

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГРУЗОЧНО-РАЗГРУЗОЧНЫХ ОПЕРАЦИЙ СУДНА В ПРОЦЕССЕ ПЕРЕВОЗОК ПО СЕВЕРНОМУ МОРСКОМУ ПУТИ

М.К. Есеев/**, В.Б. Коробов*/***, Д.Н. Макаров*/**, В.И. Матвеев*/**, А.Г. Тутыгин**

*Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова РАН
(г. Архангельск)

**Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова
(г. Архангельск)

***Институт океанологии имени П.П. Ширшова РАН
(г. Москва)

Доставка людей и различных грузов на побережье и острова Северного Ледовитого океана – насущная задача при организации научно-исследовательских, геолого-разведочных и других экспедиций, обеспечении работы буровых по добыче нефти и газа, жизнедеятельности поселений в Арктической зоне Российской Федерации. Создание транспортной инфраструктуры и управление ею требует учета важных природных и экономических особенностей, присущих этому региону. Необходима разработка оригинальных подходов и методов математического моделирования при решении транспортных логистических задач. Поиск оптимального географического положения для места разгрузки судна с использованием вертолета очень важен, поскольку такой способ разгрузки затратен. Авторами разработана математическая модель нахождения географического места для максимально выгодной, по цене или времени, доставки груза с грузового судна с использованием вертолета в необходимые точки разгрузки. На примере разработанной модели показано, что транспортировка грузов в район Обско-Тазовской губы может дать значительные экономические и временные выгоды при осуществлении северного завоза на труднодоступные гидрометеорологические станции Росгидромета. Найдены ограничения по массе перевозимых грузов с учетом критериев минимизации по времени и стоимости, а также с учетом распределения грузов между различными точками. Решение выполнено вне рамок традиционно применяемого подхода транспортной задачи, что позволило повысить точность и уменьшить время вычислений. Выработаны конкретные рекомендации для менеджера, осуществляющего управление процессом погрузки-разгрузки на судне, с учетом возможных вариантов. Определены стоимостные затраты и затраты по времени для типичных задач в зависимости от стоимости вертолеточаса, судосуток и т. д.

Ключевые слова: транспортная логистика, Северный морской путь, грузоперевозки в Арктике, линейное программирование, погрузочно-разгрузочные операции, транспортная задача.

Контактное лицо: Есеев Марат Каналбекович, адрес: 163000, Архангельск, просп. Ломоносова, д. 4; e-mail: m.eseev@narfu.ru

Для цитирования: Есеев М.К., Коробов В.Б., Макаров Д.Н., Матвеев В.И., Тутыгин А.Г. Моделирование погрузочно-разгрузочных операций судна в процессе перевозок по Северному морскому пути // Arctic Environmental Research. 2017. Т. 17, № 4. С. 273–282. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.273

Освоение и развитие Арктической зоны Российской Федерации требует решения целого комплекса задач и проблем. Одно из важнейших направлений при этом – осуществление грузоперевозок по Северному морскому пути для снабжения арктических территорий необходимым оборудованием, материалами и т. д. Создание транспортной инфраструктуры и управление ею требует учета важных природных и экономических особенностей, присущих этому региону. Необходима разработка оригинальных подходов и методов математического моделирования при решении транспортных задач.

Как известно, транспортная задача в классической постановке была решена в 40-е годы XX века советским математиком, нобелевским лауреатом по экономике Л.В. Канторовичем [1]. В последующем прогресс в области линейного программирования, создания банков и баз данных и машинных вычислений позволил проектировать интеллектуальные системы, управляющие транспортными потоками. Однако все возрастающая детализация рассматриваемых задач и учет их специфики в каждом конкретном случае заставляют искать новые математические инструменты и методы [2–7], поэтому исследования в данной области до сих пор актуальны и востребованы как с фундаментальной, так и с прикладной точки зрения. Особое место при этом занимают физические методы и подходы [2], которые позволяют посредством аналогий успешно решать транспортные задачи с применением адаптированного математического аппарата.

Методы математической физики, статистики, термодинамики и др. активно используются в теории и практике логистики перевозок. В качестве примеров можно привести уподобление транспортных потоков потокам жидкости с использованием теоретического аппарата гидродинамики, гравитационную и энтропийную модели взаимосвязей между потребителями и поставщиками, диффузионные аналогии грузоперевозок и т. д. В данной работе излагается оригинальный метод решения транс-

портной задачи по погрузке-разгрузке судна в нескольких портопунктах с целью выбора оптимального способа и места расположения транспортных средств. В расчет принимаются экономическая целесообразность, затраты по времени и возможности судна подходить к берегу для выгрузки.

