других, наоборот, варьируется скоростной режим при движении по predetermined траектории [12], а в ряде работ эти величины оптимизируются совместно [13]. Ледовое плавание дополнительно характеризуется возможностью привлечения ледокола, а также способностью некоторых судов двигаться как носом, так и кормой вперед. Здесь следует принимать во внимание, что смена направления движения не может производиться мгновенно, так как разворот габаритных судов в сложных ледовых условиях представляет собой отдельную операцию. Что же касается учета ледокольной проводки, то эта задача осложняется тем, что современные суда ледового плавания зачастую могут двигаться во льдах как самостоятельно, так и с ледоколом. В последнем случае уменьшаются длительность перехода и рас-

ходы топлива, однако возникают дополнительные расходы на услуги ледокола. Можно говорить о том, что в рамках конкретного рейса существует некоторый экономически оправданный объем ледокольного сопровождения, при котором суммарные затраты на ледовом участке оказываются наименьшими.

Исходя из этого, общую математическую постановку задачи маршрутизации можно записать следующим образом:

$$\langle \mathbf{V}, B \rangle_{\text{opt}} = \arg \min_{\mathbf{V}, B} \int_0^T C[\mathbf{S}(t), \mathbf{V}(t), B(t)] dt, \quad (1)$$

где  $\mathbf{S}(t) = \langle X(t), Y(t) \rangle$  — вектор текущего местоположения судна (каравана) на плоскости географических координат  $XY$  в моменты времени  $t$ , т. е. временная динамика  $\mathbf{S}(t)$  определяет траекторию движения;  $\mathbf{V}(t) = \langle V_x(t), V_y(t) \rangle$  — вектор текущей скорости;  $B(t)$  — временная динамика скалярного показателя, в котором условно закодирован текущий режим движения (носом или кормой вперед, автономно или с использованием ледокола);  $C$  — общая условная стоимость перехода в единицу времени.

В записи штрафной функции  $C$ , играющей роль критерия оптимизации, могут присутствовать постоянные члены (фрахтовая ставка судна), явные зависимости от времени (штрафы за опоздание к месту назначения), функциональные зависимости от текущего местоположения (экологические сборы в охраняемых природных зонах), от текущего скоростного режима (расходы топлива), а также от наличия ледокольного сопровождения.

Для замыкания задачи оптимального управления (1) необходимо определить ряд ограничений. Граничные условия в данном случае записываются в виде

$$\mathbf{S}(0) = \mathbf{S}_0, \quad \mathbf{S}(T) = \mathbf{S}_T, \quad (2)$$

где  $\mathbf{S}_0$  и  $\mathbf{S}_T$  — фиксированные начальная и конечная точки маршрута.

Правая временная граница  $T$  может быть задана либо свободной, либо фиксированной. В первом случае на желательную длительность рейса либо не накладываются никакие ограничения, либо может применяться некий штраф за опоздание. Во втором случае требуется наложить дополнительное ограничение на превышение величиной  $T$  заданной даты достижения конечной точки.

Эксплуатационные ограничения на достижимую скорость судна или каравана  $V_{\max}$  в конкретных природных условиях могут быть сформулированы следующим образом:

$$\|\mathbf{V}(t)\| \leq V_{\max} [K(\mathbf{S}, t), B(t), \mathbf{e}_V, M], \quad (3)$$

где  $K(\mathbf{S}, t)$  — массив параметров окружающей среды (лед, погода, течения, глубина) в текущей пространственно-временной локации;  $B(t)$  — режим

движения;  $\mathbf{e}_V$  — орт направления вектора скорости (зависимость скорости от направления движения говорит об учете анизотропности среды ледяного покрова, возникающей, например, вследствие наличия локальных трещин и разрывов сплошности);  $M$  — вектор параметров, характеризующих проектные характеристики судна (его информационная модель).

Расчет значения  $V_{\max}$  производится на основе модели движения судна во льдах. Ограничение (3) записано в форме неравенства, т. е. предполагается, что предметом оптимизации являются как направление, так и величина скорости в каждой точке маршрута. Как отмечено выше, такая задача часто решается в упрощенной формулировке, когда варьируется только траектория движения, а абсолютная величина скорости может определяться исходя из заданного режима работы энергетической установки. В этом случае ограничение (3) переписывается в виде равенства:

$$\|\mathbf{V}(t)\| = V_{\text{ref}} [K(\mathbf{S}, t), B(t), \mathbf{e}_V, M], \quad (4)$$

где в качестве опорной скорости  $V_{\text{ref}}$  в каждой точке маршрута может выступать, например, максимально достижимая, экономичная или эксплуатационная скорость движения.

Географические ограничения (запрет на проход через определенные зоны) могут формально быть записаны в виде  $\mathbf{S}(t) \in \Omega(t)$ , где под  $\Omega$  понимается множество географических точек разрешенных участков акватории, которое в общем случае может изменяться во времени (например, кратковременные закрытия районов из-за военных учений). В вырожденном случае решение задачи оптимизации скоростного режима по заданной траектории  $\Omega$  будет представлять собой набор одномерных линейных объектов — разрешенных фарватеров или рекомендованных навигационных путей.

Комплексный анализ проблемы автоматической маршрутизации во льдах в соответствии с описанной выше формальной постановкой предполагает получение ответов на следующие вопросы:

1. Насколько полнота, точность и степень неопределенности задания входных данных о текущей и прогнозируемой окружающей обстановке  $K(\mathbf{S}, t)$  влияют на эффективность решения и адекватность получаемых результатов? Какие требования по временному и пространственному разрешению, а также структурному наполнению должны быть выдвинуты к провайдерам соответствующих данных?

2. В какой степени результаты оптимальной маршрутизации оказываются чувствительны к точности используемой модели движения судов во льдах — как к ее «динамической» составляющей (модели ходовых качеств), так и к «статическим» входным данным (полноте и детализированности информационной модели судна)?

## Проблемы Северного морского пути

3. В каких терминах и каким образом рационально задавать критерий оптимизации  $C$ , чтобы адекватно учесть все поставленные цели? К этим целям могут быть отнесены, например, требование о достижении точки назначения в заданный срок, уменьшение расходов топлива, уменьшение рисков ледового плавания и т. д.?

4. Какими численными методами из области исследования операций поставленная задача может быть решена наиболее адекватно и эффективно? Каким образом можно интегрировать дополнительные переменные задачи, связанные с выбором режима движения  $B(t)$ , в известные алгоритмы (например, сеточные и волновые методы), разработанные для поиска оптимального пути?

5. Как влияет на эффективность решения полнота постановки задачи? Например, возможны одновременная или раздельная оптимизация траектории и скоростного режима, а также совместное или раздельное решение задач оптимальной маршрутизации и планирования работы ледоколов в условиях ограниченности ледокольного ресурса.

6. Насколько полученные решения оказываются близкими к реальным трекам судов ледового плавания? Чем объясняются полученные расхождения, и сколь важную роль играют не учитываемые в используемой системе и субъективные факторы при выборе капитаном маршрута и режима движения в сложных ледовых условиях?

Эти вопросы очень важны с точки зрения практики, но также и весьма объемны, поэтому все они не могут быть проанализированы в рамках одного исследования. В настоящей статье мы приводим описание специально созданного прикладного исследовательского инструмента, позволяющего получать ответы на указанные вопросы, — программного приложения Boreas. Постановка задачи ледовой



Рис. 1. Примеры задания исходной геометрии маршрута

Fig. 1. Examples of setting the initial route geometry

маршрутизации в системе Boreas соответствует приведенному выше формальному описанию.

### Функционал приложения Boreas

#### Варианты решения задачи маршрутизации

Решением задачи оптимизации является рекомендованный трек, который представляет собой совокупность элементарных прямолинейных участков (ортодромий). Для каждого участка определены скорость хода, расчетная стоимость перемещения согласно критерию (1), длительность перехода, режим движения (носом/кормой вперед), а также признак перемещения в караване. Для получения оптимального маршрута необходимо задать: способ формирования исходной геометрии маршрута, способ вычисления скорости судна в точке, возможность движения с ледоколом.

В качестве исходной геометрии при построении маршрута могут указываться либо только начальная и конечная точки (в этом случае траектория перемещения подлежит определению), либо предопределенный маршрут, условно называемый «фарватером». При движении по такому фарватеру траектория перехода фиксируется, а оптимизации подвергаются только скоростной режим и способ движения (рис. 1). Этот функционал, в частности, используется для анализа соответствия расчетных режимов движения фактическим данным.

