

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

На правах рукописи

Ломакина Наталья Сергеевна

**Разработка математической модели эксплуатации  
контейнеровозов на транзитных линиях  
Северного морского пути**

Направление подготовки 01.04.02  
«Прикладная математика и информатика»

**АВТОРЕФЕРАТ  
МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Работа выполнена в ФГБОУ ВО  
«Комсомольский-на-Амуре государственный университет»

Научный руководитель: кандидат физико-математических наук,  
доцент кафедры «Прикладная математика»  
Григорьева Анна Леонидовна

Рецензент: кандидат технических наук,  
доцент кафедры Математики,  
ФГБОУ ВО «Амурский гуманитарно-  
педагогический государственный  
университет»,  
Севастьянов Антон Мамиевич

Защита состоится 25 июня 2021 г. в 9.50 часов на заседании государственной экзаменационной комиссии по направлению подготовки 01.04.02 – «Прикладная математика и информатика» в ФГБОУ ВО «КнАГУ» по адресу: 681000, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27, ауд. 204/5.

Автореферат разослан 15 июня 2021 г.

Секретарь ГЭК



Ю.Г. Егорова

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

*Актуальность темы.*

Использование Северного морского пути (СМП) в качестве дополнительного международного контейнерного коридора обусловлено следующими обстоятельствами:

- сокращение протяженности маршрута;
- снижение расходов на топливо;
- сокращение времени транспортировки контейнеров.

Особенно это актуально для контейнерного грузопотока между странами Северной Европы и Восточной Азии.

Актуальность работы заключается в том, что при наличии программы расчета экономической эффективности появляется возможность определять эксплуатационные и экономические показатели транзитных перевозок по СМП. Кроме того, результаты работы могут быть внедрены в учебный процесс и использованы при изучении курсов, связанных с технологией и организацией транспортных процессов.

*Цель магистерской диссертации* разработать методику оценки экономической эффективности транзитных перевозок по СМП.

*Основные задачи магистерской диссертации*

1. Проанализировать математические методы и модели в организации транзитных перевозок и определить основные направления повышения их эффективности;
2. Провести анализ факторов, влияющих на показатели эффективности транзитных линий;
3. Построить математическую модель транзитных перевозок;
4. Сформировать собственную методику для выявления экономической эффективности транзитных перевозок на основе полученной модели.

*Объектом исследования* являются процессы транзитных перевозок по СМП.

*Предметом исследования* являются аналитические методы и математические модели, учитывающие природные условия и необходимые для выявления зависимости экономической эффективности эксплуатации контейнеровозов на транзитных линиях СМП.

*Научная новизна магистерской диссертации:* разработка математической модели, предназначенной для проектирования и анализа эксплуатации транспортных систем (ТС), работающих в ледовых условиях.

*Достоверность и обоснованность результатов исследования.* Основана на экономико-математических методах и моделях в организации транспортных процессов.

*Практическая ценность магистерской диссертации* определяется направленностью использования разработанного инструментария моделирования в реальных условиях функционирования транспортной системы с целью повышения ее эффективности.

На сегодняшний день на рынке программных продуктов практически отсутствуют программы данного рода, либо их стоимость очень велика. В связи с этим актуальность данной работы неоспорима.

*Апробация результатов.* Результаты работы докладывалась на:

– III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2020.

– I Международной научно-практической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности», ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021.

*Публикации.* По результатам выполненных в диссертации исследований автором опубликовано 3 работы в:

– «Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований». Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х частях. 2020.

– «Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета», 2021. №1 (49).

– Сборник трудов I Международной научно-практической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности», ФГБОУ ВО «КнАГУ», 2021.

*Структура и объем.* Магистерская диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы. Объем работы – 70 страниц, в том числе 15 рисунков и 1 приложение.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

*Введение* раскрывает актуальность темы, определяются цели и задачи исследования, объект, предмет, указываются научная новизна, практическая значимость, достоверность и обоснованность результатов исследования.