Слабая развитость транспортной инфраструктуры в Арктике – причина существенных потерь времени при доставке грузов в пункты, расположенные на побережье и островах Северного Ледовитого океана и его морей. Как показал анализ ситуации [8], единственным способом доставки грузов в эти пункты является морской транспорт. Особенно остро стоит проблема завоза на труднодоступные гидрометеорологические станции, для большинства из которых морские суда – единственная и безальтернативная возможность снабжения их продовольствием, горюче-смазочными материалами (ГСМ) и смены полярников [9]. Отсутствие достаточного количества оборудованных причалов у портов, небольшие глубины в прибрежной зоне и состояние побережий делают невозможным выгрузку судна на берег в большинстве мест. Для этого используются вертолеты на борту судна, а также распузка – перегрузка на небольшие суда и понтоны. В то же время, когда требуется доставлять грузы и людей к близко расположенным пунктам, при определенных параметрах грузов может возникнуть проблема оптимального расположения грузового судна в акватории, чтобы использование вертолетов было наиболее эффективным по цене или по времени [10]. Обычно такая задача решается методами, не основанными на математическом моделировании. К таким методам можно отнести оценочный подход, который основан на выборе интуитивно-целесообразного расположения и оценке по стоимости такого места разгрузки. Когда задача многофакторная, конечно, при таком подходе невозможно оценить правильность выбора оптимальной точки разгрузки. Именно поэтому необходимо применять многопараметрические математические модели, с помощью которых можно сделать точный

выбор оптимальной точки разгрузки. Мы используем и развиваем подход, предложенный в [10], с определением ограничений на массу перевозимых грузов с учетом временных и стоимостных затрат.

Материалы и методы. Рассмотрим задачу о нахождении географического места для максимально выгодной перевозки груза судном и вертолетом до необходимых пунктов выгрузки. В этой задаче есть два фактора, которые следует принять во внимание: 1) стоимость или время, затраченные при перевозке груза вертолетом из точки остановки судна; 2) стоимость или время, затраченные при перевозке из точки отправления судна до точки его разгрузки вертолетом. Рассмотрим их отдельно.

1. Разгрузка судна вертолетом. Эта задача связана с транспортной задачей [1, 5–7], где один пункт производства – это судно с грузом, а n пунктов потребления – это географически закрепленные места. В рассматриваемой задаче необходимы следующие данные: a – объем производства (имеется один пункт производства – это судно с грузом); b_j – объем потребления в пункте j ; c_{1j} – затраты на перевозку единицы продукта от судна до пункта j при выбранном маршруте. Суммарное производство $a = \sum_{j=1}^n b_j$ равно суммарному потреблению (весь необходимый груз должен быть вывезен с судна). Обозначим p_{1j} – объем перевозок от судна до пункта j , причем должны выполняться условия $\sum_{j=1}^n p_{1j} = a$ и $p_{1j} = b_j$. Для решения задачи необходимо рассмотреть функцию стоимости $z_1 = \sum_{j=1}^n c_{1j} p_{1j}$, которая используется в классической постановке транспортной задачи [1]. Поскольку для нашей задачи естественно, что $c_{1j} = \frac{S_{1j}}{m}$, где S_{1j} – затраты, а m – масса перевозимого груза за один раз вертолетом, то будем считать, что S_{1j} равно kl_{1j} , где l_{1j} – прой-

денный путь вертолета от судна до пункта j при перевозке необходимого груза массой m ; k – коэффициент пропорциональности. В итоге получим

$$z_1 = \frac{k}{m} \sum_{j=1}^n l_{1j} p_{1j}. \quad (1)$$

Выберем декартову систему координат (в рамках решаемой задачи из-за ограниченности расстояний вполне допустимо отказаться от географических координат), в которой зададим координаты пунктов j .

Естественно считать, что для вертолета минимальный путь от судна до точки разгрузки – это прямая линия, тогда в этой системе координат $l_{1j} = \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2}$.

Также если учесть, что во время вертолетной разгрузки стоимость работы судна уже другая, получим из (1) в итоге

$$z_1 = \left(\frac{k}{m} + \frac{Z_0}{vm} \right) \sum_{j=1}^n \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \cdot p_{1j}, \quad (2)$$

где v – скорость вертолета; Z_0 – коэффициент, характеризующий затраты работы судна во время вертолетной разгрузки за единицу времени.