Способ вычисления скорости в исследуемой точке может быть либо фиксированным, либо вариативным. Первый вариант соответствует формуле (4), второй — формуле (3).

При фиксированном способе скорость судна в каждой точке вычисляется на основе одного из алгоритмов, заложенных в модель движения. Таких скоростных режимов судна в настоящее время реализовано три: максимально достижимая скорость, экономичный ход, эксплуатационный режим. Экономичная скорость соответствует мини-

Таблица 1. Варианты решения задачи оптимальной маршрутизации

№ п/п	Способ построения оптимального маршрута	Способ задания исходной геометрии	Способ вычисления скорости	Варьируемые группы параметров		
				Траектория	Скорость	Нос/корма **, караван ***
1	По начальной и конечной точке	Начальная и конечная точки	Фиксированный	+	–	+
2	По начальной и конечной точке с заданным ETA *		Вариативный	+	+	+
3	По фарватеру	Фарватер	Фиксированный	–	–	+
4	По фарватеру с заданным ETA		Вариативный	–	+	+

\* ETA — расчетное время прибытия (Estimated Time of Arrival).

\*\* Задействуется автоматически, если в информационной модели судна указана возможность работы кормой вперед.

\*\*\* Возможность движения в караване должна быть указана явно.

мальному расходу топлива на единицу пройденного пути и определяется в ходе итерационных процедур. При движении в тяжелых льдах она практически всегда совпадает с максимально достижимой, а в средних и легких льдах — как правило, оказывается меньше на 20—30%. Значение эксплуатационной скорости определяется таким образом, чтобы в отношении легком льду судно двигалось, используя некую эксплуатационную мощность (ориентировочно 40—60% максимальной), а при увеличении толщины льда мощность на валах также увеличивалась в стремлении удержать скорость судна не ниже порогового значения (около 7—10 уз) [4].

При вариативном способе задания скорости производится одновременное варьирование траектории и времени прохождения каждого элементарного участка. Это время определяется для нескольких тестовых скоростей, назначаемых в интервале от экономической до максимальной.

Если перед выполнением расчета указывается возможность движения судна с ледоколом, то при решении используется набор дополнительных параметров, касающихся ледокольной поддержки [5]: информационное описание судна, исполняющего функцию ледокола (это может быть как ледокол, так и более мощное транспортное судно); условная фрахтовая ставка ледокола (необходима для вычисления экономического критерия  $C$ ); условное время ожидания ледокола судном (используется в качестве разового штрафа за каждый акт привлечения ледокола). Этот набор параметров определяет некую интегральную целесообразность ледокольного сопровождения. Чем выше ледопроездимость ледокола и чем меньше стоимость его фрахта, тем большую часть маршрута судно будет стремиться проходить при ледокольной поддержке (см. также [14]).

Сводные данные о вариантах решения задачи оптимальной маршрутизации приведены в табл. 1.

#### Поисковые алгоритмы

Решение задачи вариационного исчисления, описанной уравнениями (1)—(4), в исходной непрерывной постановке на практике оказывается крайне затруднительным. Поэтому необходимо выполнить ее пространственно-временную дискретизацию и использовать для решения различные методы теории оптимизации и исследования операций. В системе Boreas в настоящее время реализованы три принципиальных алгоритмических подхода к построению оптимального маршрута:

- модифицированный сеточный метод;
- волновые методы;
- комбинированный подход.

Сеточные алгоритмы ищут оптимальный маршрут в виде последовательности обхода ребер заранее построенной сетки. В общем случае уменьшение размера ячейки такой сетки, т. е. повышение уровня пространственной детализации, увеличивает точность решения, однако при этом растет и вычислительная сложность задачи. Разумным ограничением размера ячейки здесь выступает требование, чтобы среднее время движения и средняя дистанция судна между соседними вершинами были меньше периода и масштаба квазипостоянства природных условий. Удельный вес каждого ребра, т. е. общие удельные затраты на его прохождение, рассчитываются с использованием модели движения, в которой скорость и другие эксплуатационные показатели определяются исходя из значений ледовых и погодных параметров в соответствующей географической точке в конкретное время. Зависимость скорости в точке от времени создает серьезные проблемы при использовании классических методов поиска



оптимального пути на стационарных ориентированных графах, таких как динамическое программирование [15] или алгоритм Дейкстры [16]. Поэтому в логическом ядре маршрутизатора Boreas используется оригинальный метод, представляющий собой модификацию известного алгоритма A\*. Этот алгоритм, как любой сеточный метод, отличается достаточно высокой производительностью. Однако зачастую полученные кривые имеют изломанный вид, что лишь частично объясняется исходной дискретностью сетки, на которой строится маршрут, а в большей степени представляет собой проявление проблемы так называемой манхэттенской дистанции [17].

Под «волновыми» методами понимается семейство алгоритмов, в которых решение задачи маршрутизации основано на последовательном построении линий равного уровня в географическом пространстве. Физической аналогией этого подхода может служить распространение волны на поверхности жидкости. Представим, что мы инициировали возникновение волны в начальной точке маршрута  $S_0$ , уронив в нее тяжелое тело (рис. 2). Скорость распространения волны в конкретной точке подобна достижимой скорости судна. Волна распространяется от места старта в разные стороны, огибает острова и затухает у берега. При этом в каждый момент времени можно провести линию, последовательно соединяющую точки волнового фронта, т. е. изохрону. Наиболее логичным способом математического моделирования распространения такой волны является принцип Гюйгенса — Френеля, согласно которому каждая точка волнового фронта сама является источником сферической волны, а сумма этих вторичных волн определяет форму волнового фронта в каждый последующий момент времени. Рано или поздно волна достигает точки назначения. При этом путь, по которому самая первая волна дошла до конечной точки, можно трактовать как оптимальный маршрут.

При дискретизации этой задачи в пространстве экономического критерия линии волнового фронта заменяются наборами точек, которые соответствуют одинаковым значениям стоимостного критерия. Другими словами, вместо изохрон используются линии одинаковой стоимости, которые мы условно назвали изокостами. Каждая из точек предыдущего фронта формирует веер точек следующего уровня (см. рис. 2), а угол между соседними лучами соответствует некому выбранному пространственному разрешению. Дистанция приращения, т. е. радиус распространения вторичной волны от каждой точки  $S$  текущего волнового фронта в заданном направлении, рассчитывается как произведение соответствующей расчетной скорости движения на расчетный промежуток времени. Последний вычисляется как частное от деления кванта дискретизации алгоритма в единицах измерения критерия оптимизации на удельную стоимость  $C$  перемещения в текущей точке [17].

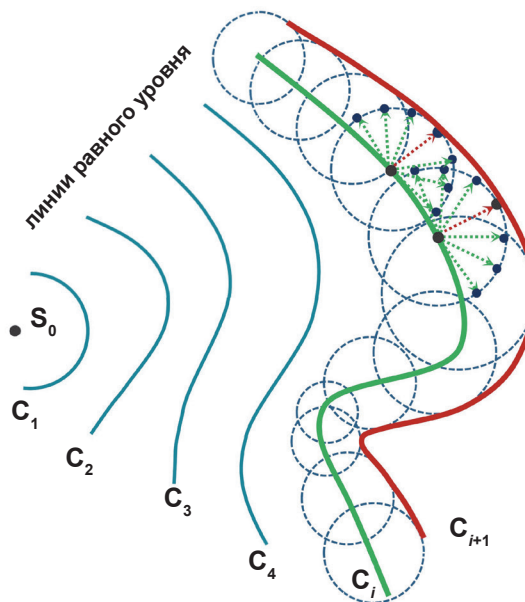


Рис. 2. Схема распространения изокост в волновом методе маршрутизации

Fig. 2. Isocost propagation in a wave-based routing method

В системе Boreas реализован оригинальный алгоритм волновой маршрутизации, который расширяет описанный базовый подход возможностью вычисления оптимального маршрута с учетом режима движения носом или кормой вперед, а также с учетом ледокольного сопровождения. Для редукции количества точек текущего волнового фронта используется специально разработанный алгоритм построения невыпуклой огибающей двумерного множества. Для волнового подхода характерна достаточно высокая вычислительная сложность, что, однако, компенсируется гладкой формой получаемых маршрутов.