*В первой главе* проанализированы особенности экономических задач транспортных процессов, приведены математические методы и модели для морских транзитных перевозок.

Для организации перевозок характерны большие плечи перемещения материальных потоков, изменчивость технологии транспортного процесса и зависимость от случайных природных факторов. Всё это приводит к исследованию новых закономерностей и их использования, повышению требований к методам сбора, накопления и переработки информации и несет вероятностный характер многих транспортных процессов.

К основным особенностям экономических задач транспортных процессов можно отнести:

- множественность возможных решений: определенную транспортную работу можно выполнить различными способами;

- экономико-математические задачи являются экстремальными, что в свою очередь предполагает наличие целевой функции;

- при выборе критерия оптимальности могут возникнуть ситуации, когда придется принимать во внимание одновременно несколько показателей эффективности. Это связано не только с трудностями выбора и обоснования единственного критерия, но и многоцелевым характером реальных задач. В этом случае потребуется несколько целевых функций и соответственно какой-то компромисс между ними;

- случайный характер факторов, влияющих на экономическую систему, предполагает вероятностный характер коэффициентов целевой функции;

- встречаются условия, когда зависимости между различными факторами или в целевой функции нелинейны;

- при составлении математической модели необходимо учитывать дискретность величины. Так как целочисленность вытекает из самой природы вещей, предметов (число транспортных средств или рейсов, число рабочих или экипажа и т.д.). При этом дискретный характер имеют не только объекты планирования, но и временные промежутки, внутри которых осуществляется планирование;

- дискретность экономических показателей неотделима от неотрицательности значений (количество груза, отрезок времени);

- расчет эффективности перевозок имеет изменчивый характер под воздействием внешних и внутренних факторов. При этом возникает ситуация, когда решения, принятые раньше, определяют частично или полностью решения, принятые позднее.

Поэтому экономические задачи на транспорте, решаемые математическими методами, имеют специфику, определяемую особенностями транспортных систем. Для решения этих задач потребуется математический аппарат, причем не столько более сложный, сколько просто учитывающий особенности транспортных систем на базе уже существующих математических методов.

*Во второй главе* разрабатывается математическая модель эксплуатации судов, работающих во льдах. Рассматривается вывод формул для определения расчетного тарифа на перевозку одного контейнера, расчета продолжительности рейса и. В отличие от расчетов этих показателей для судна, работающего на чистой воде, анализируются факторы, влияющие на транзитные перевозки по СМП.

Для уменьшения недочетов при решении прогнозных задач эксплуатации контейнеровозов лучше прибегнуть к помощи имитационного моделирования. Актуальность применения в том, что аналитические расчеты не могут на 100 % описать работу транзитных контейнерных линий на СМП. Имитационная модель описывает работу, принимая во внимание ледовые условия, режим работы судна. На модели выполняется сценарий «что – если» и проводится проверка нескольких вариантов режимов эксплуатации. Модель представляет собой не только конечный результат расчётов, но и позволяет наблюдать за динамикой изменения показателей с течением времени.

Целевой функцией является расчетный тариф на перевозку одного контейнера

$$Z = f_{расч} \rightarrow \min \quad (1)$$

$$\begin{cases} f_{расч} = f(S_T) \\ S_T = f(R_p) \\ R_p = f(t_p) \\ t_p = f(l_i, v_i) \\ v = f(h_i) \\ i = 1, \dots, 9 \end{cases},$$

Расчетный тариф на перевозку груза определяется путём увеличения себестоимости перевозки на уровень рентабельности (30 % для морских перевозок).

$$f_{расч} = k_{рен} \cdot S_T \quad (2)$$

Себестоимость перевозки одного контейнера определяется по формуле, у.е./конт:

$$S_T = \frac{R_p(t)}{\sum Q_p}, \quad (3)$$

Расходы судна планируются по установленным статьям затрат. Расходы судна за рейс состоят из прямых постоянных и переменных, которые рассчитываются по формуле

$$R_p = R_{пост}^{np} + R_{пер}, \quad (4)$$

где  $R_{пост}^{np}$  – прямые постоянные расходы, у.е.;

$R_{пер}$  – переменные расходы, у.е.