Для того, чтобы найти географическое место, необходимое для максимально быстрой разгрузки, пренебрегая стоимостью, нужно ввести функцию времени

$$t_1 = \frac{1}{mv} \sum_{j=1}^n l_{1j} p_{1j}. \quad (3)$$

2. Перевозка из точки отправления судна до точки его разгрузки вертолетом. В этом случае затраты и время на перевозку груза, соответственно, будут

$$z_2 = CL(x_0, y_0, x, y); \quad (4)$$

$$t_2 = \frac{C}{v_0} L(x_0, y_0, x, y), \quad (5)$$

где $L(x_0, y_0, x, y)$ – пройденный судном путь до точки разгрузки; C – коэффициент, характеризующий затраты при перевозке судном груза на единицу пройденного пути; v_0 – средняя скорость судна.

Объединяя оба фактора – суммируя (2) и (4), получим, что общие затраты при перевозке груза судном и вертолетом

$$z = \left(\frac{k}{m} + \frac{Z_0}{vm} \right) \sum_{j=1}^n \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \cdot p_{1,j} + CL(x_0, y_0, x, y). \quad (6)$$

Аналогично, суммируя (3) и (5) для вычисления общего времени перевозки груза от точки отправки судна до полной его разгрузки в пунктах назначения, получим

$$t = \frac{1}{mv} \sum_{j=1}^n \sqrt{(x-x_j)^2 + (y-y_j)^2} \cdot p_{1,j} + \frac{L(x_0, y_0, x, y)}{v_0}. \quad (7)$$

Рассматриваемую задачу можно усложнить, например, когда положение судна ограничено определенной географической областью. Такая ситуация возможна, если осадка судна не позволяет выходить за пределы этой области из-за глубины или движение за границами невозможно из-за береговой линии. В этом случае решение нужно искать внутри данной области. Следует добавить, что поиск оптимальной точки для затрат по стоимости (6) и времени (7) с учетом налагаемых граничных условий – не тривиальная задача и решается с помощью численных методов минимизации этих функций. Такую задачу можно решить, используя современные математические пакеты, как «Wolfram Mathematica 11». Данная программа позволяет проводить численный поиск минимума функций внутри оцифрованной (численно заданной) области значений искомых параметров.

Несмотря на то, что, используя предложенный метод, можно построить модель и найти оптимальное место для разгрузки судна, остается открытым вопрос о целесообразности применяемой модели. Необходимо проанализировать, насколько оптимальна точка для разгрузки в зависимости от параметров и по сравнению с другими вариантами. С экономической точки зрения (если говорить о стоимости) может существовать другой способ разгрузки, который будет менее затратным, поэтому требуется сравнить предложенный метод

с другим способом разгрузки. В случае завоза в пункты по Северному морскому пути отсутствие достаточного количества портов и портопунктов, с одной стороны, наличие небольших глубин в прибрежной зоне и состояние побережий, с другой, делают невозможным выгрузку судна на берег без использования вертолета. Поэтому единственная альтернатива нашему способу разгрузки (разгрузки из оптимальной точки) – это подвоз груза судном к необходимой точке разгрузки и его выгрузка вертолетом на небольшом удалении (доступном по глубинам) от этой точки и т. д. по всем пунктам выгрузки (назовем этот способ № 2). Таким образом, предложенный нами способ выгрузки необходимо сравнить со способом № 2. Для этого нужно посчитать стоимость разгрузки данными способами. Очевидно, что в определенном случае наш способ может быть более выгодным. Это произойдет, когда масса перевозимого груза судном в пункты назначения $\sum_{j=1}^n p_{1,j} = a$ меньше некоторой критической массы m_c . Другими словами, критическая масса m_c – это масса груза, перевозимого в пункты назначения, при которой наш способ выгрузки и способ № 2 одинаковы по стоимостным затратам. Эта масса зависит от многих факторов, в первую очередь – от положения и количества пунктов выгрузки, береговой линии и массы груза $p_{1,j}$ в точках выгрузки. Расчет m_c зависит от конкретной задачи.

Также, аналогично функции затрат, нужно ввести понятие критической массы m_T при поиске оптимальной точки выгрузки для минимизации временных затрат. Критическая масса m_T – это масса груза, перевозимого в пункты назначения, при которой наш способ и способ № 2 дают одинаковые временные затраты.

Результаты. Чтобы продемонстрировать возможности нашей модели, рассмотрим пример, имеющий практическое значение при доставке грузов в район Обско-Тазовской губы, где находятся значительные запасы природного газа, активно развивается добывающая

и перерабатывающая индустрия. Необходимо доставить грузы в пункты Тамбей, Сеяха и Антипаюта, находящиеся в Обско-Тазовской губе, из точки отправления судна – Карские ворота (x_0, y_0) и после этого перейти в точку (x_1, y_1) в устье Обской губы. Выбор точки (x_1, y_1) определяется тем, что судно после разгрузки в заявленных пунктах может продолжить путь дальше, не возвращаясь обратно в исходную точку. Для корректности сравнения нашего способа выгрузки и способа № 2 пункт отправления и конечный пункт для них совпадают.