Для наиболее эффективного использования положительных качеств различных подходов был также реализован комбинированный метод маршрутизации. При его использовании сначала с помощью быстрого сеточного алгоритма A\* производится поиск предварительного маршрута, после чего на основе полученной квазиоптимальной ломаной траектории очерчивается некоторая ограниченная географическая область, а затем решается задача распространения изолиний равной стоимости в пределах этой области. Такой способ позволяет получать гладкие и геометрически точные результаты за приемлемое время.

На рис. 3 представлены фрагменты процесса распространения изолиний стоимости (цветные точки) в ходе построения маршрута сеточным, волновым и комбинированным методами, а также результирующие маршруты. На этих рисунках ледовая обстановка отображается в виде единого параметра — интегральной проходимости, которая представляет собой нормированную достижимую скорость судна

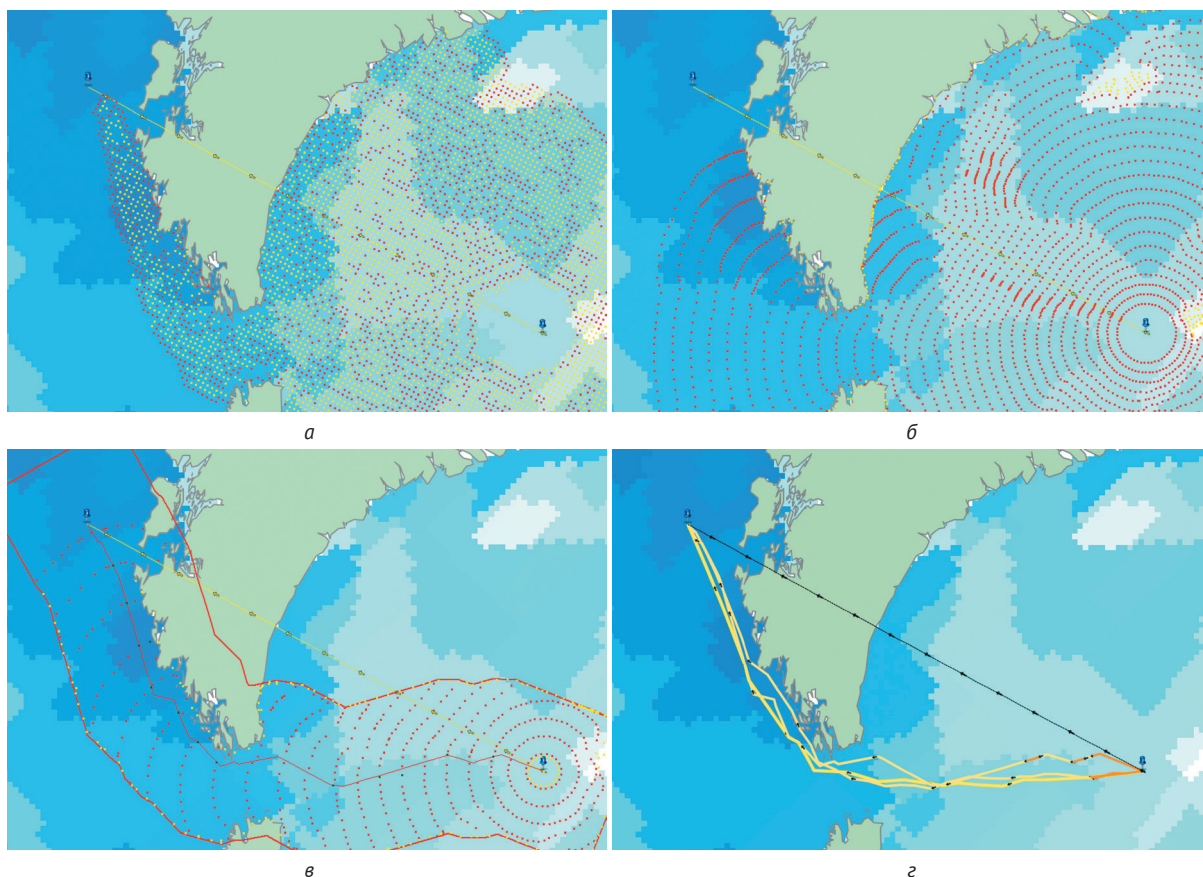


Рис. 3. Фрагменты процесса решения задачи маршрутизации и результирующие маршруты: *а* — распространение изолиний стоимости в методе  $A^*$ , *б* — распространение изолиний стоимости в волновом методе, *в* — распространение изолиний в ограниченном пространстве на втором этапе комбинированного метода, *г* — результирующие треки  
 Fig. 3. Fragments of the routing problem solving process and the resulting routes: *a* — the propagation of cost isolines in the  $A^*$  method, *б* — the propagation of cost isolines in the wave-based method, *в* — the propagation of isolines in a limited space at the second stage of the combined method, *г* — the resulting tracks

в точке с заданными характеристиками льда. Использование интегральной проходимости позволяет учесть и отобразить как весь комплекс характеристик льда, так и технические возможности судна. Чем светлее оттенок в точке акватории, тем более сложными являются ледовые условия, и наоборот, чем ближе оттенок к синему, тем легче лед.

Следует отметить, что использование различных методов оптимизации с разными настроечными параметрами приводит к различной форме получаемых оптимальных маршрутов (см. рис. 3г), дистанции и длительности переходов при этом также различаются. В некоторых случаях различия несущественны, а иногда достигают 10—20%, что свидетельствует о чувствительности получаемого результата к используемому методу оптимизации. Это предмет отдельного исследования, которое должно быть выполнено в дальнейшем.

#### Информационные модели судов

Информационная модель судна представляет собой набор формализованных и структурированных данных о различных характеристиках судна, кото-

рые используются в качестве входных параметров модели движения или алгоритма маршрутизации. В состав информационной модели входят следующие группы данных [14]: основные эксплуатационные параметры судна, главные размерения, характеристики судна в различных состояниях загрузки при движении носом или кормой вперед, информационное описание энергетической установки, характеристики групп движителей, параметры энергопотребления на непропульсивные нужды.

Модели судов хранятся в виде json-файлов в специальном репозитории системы Boreas и являются неотъемлемым компонентом информационной поддержки сервиса автоматической маршрутизации. Для их пополнения и редактирования в системе предусмотрены специальные интерфейсные компоненты (рис. 4).

#### Дополнительные возможности

Текущая версия системы автоматического рютинга поддерживает ряд дополнительных функций, которые можно задействовать при прокладке маршрута. Наибольший практический интерес

представляет функционал, позволяющий использовать predetermined фарватеры, проходящие через зоны ограниченного мореплавания.

Пример использования predetermined фарватеров при построении маршрута приведен на рис. 5, где строится маршрут из точки, находящейся в Карском море, в точку акватории Баренцева моря западнее острова Долгий. В первом случае фарватер, обеспечивающий проход по проливу Югорский Шар, считается закрытым для прохода, а во втором он открыт. Процесс распространения волны наглядно демонстрирует, каким образом изменяется рекомендованный маршрут в зависимости от наличия или отсутствия фарватера.

### Архитектура приложения

Система Boreas имеет модульную структуру, в которой помимо логического ядра математической оптимизации имеется провайдер параметров окружающей среды (ПОС), топологический процессор, а также модель расчета параметров движения.

Провайдер параметров окружающей среды представляет собой переходник между логическим ядром системы маршрутизации и базой природных данных, в которой хранятся сведения о динамически изменяющихся параметрах окружающей среды (погодных данных, ледовой обстановки). В базе природных данных все параметры разделены на диагностические и прогностические.

Топологический процессор предоставляет ядру системы возможность получать данные о статических объектах, имеющих географическую привязку, таких как береговая линия, районы ограниченного судоходства, отметки глубин и т. п. Функционал этого специализированного модуля включает в себя следующие базовые операции: определение факта пересечения элементарного участка маршрута с береговой линией, опреде-

Ввод/Редактирование: "MV Christophe De Margerie"

**MV Christophe De Margerie**

- Носом вперед
- Кормой вперед
- Состояния загрузки
  - В балласте
    - Носом вперед
    - Кормой вперед
  - В грузу, ледовая осадка
    - Носом вперед
    - Кормой вперед
- Энергетические установки
  - Главная энергетическая установка
- Группы винтов
  - Средний ГВ
    - Носом вперед
    - Кормой вперед
  - Бортовые ГВ
    - Носом вперед
    - Кормой вперед
- Режимы энергопотребления

**1. Идентификация**

Уникальный код	2534954575
Наименование	MV Christophe De Margerie
Описание	Арктический мембранный газовоз пр. 2418. Версия от 26.08....

**2. Эксплуатационные качества**

Назначение судна	Транспорт
Двойного действия	<input checked="" type="checkbox"/>
C	Arc7
NRT	38641
GRT	128806
Dw	96779
fd0	0.080
Ps_max	45000
Архитектурный тип	Танкер LNG

**3. Главные размеры**

Loa	299.00
Lpp	283.10
D	26.50
p	0.54
Bmax	50.00

Рис. 4. Описание информационной модели судна в приложении Boreas  
Fig. 4. Description of the vessel information model in the Boreas software

ление факта попадания точки в зону ограниченного или запрещенного мореплавания, получение величины глубины моря в конкретной географической точке. Топологический процессор может взаимодействовать с внутренней базой данных или внешней географической информационной системой.

Модель расчета параметров движения — это расчетный компонент, используемый ядром системы для вычисления параметров движения судна или каравана в конкретных ледовых условиях, в том числе при движении на чистой воде. В качестве входных данных для модели используются следующие характеристики: информационные модели судов, описание режима движения (носом или кормой вперед, в караване или самостоятельно), курс, набор параметров окружающей среды



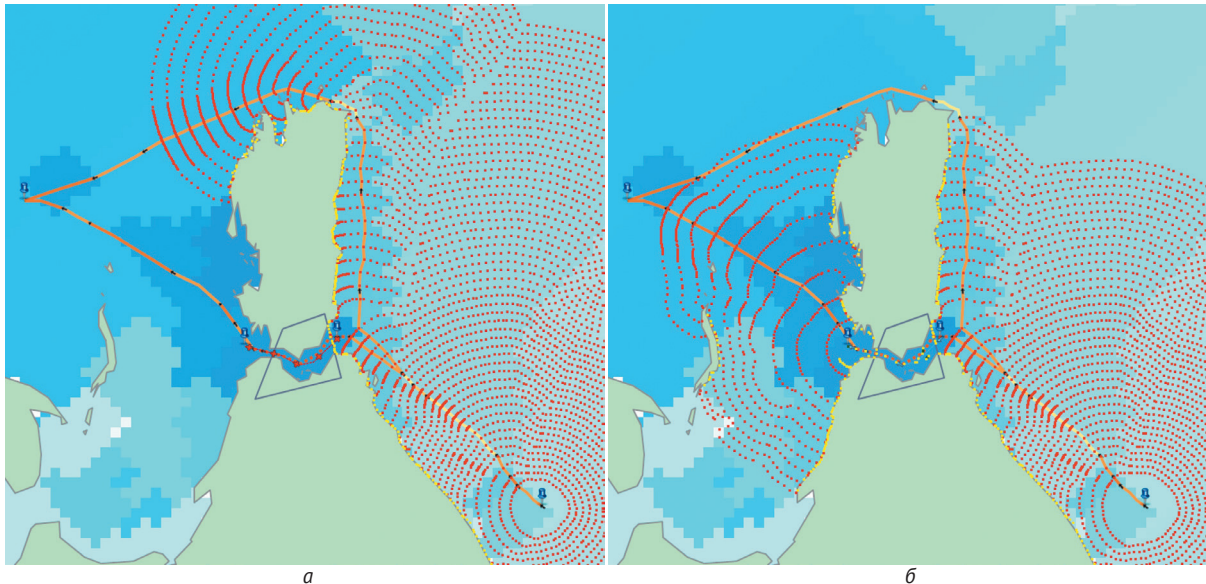


Рис. 5. Использование predefined фарватеров при построении оптимального маршрута на примере прохода через Югорский Шар: а – проход закрыт, б – проход открыт  
Fig. 5. The use of predefined fairways when building an optimal route (the example of vessel passage through the Yugorski Shar): а – the passage is closed, б – the passage is open

в текущей точке, режим использования мощности энергетической установки. На выходе определяются скорость и, в общем случае, удельная стоимость перемещения, вычисляемая на основе данных о расходе топлива и вспомогательных расходов.

Обобщение описанных выше свойств и возможностей системы Boreas представлено в виде функциональной схемы в нотации IDEF0 на рис. 6.

На базе разработанной программной платформы был реализован следующий набор конечных пользовательских решений прикладного характера:

- исследовательское десктопное приложение Boreas, функционирующее под управлением ОС Windows в среде .Net Framework;
- демонстрационный веб-сервис (wsRouting), функционирующий в среде .Net Core, который может



Рис. 6. Функциональная схема системы Boreas в нотации IDEF0  
Fig. 6. Functional diagram of the Boreas system in IDEF0 notation

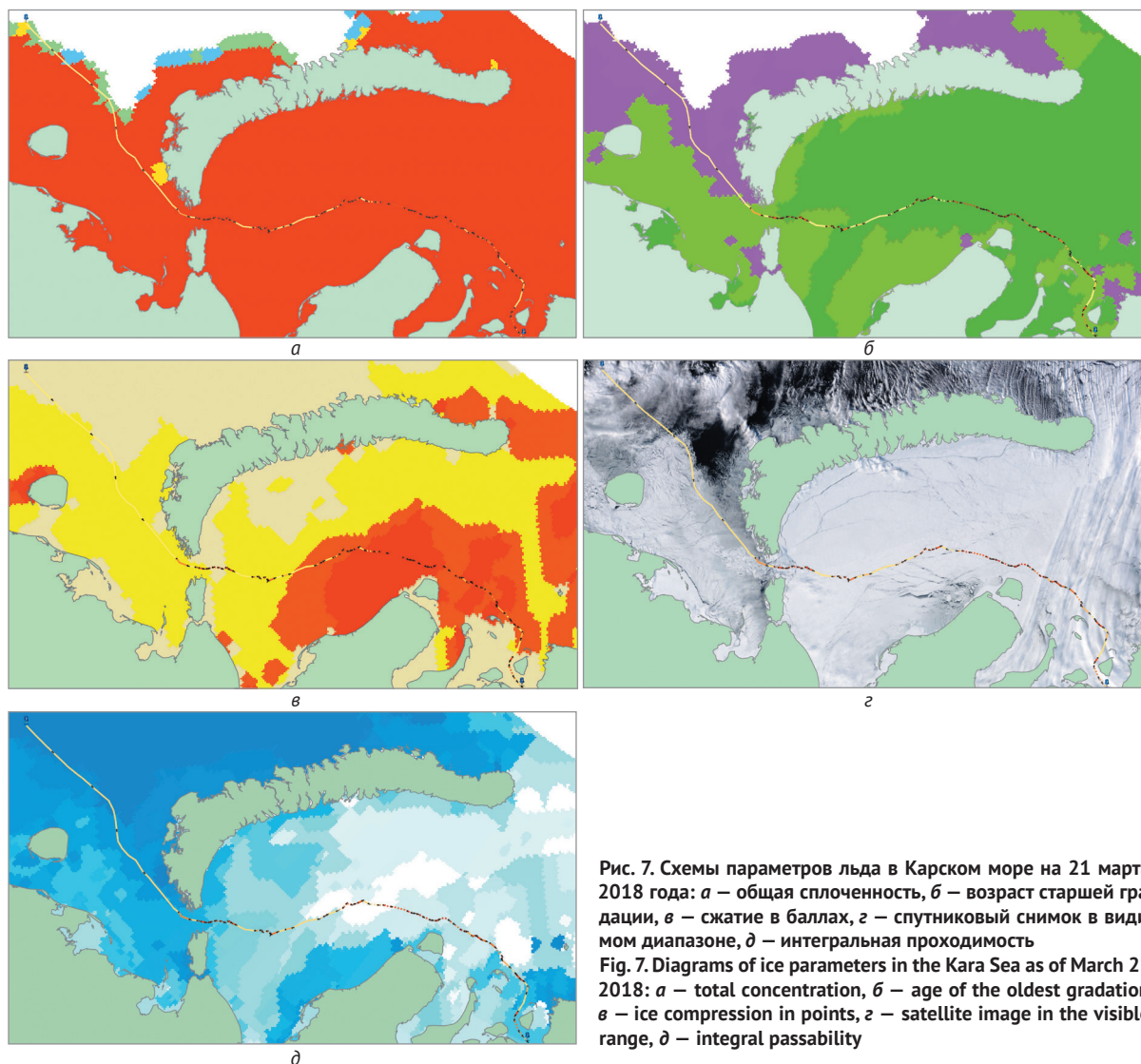


Рис. 7. Схемы параметров льда в Карском море на 21 марта 2018 года: а — общая сплоченность, б — возраст старшей градации, в — сжатие в баллах, г — спутниковый снимок в видимом диапазоне, д — интегральная проходимость  
Fig. 7. Diagrams of ice parameters in the Kara Sea as of March 21, 2018: а — total concentration, б — age of the oldest gradation, в — ice compression in points, г — satellite image in the visible range, д — integral passability

быть развернут в контейнере произвольного сервера приложений в любой операционной системе;

- консольное приложение для выполнения массовых расчетов траекторий движения, используемое как сервисный компонент для информационной поддержки имитационного моделирования арктических транспортных систем.