Рассмотрим разные варианты доставки необходимых грузов (по количеству завозимого груза в пункты назначения). В этой задаче есть ограничения на область нахождения судна из-за распределения глубин и береговой линии. Оптимальные точки положения судна ищутся в каждом случае по процедуре, описанной выше, с учетом безопасных глубин и береговой линии, при минимизации уравнений для затрат по стоимости (6) и временных затрат (7). Расчет стоимости исходит из следующих данных: средней цены аренды вертолета – 170 000 руб./ч; средней скорости движения при работе – 170 км/ч; средней полезной грузоподъемности вертолета

при перевозке за один раз – 2 т (взяты приближительные характеристики работы вертолета Ми-8Т). Также используются данные судна, перевозящего груз (научно-экспедиционное судно «Михаил Сомов»): стоимость работы в сутки 833 000 руб. (если судно стоит, то стоимость судосутки 175 000 руб.), средняя скорость судна 15 км/ч. При расчете способом № 2 считаем, что судно подходит к каждому пункту выгрузки на среднее расстояние 10 км.

Сначала приведем результаты расчетов для критической массы m_c по стоимости затрат на доставку груза. Для этого построим график функции z/z_v (как функции от массы M перевозимого груза), где z_v – стоимость доставки груза способом № 2; z – стоимость доставки груза нашим способом, т. е. при минимизации функции (6). На рис. 1а изображена функция z/z_v для 7 случаев перевозки груза массой M (см. таблицу).

Приведем аналогичный расчет в случае оптимизации времени. Для этого построим график функции t/t_v (как функции от массы M перевозимого груза), где t_v – время доставки груза способом № 2; t – время доставки груза нашим способом, т. е. при минимизации функ-

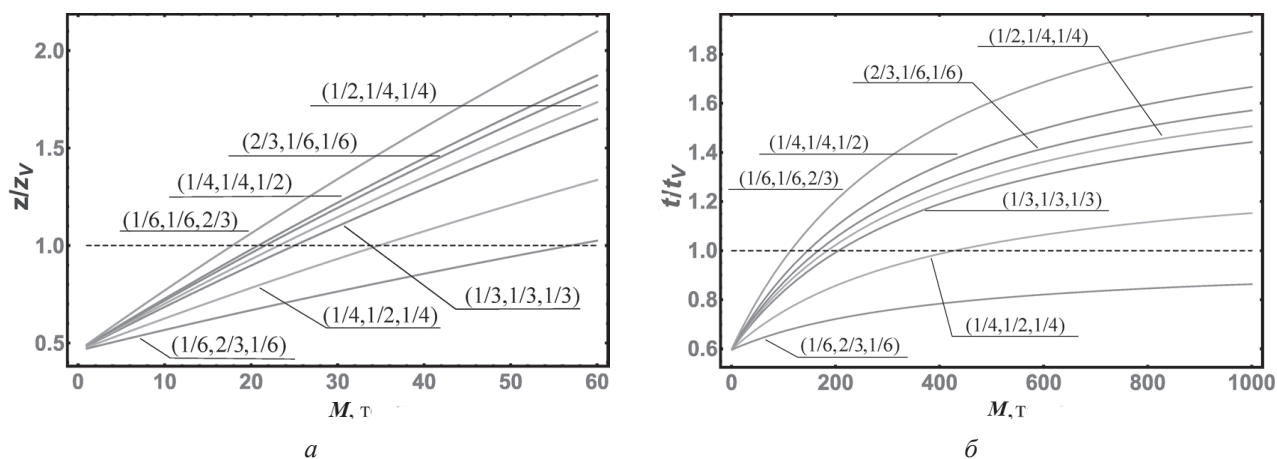


Рис. 1. Сравнение затрат (а – стоимостных, б – временных) при доставке груза массой M разными способами в пункты выгрузки Обско-Тазовской губы: z, t – стоимость и время доставки нашим способом (разгрузка судна вертолетом из оптимальной точки); z_v, t_v – стоимость и время доставки способом № 2 (разгрузка судна вертолетом на небольшом удалении от оптимальной точки). В скобках указаны доли масс грузов, доставляемых в Тамбей, Сеяху и Антипаюту соответственно