#### Примеры практического использования

В качестве примера использования системы Boreas приведем серию расчетов оптимальных маршрутов и их сопоставлений с фактическими данными для рейса контейнеровоза «Норильский никель» 19—22 марта 2018 г. из Дудинки в Мурманск. Фактический маршрут судна пролегал через Карские ворота, причем на участке западнее полуострова Ямал судно двигалось на удалении от берега, ближе к центру Карского моря. Согласно донесениям с борта судна, рейс проходил в условиях сплоченного восторщенного льда. В течение 21 марта судно двигалось в условиях сжатия интенсивностью 2—3 бал-

ла в среднем однолетнем льду (70—120 см), причем значительную часть пути в сжатиях судно прошло кормой вперед. Помимо маршрута через Карские ворота, избранного судоводителем, существует альтернативный маршрут вокруг мыса Желания, который в некоторых случаях оказывается более выгодным. В частности, по такому пути 4—6 апреля 2018 г. шел танкер «Штурман Альбанов», направлявшийся в Обскую губу. Поэтому в рамках сопоставительных расчетов был также рассмотрен альтернативный маршрут вокруг мыса Желания.

В качестве источника данных о ледовой обстановке были использованы векторные карты параметров льда, предоставленные специалистами Арктического и антарктического научно-исследовательского института (АНИИ). Даты составления ледовых прогнозов — 16 и 20 марта, т. е. в анализе использовалась сводная диагностическая карта от 20 марта, прогнозы на 19 марта от 16 марта, а также прогнозные карты на 21 и 22 марта от 20 марта. На рис. 7 показаны схемы распределения основных

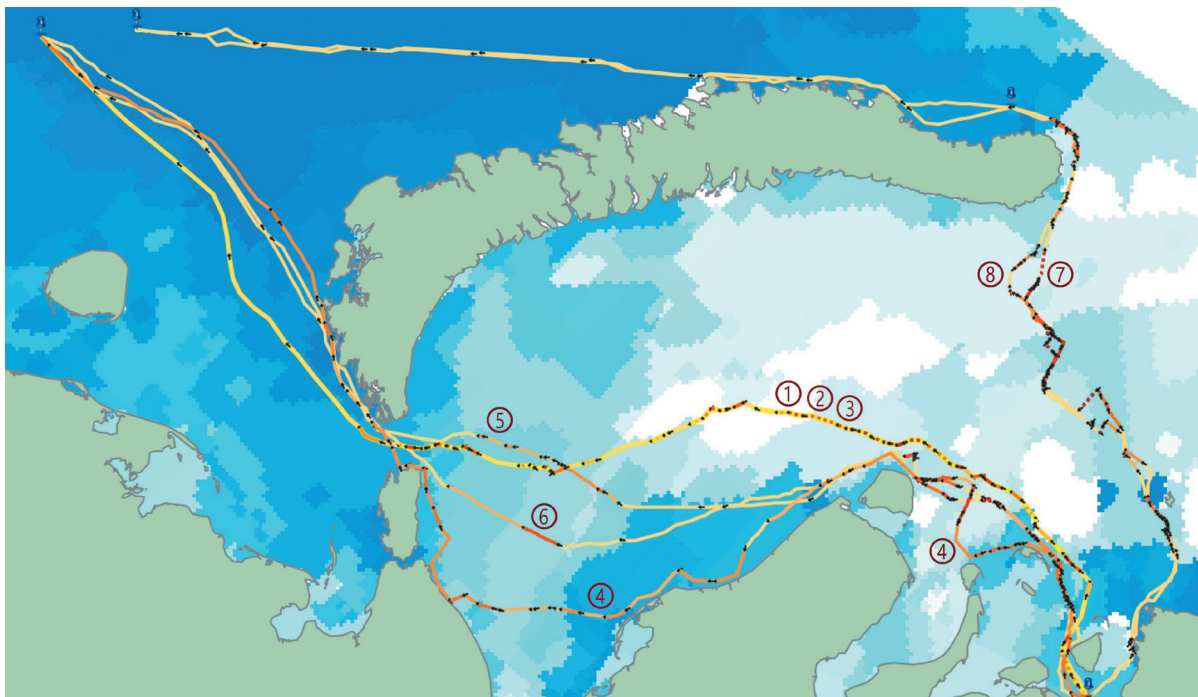


Рис. 8. Схемы анализируемых маршрутов. Ледовая обстановка в виде интегральной проходимости по состоянию на 21 марта 2018 г.

Fig. 8. Layout of the analyzed routes. Ice conditions in terms of integral passability. March 21, 2018

ледовых параметров на 21 марта, спутниковый снимок юго-западной части Карского моря на эту же дату и схема ледовой обстановки в виде интегральной проходимости. На каждой схеме рис. 7 показана траектория фактического перехода судна. Прогнозные данные о торосистости льда были недоступны, поэтому фактор торосистости не учитывался.

Можно отметить хорошее соответствие данных с борта судна и ледовых прогнозов. Например, участок фактического маршрута в центральной части Карского моря действительно проходит в районе сжатий, которые были спрогнозированы, а прогнозная толщина льда принципиально соответствует наблюдениям с борта. Также отметим, что, несмотря на практически постоянную сплоченность льда (рис. 7а) и незначительное изменение некоторых других характеристик, воздействие всего комплекса ледовых параметров на скорость судна приводит к очень неравномерной картине изменения интегральной проходимости судна (рис. 7д) в пространстве и времени. Это, с одной стороны, подтверждает возможность и целесообразность постановки задачи о поиске оптимального пути во льдах на оперативном уровне, с другой — свидетельствует о том, что при этом должны учитываться все ледовые параметры, а не только некоторые из них.

В ходе дальнейшего анализа помимо фактического трека судна был рассмотрен ряд дополнительных маршрутов. Их схемы приведены на рис. 8, а сводные показатели — в табл. 2. На рис. 8 пунктиром показаны те участки трека, на которых суд-

но двигалось кормой вперед, а цвет отображает скорость судна: чем ближе оттенок к багровому, тем скорость ниже.

На первом этапе был выполнен расчет движения судна по фактическому треку с учетом известных участков работы судна носом и кормой вперед. При этом использовались эксплуатационный режим движения (трек 2) и движение с максимальной скоростью (трек 3). Траектории треков 2 и 3 совпадают с фактическим маршрутом 1, однако время прохождения каждой точки при этом разное. Как видно, на эксплуатационном режиме расчетная длительность перехода хорошо соответствует натурным данным, отклоняясь от них на 4% в меньшую сторону. Расходы топлива при этом оказываются на 10% выше фактических. При движении с максимальной скоростью расчетная длительность снижается на 4 ч, а суммарные расходы топлива при этом практически не увеличиваются, что является следствием экономии времени. Можно отметить, что получаемые на основе модели движения суммарное время перехода и расходы топлива достаточно хорошо соответствуют натурным данным.

На втором этапе анализа производилась оптимизация маршрута с использованием волнового метода. Наряду с эксплуатационным режимом движения судна (трек 5) и работой на максимальной скорости (трек 6) было также рассмотрено движение судна с экономичной скоростью (трек 4). Последняя определяется по условию минимального расхода топлива на единицу пройденного пути.