**УСЛОВИЯ ЗАДАЧИ ПО ДОСТАВКЕ ГРУЗОВ В ПУНКТЫ ВЫГРУЗКИ
ОБСКО-ТАЗОВСКОЙ ГУБЫ**

| Случай | Доля массы груза m_p , доставляемого в пункт назначения, от общей массы груза M | | | Общая критическая масса, т | |
|--------|---|-----------------|---------------------|----------------------------|----------------------|
| | Тамбей (m_1) | Сеяха (m_2) | Антипаюта (m_3) | по стоимости (m_c) | по времени (m_p) |
| 1 | $M/3$ | $M/3$ | $M/3$ | 25 | 210 |
| 2 | $M/4$ | $M/2$ | $M/4$ | 35 | 437,5 |
| 3 | $M/2$ | $M/4$ | $M/4$ | 23,2 | 188,3 |
| 4 | $M/4$ | $M/4$ | $M/2$ | 20,8 | 150 |
| 5 | $2/3M$ | $M/6$ | $M/6$ | 21,6 | 167 |
| 6 | $M/6$ | $2/3M$ | $M/6$ | 60 | Не существует |
| 7 | $M/6$ | $M/6$ | $2/3M$ | 17,8 | 114 |

ции (7). На *рис. 1б* изображена функция t/t_v для 7 различных случаев (см. *таблицу*) перевозки груза массой M (те же случаи, что и на *рис. 1а*).

Из *рис. 1а* можно увидеть, что существует критическая масса m_c , меньше которой выгоднее по стоимости перевозить груз нашим способом. Причем эта выгода может быть очень большой, если масса перевозимого груза M сравнительно невелика. Если учесть, что зимой в Обско-Тазовскую губу для рассмотренных пунктов груз может быть небольшим (например, для обеспечения функционирования гидрометеостанций), т. е. меньше критической массы, то рассмотренный метод является единственным экономически целесообразным.

На *рис. 1б* видно, что критическая масса m_T значительно больше, чем в предыдущем случае. Кроме того, в шестом рассмотренном случае ($1/6$, $2/3$, $1/6$) график функции не пересекает прямую $t/t_v = 1$, а имеет максимальное значение $t/t_v = 0,968$. Это значит, что наш способ всегда будет наиболее выгодным, несмотря на перевозимую массу груза.

Таким образом, предложенный способ для быстрой операции разгрузки-погрузки во многих случаях является единственным. Причем этот способ дает очень большую временную выгоду, даже при значительном объеме перевозимых грузов.

Следует добавить, что выигрыш по времени не всегда связан с проигрышем по стоимости. Быстрая доставка необходима в экстренных случаях – там, где промедление может повлечь большие затраты, например на последующую эвакуацию персонала станции из-за отсутствия продуктов и ГСМ. Именно поэтому быстрая доставка грузов – необходимая часть логистики Северного морского пути, с учетом ограничений на период навигации, сложных погодных условий, слабой развитости инфраструктуры.

Несмотря на то, что с помощью предложенного метода расчета можно найти лучшее географическое положение для разгрузки судна, возникает ряд проблем. Не всегда возможно добраться до заданного места, чтобы разгрузить судно. Это связано с различными факторами, которые не всегда могут быть учтены, например при плохих погодных условиях, мелководье, изменении фарватера, ледовой обстановке и других влияющих на судоходство обстоятельствах. Препятствия могут возникать непосредственно от момента начала движения судна до точки разгрузки. В этом случае необходима оперативная реакция на текущую ситуацию, задержки в ответе влекут за собой потери. Кроме того, требуется искать новую точку выгрузки, но в текущей ситуации ее сложно найти. Руководитель (менеджер), принимающий решение

о выгрузке, нуждается в оперативной помощи, которая может быть ему быстро и своевременно оказана путем моделирования ситуации. В этом случае также помогут контурные карты (карты-схемы) экономической и временной выгоды, отображающие географический район с оптимальной точкой выгрузки и экономические или временные показатели возможной точки разгрузки судна. В качестве примера приведены варианты выгрузки в Обско-Тазовской губе для сравнения выгоды по стоимости и времени перевозки нашим способом (рис. 2).

На представленных рисунках по цветовой гамме видно, где с минимальными потерями по стоимости или времени можно разгрузить судно. Также удобно и достаточно легко выбрать места разгрузки с использованием изолиний (тонкие черные линии на рисунках) – линий одинаковой экономической или временной выгоды. Вдоль выбранной изолинии стоимость или время разгрузки будут одинаковыми, несмотря на различное географическое располо-

жение точки разгрузки судна. Выгода может исчисляться десятками миллионов рублей в одном рейсе.