Таблица 2. Сводные показатели альтернативных треков судна

Показатель	Движение по фактическому треку			Роутинг по маршруту через Карские ворота			Роутинг по маршруту вокруг мыса Желания	
	Факт	Экспл	Макс	Эконом	Экспл	Макс	Экспл	Макс
	Номер трека (см. рис. 8)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Время отправления	19.03.2018 00:00							
Время прибытия	23.03. 2018 20:08	23.03. 2018 15:12	23.03. 2018 11:02	24.03. 2018 16:06	22.03. 2018 21:11	22.03. 2018 06:48	23.03. 2018 12:28	22.03. 2018 23:29
Длительность рейса: календарная (дд:чч:мм) сут	04:20:08 4,84	04:15:12 4,63	04:11:02 4,46	05:16:06 5,67	03:21:11 3,88	03:06:48 3,28	04:12:28 4,52	03:23:29 3,98
Дистанция, морские мили	871	871	871	1006	861	855	1023	1042
Расход топлива, т	289	317	314	203	221	240	258	288
Средняя скорость, уз	7,5	7,8	8,1	7,4	9,2	10,9	9,4	10,9
Разница по длительности, %	—	–4	–8	17	–20	–32	–7	–18
Разница по расходу топлива, %	—	10	9	–30	–24	–17	–11	0

**Примечание:** Факт — фактические данные, Эконом — экономичный режим движения, Экспл — эксплуатационный режим движения, Макс — режим движения судна с максимальной скоростью.

Отметим, что движение на экономичном режиме в целом не характерно для судов типа «Норильский никель» и рассматривается здесь исключительно в качестве примера. Все три оптимизированных маршрута проходят через Карские ворота и позволяют сэкономить 20% времени и 24% топлива на эксплуатационном режиме, или 32% времени и 17% топлива в режиме максимальной скорости. Дистанция перехода при этом практически не изменяется и составляет порядка 850—870 миль. Наибольшая экономия топлива достигается в экономичном режиме и составляет 30%, однако длительность рейса при этом возрастает на 17%, а дистанция перехода увеличивается до 1006 миль. Все оптимизированные треки проходят ближе к полуострову Ямал, что позволяет более эффективно использовать локальную зону слабого льда вблизи западного берега полуострова. На участке до острова Белый треки 4, 5 и 6 различаются незначительно, исключение составляет только участок трека 4 вблизи устья Обской губы. Однако на участке от острова Белый до Карских ворот наблюдается существенное расхождение этих траекторий, полученных для различных режимов движения. Отличия обусловлены локальными ледовыми условиями на указанном участке

в момент подхода к нему судна. В Карских воротах траектории вынужденно сближаются, после чего существенных различий между ними не наблюдается из-за относительно легких условий Баренцева моря. Приведенный пример хорошо демонстрирует пространственно-временной характер ледовой маршрутизации, при котором локальные условия в каком-либо даже относительно небольшом районе моря могут существенно изменить дальнейший оптимальный маршрут. Это, в свою очередь, говорит о целесообразности разработки алгоритмов одно-временной оптимизации траектории и скоростного режима движения судна во льдах.

Третий этап анализа заключался в оценке альтернативного пути, проходящего вокруг мыса Желания. Конечная точка маршрута при этом была несколько смещена севернее для выполнения условия равного расстояния до Мурманска. Трек 7 соответствует случаю движения судна на эксплуатационном режиме, трек 8 — движению с максимальной скоростью. Как видно из данных табл. 3, маршруты, проходящие вокруг мыса Желания, уступают соответствующим трекам 5 и 6 как по длительности, так и по расходу топлива. Причина этого — сильные сжатия, наблюдавшиеся 20 марта



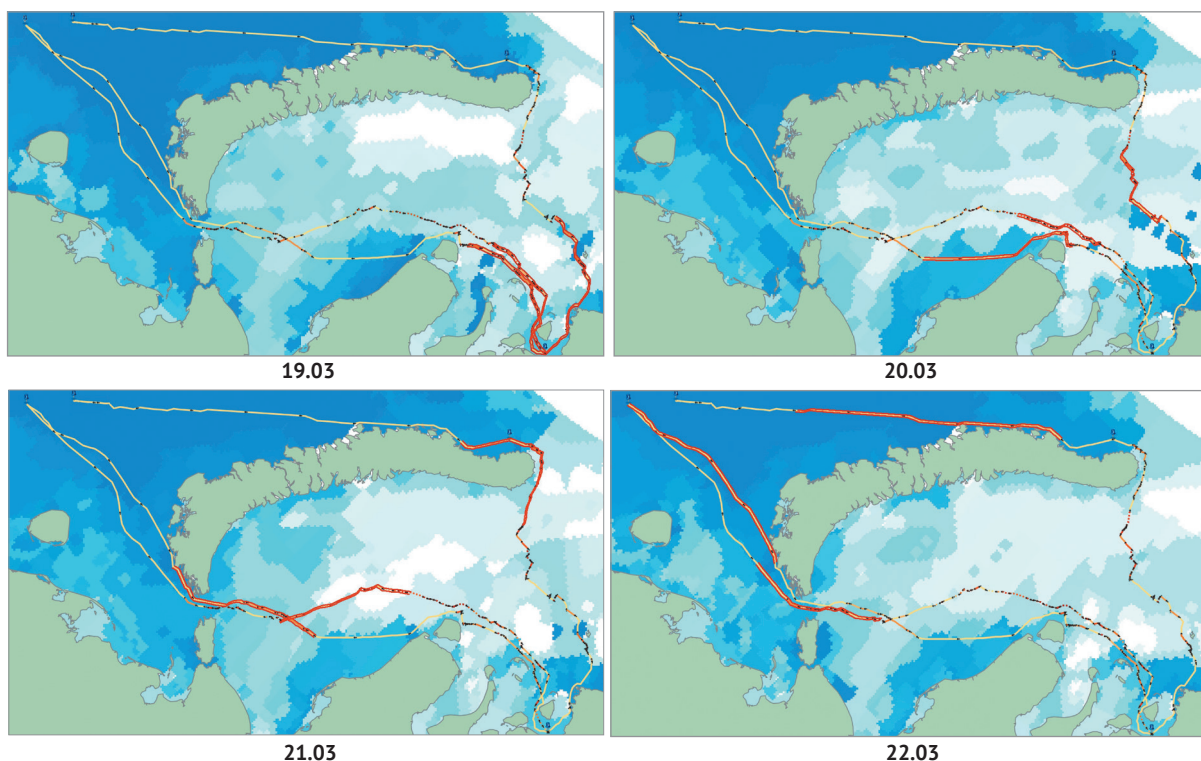


Рис. 9. Ежесуточные срезы ледовой обстановки и положения судна при движении по фактическому треку и оптимизированным трекам на эксплуатационном режиме

Fig. 9. Daily snapshots of ice conditions and the vessel position when moving along the actual track and optimized tracks at the operational mode of movement

на участке между выходом из Енисейского залива и мысом Желания, а также относительно тяжелые льды в этом районе. Влияние указанных факторов не компенсируется даже участком слабого льда и чистой воды, который расположен западнее Новой Земли. Таким образом, согласно расчетам, маршрут вокруг мыса Желания в данном конкретном случае оказывается менее выгодным, чем маршрут через Карские ворота.

Для лучшего понимания особенностей рассмотренных треков на рис. 9 приведены ежесуточные срезы ледовой обстановки и положения судна при движении по фактическому пути 1 и оптимизированным трекам 5 и 7, которые соответствуют эксплуатационному режиму. Красным цветом на рисунке выделены участки треков, которые судно проходило в текущую дату. Видно, что основное преимущество трека 5 перед треком 1 сформировалось 20 марта за счет движения по относительно легкому льду вблизи полуострова Ямал.

Приведенный комплекс расчетов свидетельствует о потенциальной возможности использования сервиса оптимальной маршрутизации при решении прикладных задач информационного сопровождения судоходства в Арктике. Однако правильное понимание полученных результатов невозможно без осознания множества факторов неопределенности, характерных для ледового роутинга на данном этапе раз-

вития этой технологии [8]. Например, при выполнении приведенного выше анализа отсутствовали данные о торосистости, тогда как их наличие могло изменить траекторию оптимального маршрута вблизи западного берега полуострова Ямал, где в условиях однолетнего тонкого льда могут образовываться зоны высокого торосения. Помимо явных факторов существует целый ряд не учитываемых параметров, которые могут существенно влиять на результат. К ним относятся, например, данные о разрывах сплошности ледяного покрова, которые в настоящее время систематически не диагностируются и не представляются на ледовых картах. Таким образом, сервис автоматической маршрутизации во льдах на текущем этапе может служить только в качестве инструмента в руках ледового эксперта. В будущем по мере увеличения полноты и детализированности диагностической и прогностической информации о состоянии ледяного покрова роль методов автоматической маршрутизации может существенно измениться.