Таким образом, поиск места для разгрузки судна, если оно не может находиться в оптимальной точке, достаточно прост. Контурные карты-схемы удобны в использовании на судне руководителем (менеджером), ответственным за разгрузку судна: он может найти оптимальное место или набор мест для разгрузки, а также оценить экономические или временные затраты в каждой конкретной ситуации.

Задача может быть инвертирована с выгрузки на погрузку, когда изменяется средство доставки (например, плашкоуты), и в построенной модели можно осуществлять расчет оптимальной точки загрузки для любого заданного количества пунктов и их положения. При моделировании в качестве дополнительных условий можно учесть глубину вблизи берега и особенности ледовой обстановки в точке выгрузки.

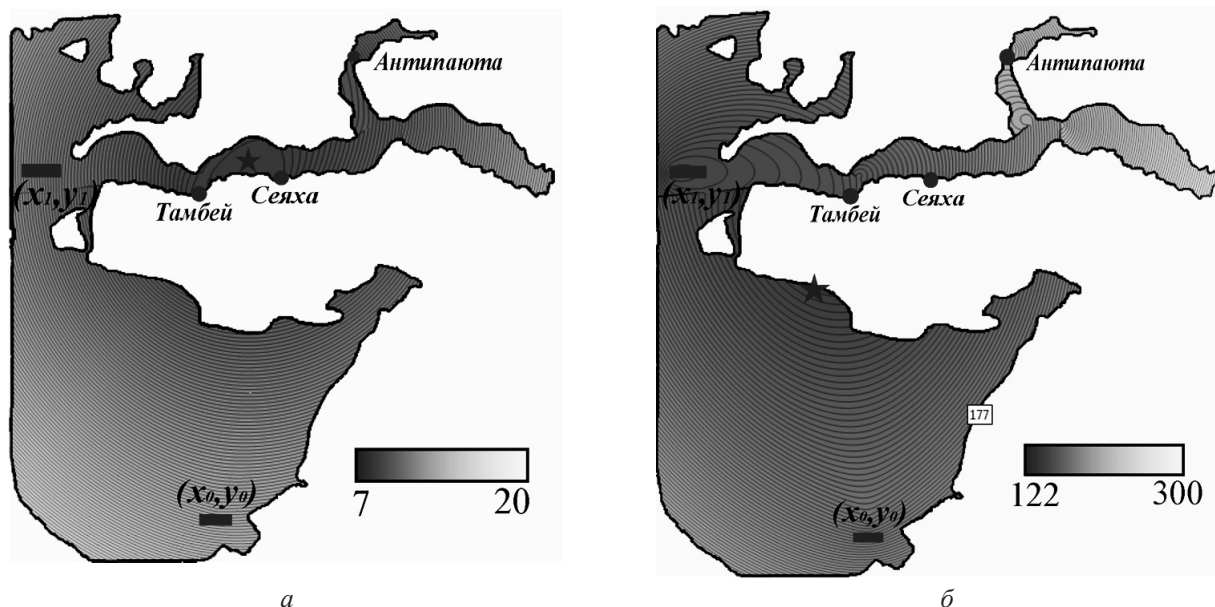


Рис. 2. Контурные карты-схемы экономической, млн руб. (а), и временной, ч (б), выгоды для перевозки груза нашим способом (разгрузка судна вертолетом из оптимальной точки) в Тамбей – 6 т, Сеяху – 2 т, Антипайоту – 6 т. Звездочкой обозначено наиболее выгодное место для разгрузки

Обсуждение. Таким образом, задача об оптимальной точке нахождения грузового судна при вертолетной выгрузке или распаулке плашкоутами достаточно быстро решается с помощью элементов линейного программирования и многопараметрической минимизации полученных аналитически систем уравнений. При этом не требуется сложных и объемных вычислений, как предполагается в стандартном решении транспортных задач. Экономический выигрыш (в стоимости) при выборе оптимальной точки вертолетной разгрузки может составлять до 50 % по отношению к другим вариантам с использованием вертолета и грузового судна, а выигрыш по времени может быть выше в 2–5 раз по сравнению с традиционными способами. Экономический эффект может быть еще больше, если снизить стоимость вертолеточаса за счет больших объемов аренды.

Предлагаемый метод может быть использован не только для Обско-Тазовской губы, но и в других районах Арктической зоны Российской Федерации. Подходы к моделированию и оптимизации процесса погрузки/разгрузки крупнотоннажных носителей с помощью дополнительных вспомогательных средств могут быть

разработаны путем введения дополнительных условий и с учетом других факторов. Это позволит включить полученные результаты в более крупные задачи организации перевозок, например вдоль Северного морского пути.

Таким образом, на примере рассмотренного решения проблемы погрузки и разгрузки судна в нескольких портах показано, что предлагаемые методы и подходы к математическому моделированию важного этапа грузовых перевозок позволяют выйти за рамки стандартного линейного программирования и численного поиска возможных комбинаций различных вариантов доставки. В будущем предлагается усовершенствование этого подхода и включение этой конкретной задачи в более масштабные математические модели. Аналогичным образом можно находить наиболее оптимальные места расположения для пунктов перевалки с учетом природных условий и особенностей грузов и средств доставки, что может быть применено при транспортировке грузов и людей на труднодоступные арктические территории для обеспечения жизни объектов специального назначения и поселений, добычи полезных ископаемых и т. д.

Список литературы

1. Канторович Л.В. О перемещении масс // Докл. АН СССР. 1942. Т. 37. С. 227–229.
2. Rao S.S. Engineering Optimization: Theory and Practice. Hoboken, New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2009. 221 p.
3. Beckmann M. A Continuous Model of Transportation // Econometrica. 1952. Vol. 20. P. 643–660.
4. Carlier G., Ekeland I. Equilibrium Structure of a Bidimensional Asymmetric City // Nonlinear Analysis: Real World Applications. 2007. Vol. 8, iss. 3. P. 725–748.
5. Ambrosio L., Kirchheim B., Pratelli A. Existence of Optimal Transport Maps for Crystalline Norms // Duke Mathematical Journal. 2004. Vol. 125, № 2. P. 207–241.
6. Benamou J.-D., Brenier Y. A Numerical Method for the Optimal Time-continuous Mass Transport Problem and Related Problems // Contemporary Mathematics. 1999. Vol. 226. P. 1–11.
7. Benamou J.D., Brenier Y. A Computational Fluid Mechanics Solution to the Monge-Kantorovich Mass Transfer Problem // Numerische Mathematik. 2000. Vol. 84, iss. 3. P. 375–393.
8. Тутыгин А.Г. Концепция создания комплекса моделей развития транспортной инфраструктуры Арктической зоны Российской Федерации // Науч. обозрение 2016. № 24. С. 182–185.

9. Антипов Е.О. Проблемы Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды при осуществлении северного завоза // Север и Арктика в новой парадигме мирового развития. Лузинские чтения – 2016: материалы VIII Междунар. науч.-практ. конф. Апатиты: РИО КНЦ, 2016. С. 159–164. URL: <http://www.iep.kolasc.net.ru/progkonf2016.pdf> (дата обращения: 06.11.2017).

10. Есеев М.К., Коробов В.Б., Макаров Д.Н., Матвеев В.И., Павленко В.И. Математическое моделирование процесса грузоперевозок по Севморпути: подходы и методы решения // Управление инновационным развитием Арктической зоны Российской Федерации: сб. избр. тр. по материалам Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием (14–16 сентября 2017 года, г. Северодвинск). Архангельск: КИРА, 2017. С. 208–212.