Помимо решения оперативных задач функционал системы Boreas может использоваться и в прикладных исследованиях работы морских транспортных систем. Например, при создании имитационной модели круглогодичной работы арктической контейнерной линии система Boreas была использована нами для выполнения массовых расчетов маршрутов движения арктических

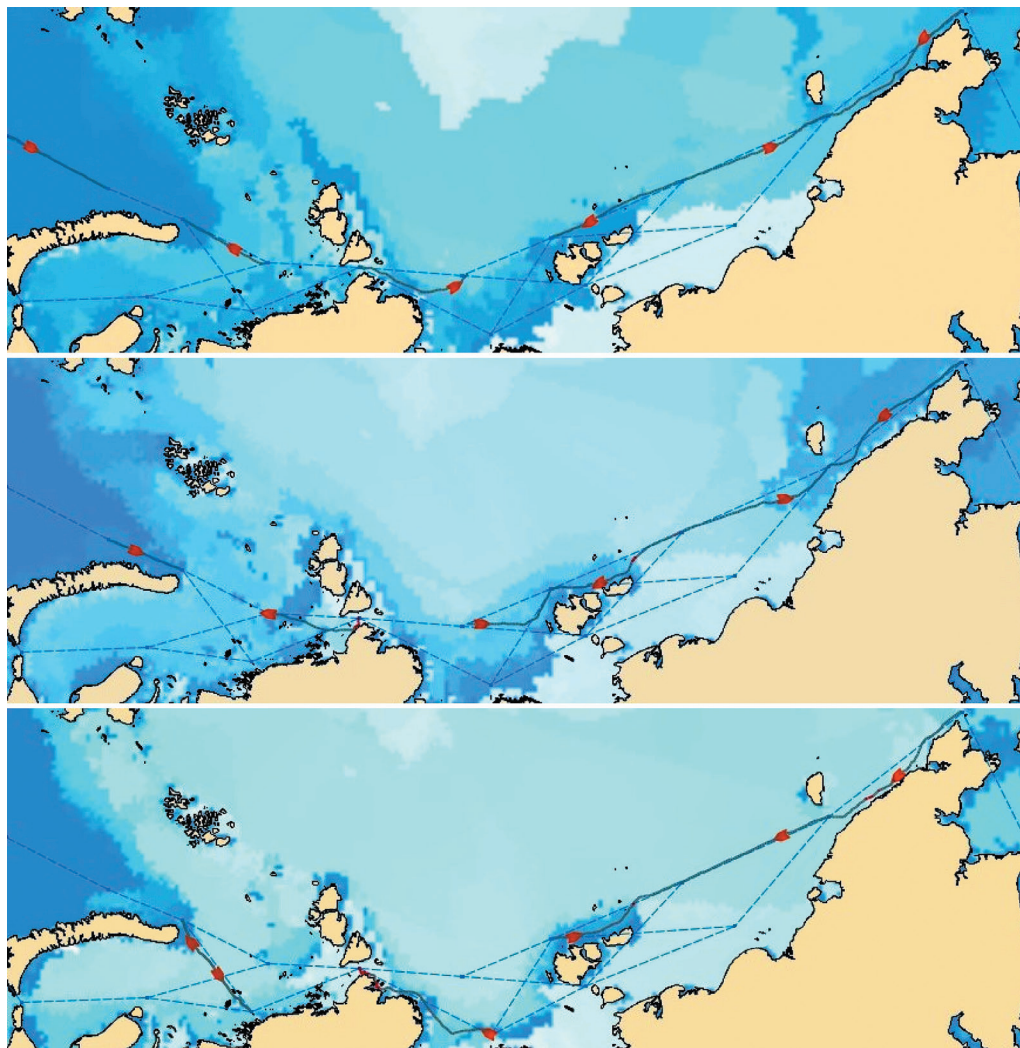


Рис. 10. Движение судов-агентов по предрасчитанным оптимальным маршрутам на ребрах топологического графа в ходе работы имитационной модели арктической контейнерной линии  
Fig. 10. The movement of agent ships along the pre-calculated optimal routes on the edges of the topological graph while running the simulation model of the Arctic container line

контейнеровозов по ребрам заданного топологического графа. Для этого была создана специальная программная утилита, которая позволяет обращаться к функционалу системы Boreas в невидимом режиме и выполнять пакетные расчеты для множества заранее заданных конфигураций. Каждая конфигурация характеризуется конкретным типом арктического судна и определенной картой ледовой обстановки в Арктике. В качестве сведений о ледовых условиях были использованы архивные данные ААНИИ за 2000—2020 гг., имеющие недельную дискретность и содержащие полный перечень необходимых ледовых параметров. Общее число решенных в этом проекте задач ледовой маршрутизации составило: 7 вариантов судов  $\times$  9 лет  $\times$  52 карты в году  $\times$  24 ребра на графе  $\times$  2 режима движения судна (с ледоколом и без него), т. е. более 150 тыс. расчетов. Для по-

строения оптимальных маршрутов использовался волновой метод, а общее время вычислений на выделенном вычислительном сервере с 16 процессорами в параллельном режиме составило около недели. Основным результатом этой работы стала заполненная база данных маршрутов, которая использовалась при имитационном моделировании движения судов (рис. 10). Помимо этого в ходе массовых расчетов было выполнено всестороннее тестирование и произведен анализ эффективности и вычислительной устойчивости разработанных алгоритмов ледовой маршрутизации.

### Заключение

Функционал автоматизированного построения маршрутов судов в ледовых условиях является одним из важнейших компонентов системы информационной поддержки арктического судоходства [18].

Своевременная выдача рекомендаций о пути следования судна в условиях постоянно изменяющейся ледовой обстановки позволит существенно повысить эффективность и безопасность мореплавания, что особенно актуально в условиях предстоящей интенсификации судоходства в Арктике. Однако реальный эффект от внедрения системы ледовой маршрутизации не может быть получен без выполнения достаточно объемных исследований, направленных на детальный анализ всех компонентов единого решения. Помимо собственно алгоритмов ледового роутинга к таким компонентам относятся сервисы получения спутниковых данных и автоматического распознавания снимков, методы создания электронных диагностических карт и формирования на их основе ледовых прогнозов, а также модели движения судов в произвольных природных условиях. Опыт выполненных ранее исследований в области ледовой маршрутизации говорит о комплексности данной проблемы и невозможности ее быстрого решения, что обусловлено ее тесной связью с уровнем развития цифровых технологий и средств дистанционного зондирования.

Исследования, составившие содержание настоящей статьи, направлены на создание инструментов для анализа различных аспектов работы системы ледовой маршрутизации и ее компонентов. Представляется, что в результате такого анализа можно будет выделить потенциальные слабые звенья будущей комплексной системы и определить вектор приложения наибольших усилий для ее доведения до индустриального, практически востребованного образца.

## Литература/References

1. Zis T. P. V., Psaraftis H. N., Li D. Ship weather routing: A taxonomy and survey. *Ocean Engineering*, 2020, vol. 213, p. 18. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107697.
2. Final Public Report of the ARCDEV Project. 1998. Available at: <https://trimis.ec.europa.eu/sites/default/files/project/documents/arcdev.pdf>.
3. Миронов Е. У., Смирнов В. Г., Бычкова И. А. и др. Экспериментальный аппаратно-программный комплекс спутникового мониторинга и прогноза ледовой обстановки // *Проблемы Арктики и Антарктики*. — 2017. — № 2 (112). — С. 15—27. Mironov E. U., Smirnov V. G., Bychkova I. A. et al. Experimental hardware-software complex of satellite monitoring and forecast of ice conditions. *Problemy Arktiki i Antarktiki*, 2017, vol. 112, no. 2, pp. 15—27. (In Russian).
4. Таровик О. В. Модели для прогнозирования параметров рейсов судов в Арктике: существующие подходы и возможные пути развития // *Арктика: экология и экономика*. — 2021. — Т. 11, № 3. — С. 422—435. — DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435. Tarovik O. V. Models to predict the parameters of ship voyages in the Arctic: existing approaches and possible ways of development. *Arktika: ekologiya i ekonomika*.

- [*Arctic: Ecology and Economy*], 2021, vol. 11, no. 3, pp. 422—435. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-3-422-435. (In Russian).
5. Topaj A. G., Tarovik O. V., Bakharev A. A., Kondratenko A. A. Optimal ice routing of a ship with icebreaker assistance. *Applied Ocean Research*, 2019, 86, pp. 177—187. DOI: 10.1016/j.apor.2019.02.021.
6. Choi M., Yamaguchi H., De Silva L. W. A. Application of genetic algorithm to ship route optimization in ice navigation. *Proc. of the 22nd POAC*, 2013.
7. Kotovirta V., Jalonon R., Axell L., Riska K., Berglund R. A system for route optimization in ice-covered waters. *Cold Regions Science and Technology*, 2009, 55, pp. 52—62. DOI: 10.1016/j.coldregions.2008.07.003.
8. Topaj A., Bakharev A., Tarovik O. Comparative analysis of uncertainty factors in the problem of optimal ice routing. *Proc. of the 26th POAC*, 2021.
9. Lehtola V. V., Montewka J., Salokannel J. Sea Captains' Views on Automated Ship Route Optimization in Ice-covered Waters. *The J. of Navigation*, 2020, 73 (2), pp. 364—383. DOI: 10.1017/S0373463319000651.
10. Walther L., Rizvanolli A., Wendebourg M., Jahn C. Modeling and optimization algorithms in ship weather routing. *e-Navi* 4, 2016, pp. 031—045. DOI: 10.1016/j.enavi.2016.06.004.
11. Ван Х., Ли П., Сюэ Ю., Коровкин М. В. Построение маршрута с помощью улучшенного метода изохрон при минимизации времени плавания и с учетом прогноза погоды // *Вестн. С.-Петербург. ун-та. Сер. 10. Прикладная математика и информатика; Процессы управления*. — 2017. — Т. 13, вып. 3. — С. 286—299. Wang Hongbo, Li Pengfei, Xue Yuanyuan, Korovkin M. V. Application of improved isochron method in ship's minimum voyage time weather routing. *Vestn. S.-Peterburg. un-ta. Ser. 10. Prikladnaya matematika i informatika; Protsessy upravleniya*, 2017, vol. 13, iss. 3, pp. 286—299. (In Russian).
12. Sotnikova M., Veremey E. Algorithms for motion optimization on a given trajectory taking into account weather forecast and constraints. *Proc. of 17th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization*, 2018, 17, p. 25b.
13. Ma D. F., Ma W. H., Jin S., Ma X. L. Method for simultaneously optimizing ship route and speed with emission control areas. *Ocean Engineering*, 2020, 202, p. 107170. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107170.
14. Таровик О. В., Топаж А. Г., Крестьянцев А. Б., Кондратенко А. А. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ // *Арктика: экология и экономика*. — 2017. — № 1 (25). — С. 86—101. Tarovik O. V., Topaj A. G., Krestyantsev A. B., Kondratenko A. A. Arctic Marine Transport System Simulation: Multidisciplinary Approach Fundamentals and Practical Experience. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [*Arctic: Ecology and Economy*], 2017, no. 1 (25), pp. 86—101. (In Russian).



15. Zaccone R., Ottaviani E., Figari M., Altosole M. Ship voyage optimization for safe and energy-efficient navigation: A dynamic programming approach. *Ocean Engineering*, 2018, 153, pp. 215—224. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.100.
16. Zhu X., Wang H., Shen Z., Lv H. Ship weather routing based on modified Dijkstra algorithm. *Proc. of 6th International Conference on Machinery, Materials, Environment, Biotechnology and Computer (MMEBC 2016)*, pp. 696—699, 2016.
17. Topaj A., Tarovik O., Bakharev A. Modification of ship routing algorithms for the case of navigation in ice. *Proceedings of the International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (POAC)*, 2019.
18. Тимофеев О. Я., Таровик О. В., Топаж А. Г. и др. Концепция централизованной информационной системы для планирования работы флота в Арктике // *Арктика: экология и экономика*. — 2019. — № 1 (33). — С. 129—143.
- Timofeev O. Ya., Tarovik O. V., Topaj A. G., Mironov E. U., Frolov S. V., Buyanov A. S., Gorbachev M. A., Bengert A. A. The concept of an integrated information system for planning of fleet operation in the Arctic. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2019, no. 1 (33), pp. 129—143. DOI: 10.25283/2223-4594-2019-1-129-143. (In Russian).

### Информация об авторах

**Топаж Александр Григорьевич**, доктор технических наук, заместитель генерального директора по научной работе, ООО «Бюро Гиперборея» (191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А, пом. 511), e-mail: aleksandr.topazh@bureauhyperborea.ru.

**Таровик Олег Владимирович**, кандидат технических наук, технический директор, ООО «Бюро Гиперборея» (191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А, пом. 511), e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru.

**Бахарев Андрей Александрович**, руководитель отдела программной разработки, ООО «Бюро Гиперборея» (191015, Россия, Санкт-Петербург, Кавалергардская ул., д. 6, лит. А, пом. 511), e-mail: andrey.bakharev@bureauhyperborea.ru.

### Библиографическое описание данной статьи

Топаж А. Г., Таровик О. В., Бахарев А. А. Автоматическая маршрутизация судов во льдах: постановка задачи и инструменты решения // *Арктика: экология и экономика*. — 2022. — Т. 12, № 1. — С. 123—139. — DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-123-139.



## AUTOMATIC ROUTING OF VESSELS IN ICE: PROBLEM STATEMENT AND SOLUTION TOOLS

Topaj, A. G., Tarovik, O. V., Bakharev, A. A.  
LLC Bureau Hyperborea (St. Petersburg, Russian Federation)

The article was received on September 28, 2021

### Abstract

Development of the applied solutions to optimize ship path in dynamic ice environment is one of the urgent problems due to the ongoing growth of Arctic shipping. Ice routing makes it possible to increase the efficiency of sea transportation, reduce the risks of ship operation in ice, and minimize the negative anthropogenic impact on the atmosphere.

This article describes in a concentrated form the authors' experience in this area and presents Boreas, the developed research software application for automatic ice routing. Mathematical formulation of ice routing task is based on a universal economic criterion that allows optimizing not only a trajectory, but also the amount of icebreaker assistance, ship operation modes (astern or bow forward), and some other aspects of ice navigation. Functionality and architecture of the Boreas software allow carrying out various studies in the field of ice routing. The application supports alternative ice data sources and various speed regimes of a ship. It allows using different search algorithms (grid, wave-based, and combined) and considers numerous navigation features (predefined fairways, navigation depths, and restricted areas). As an example of using the Boreas software, we compared the route of Norilskiy Nickel containership from Dudinka to Murmansk on March 19–22, 2018 with several automatically generated routes for various speed regimes.

Based on our experience and the results of this study, we can state that the development of applied solutions for Arctic routing is significantly complicated by multiple sources of uncertainty and requires further research. The article formulates a list of scientific and technical problems that need to be solved for the comprehensive understanding and further implementation of ice routing technologies in the practice of ship navigation in the Arctic.

**Keywords:** Arctic shipping, ice routing, operations research, ice performance of ships, software.

---

### Information about the authors

**Topaj, Alexandr Grigorievich**, Doctor of Engineering Science, Deputy General Director for Research, Bureau Hyperborea LLC (room 511, lit. A, Kavalergardskaya ul., 6, St. Petersburg, Russia, 191015), e-mail: aleksandr.topazh@bureauhyperborea.ru.

**Tarovik, Oleg Vladimirovich**, PhD of Engineering Science, Technical Director, Bureau Hyperborea LLC (room 511, lit. A, Kavalergardskaya ul., 6, St. Petersburg, Russia, 191015), e-mail: oleg.tarovik@bureauhyperborea.ru.

**Bakharev, Andrey Aleksandrovich**, Head of software development department, Bureau Hyperborea LLC (room 511, lit. A, Kavalergardskaya ul., 6, St. Petersburg, Russia, 191015), e-mail: andrey.bakharev@bureauhyperborea.ru.

### Bibliographic description of the article

Topaj, A. G., Tarovik, O. V., Bakharev, A. A. Automatic routing of vessels in ice: problem statement and solution tools. *Arktika: ekologiya i ekonomika*. [Arctic: Ecology and Economy], 2022, vol. 12, no. 1, pp. 123–139. DOI: 10.25283/2223-4594-2022-1-123-139. (In Russian).

© Topaj A. G., Tarovik O. V., Bakharev A. A., 2022