References

1. Kantorovich L.V. O peremeshchenii mass [On the Mass Movement]. *Doklady AN SSSR* [Proceedings of the USSR Academy of Sciences], 1942, vol. 37, pp. 199–201. (In Russ.)
2. Rao S.S. *Engineering Optimization: Theory and Practice*. Hoboken, New Jersey, USA, John Wiley & Sons, 2009, p. 221.
3. Beckmann M. A Continuous Model of Transportation. *Econometrica*, 1952, vol. 20, pp. 643–660.
4. Carlier G., Ekeland I. Equilibrium Structure of a Bidimensional Asymmetric City. *Nonlinear Analysis: Real World Applications*, 2007, vol. 8, iss. 3, pp. 725–748.
5. Ambrosio L., Kirchheim B., Pratelli A. Existence of Optimal Transport Maps for Crystalline Norms. *Duke Mathematical Journal*, 2004, vol. 125, no. 2, pp. 207–241.
6. Benamou J.-D., Brenier Y. A Numerical Method for the Optimal Time-continuous Mass Transport Problem and Related Problems. *Contemporary Mathematics*, 1999, vol. 226, pp. 1–11.
7. Benamou J.D., Brenier Y. A Computational Fluid Mechanics Solution to the Monge-Kantorovich Mass Transfer Problem. *Numerische Mathematik*, 2000, vol. 84, iss. 3, pp. 375–393.
8. Tutygin A.G. Kontseptsiya sozdaniya kompleksa modeley razvitiya transportnoy infrastruktury Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii [Concept of Creating a Complex of Transport Infrastructure Development Patterns of the Arctic Zone of the Russian Federation]. *Nauchnoe obozrenie* [Scientific Review], 2016, no. 24, pp. 182–185.
9. Antipov E.O. Problemy Federal'noy sluzhby po gidrometeorologii i monitoringu okruzhayushchey sredy pri osushchestvlenii severnogo zavoza [Problems of the Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring in the Implementation of Northern Deliveries]. *Sever i Arktika v novoy paradigme mirovogo razvitiya. Luzinskie chteniya – 2016: materialy VIII Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [North and the Arctic in a New Paradigm of the World Development. Luzin Readings – 2016: Proc. 8th Intern. Sci. Practical Conf.]. Apatity, Kola Scientific Center Publ., 2016, pp. 159–164. Available at: <http://www.iep.kolasc.net.ru/progkonf2016.pdf>. (accessed 06.11.2017).
10. Eseev M.K., Korobov V.B., Makarov D.N., Matveev V.I., Pavlenko V.I. Matematicheskoe modelirovanie protsessy gruzoperevozok po Sevmorputi: podkhody i metody resheniya [Mathematical Modeling of Cargo Transportation in the Northern Sea Route: Approaches and Methods of Solution]. *Upravlenie innovatsionnym razvitiem Arkticheskoy zony Rossiyskoy Federatsii: sb. izbr. tr. po materialam Vseros. nauch.-prakt. konf. s mezhdunar. uchastiem (14–16 sentyabrya 2017 goda, g. Severodvinsk)* [Management of Innovative Development of the Arctic Zone of the Russian Federation: Proc. All-Russ. Sci. Practical Conf. with Intern. Participation (September 14–16, 2017, Severodvinsk)]. Arkhangelsk, KIRA Publ., 2017, pp. 208–212. (In Russ.)

DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.273

Received on October 02, 2017

*Marat K. Eseev**/**, *Vladimir B. Korobov**/***, *Dmitriy N. Makarov**/**,
*Viktor I. Matveev**/**, *Andrey G. Tutygin**

*Federal Center for Integrated Arctic Research named after Academician N.P. Laverov, Russian Academy of Sciences
(Arkhangelsk, Russian Federation)

**Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov
(Arkhangelsk, Russian Federation)

***P.P. Shirshov Institute of Oceanology of the Russian Academy of Sciences
(Moscow, Russian Federation)

SIMULATION OF CARGO HANDLING OPERATIONS IN THE TRANSPORTATION PROCESS ON THE NORTHERN SEA ROUTE

People transportation and various cargoes delivery to the coasts and islands of the Arctic Ocean are the urgent tasks in the scientific research, geological exploration and other expeditions, provision of drilling sites operations for oil and gas production, and the vital activity of settlements in the Arctic zone of the Russian Federation. The creation and management of transport infrastructure requires consideration of important natural and economic characteristics inherent in this region. The original approaches and mathematical simulation techniques in solving transport logistics problems should be developed. A method of unloading of a vessel using a helicopter is costly. Therefore, the search for the optimal geographical location for this operation is very important. The authors develop a mathematical model of finding a geographic position for the most profitable cargo delivery using a helicopter from a cargo vessel to the desired unloading points. Based on the developed model, we demonstrate significant time and cost saving in the Northern Supply Haul transportation to the hard-to-reach Roshydromet hydrometeorological stations in the Ob-Taz Bay area. We determine weight limitations of transported goods, taking into account the criteria of time and cost minimization, and the distribution of goods between different points. The solution is performed beyond the framework of the traditionally applied approach of the transport problem, which allows us to increase the accuracy and reduce the computation time. The authors develop specific recommendations for a ship cargo handling operation manager, taking into account possible options. The values and time expenditures for typical tasks depending on the cost of a helicopter hour and a vessel day are determined.

Keywords: *shipping logistics, Northern Sea Route, Arctic cargo shipping, linear programming, cargo handling operations, transport problem.*

Corresponding author: Marat Eseev, *address:* prosp. Lomonosova 4, Arkhangelsk, 163000, Russian Federation;
e-mail: m.eseev@narfu.ru

For citation: Eseev M.K., Korobov V.B., Makarov D.N., Matveev V.I., Tutygin A.G. Simulation of Cargo Handling Operations in the Transportation Process on the Northern Sea Route. *Arctic Environmental Research*, 2017, vol. 17, no. 4, pp. 273–282. DOI: 10.17238/issn2541-8416.2017.17.4.273