Прямые постоянные расходы за рейс определяются по формуле

$$R_{пост}^{np} = R_{ам} + R_{рем} + R_{эк} + R_{нав} + R_{соц.смп} + R_{мал} + R_{сб} + R_{косв}, \quad (5)$$

где  $R_{ам}$  – расходы на амортизацию, у.е.;

$R_{рем}$  – расходы на ремонт, у.е.;

$R_{эк}$  – расходы на содержание экипажа, у.е.;

$R_{нав}$  – навигационные и ледакольные расходы, у.е.;

$R_{мал}$  – расходы на малоценный инвентарь, у.е.;

$R_{сб}$  – расходы на судовые сборы и агентирование, у.е.;

$R_{косв}$  – косвенные расходы, у.е.

Переменные расходы – это расходы на топливо  $R_{пер} = R_{топ}$ .

Продолжительность рейсообразота определяется по формуле:

$$t_p = t_{см.р} + t_{х.}, \quad (6)$$

где  $t_{см.р}$  – общее стояночное время за рейс, сут;

$t_{х.}$  – ходовое время в грузе, сут.

Намечены варианты маршрутов перевозки между портами-хабами Мурманск и Петропавловск-Камчатский. Порты оснащены причалами с современными контейнерными перегружателями. В этих портах происходит аккумулярование грузов с фидерных контейнеровозов. На восточной кромке СМП находится порт Проведение, который для использования в качестве порта-хаба пока

не готов для переработки контейнеров и требует обновления инфраструктуры. Поэтому для оценки эффективности маршруты разбиты на девять участков:

- участок 1 – Мурманск – западная граница СМП;
- участок 2...8 – зона СМП;
- участок 9 – восточная граница СМП – Петропавловск-Камчатский.

Протяженность участков, так и средняя скорость зависят от выбранного варианта маршрута прохождения трассы СМП и ледовых условий на каждом из участков. Вариант маршрута и ледовые условия назначаются для каждого отдельного рейса индивидуально, в зависимости от сезона прохождения трассы СМП.

Для маршрута между портами Мурманск и Петропавловск-Камчатский через СМП ходовое время рейса складывается из времени прохождения девяти участков  $t_j$  и времени ожидания ледокольной проводки или приема ледовых лоцманов на борт контейнеровоза  $t_o$ :

$$t_x = t_1 + t_2 + t_3 + t_o. \quad (7)$$

Участки 1 и 2 маршрута характеризуются одинаковыми условиями эксплуатации – чистая вода. Время прохождения этих участков рассчитывается как

$$t_{1,3} = \frac{L_{1,3}}{v_{1,3}}, \quad (8)$$

где  $L_j$  – протяженность  $j$ -го участка, мили;

$v_i$  – средняя скорость контейнеровоза в  $i$ -м направлении, узлы.

Время прохождения контейнеровозом трассы СМП  $t_2$  складывается из среднего времени прохождения отдельных участков (в данном случае их выделено семь, по количеству зон оказания услуг ледокольной проводки)

$$t_2 = \sum_{k=1}^7 t_{2,k}, \quad (9)$$

где  $k$  – номер участка маршрута по СМП.

Время прохождения отдельных участков транспортной линии по СМП вычисляется по формуле аналогичной (8)

$$t_{2,k} = \frac{l_{2,k}}{v_{2,k}}, \quad (10)$$

где  $l_{2,k}$  – протяженность  $k$ -го участка трассы СМП, мили;

$v_{2,k}$  – скорость контейнеровоза на  $k$ -м участке маршрута, узлы.

Скорость контейнеровозов при движении по участкам СМП зависит от ледовой обстановки. Учитывая изменение толщины льда по участкам вводится коэффициент уменьшения скорости (рисунок 1).

Стояночное время в порту складывается из трех составляющих: время разгрузки  $t_p$  и загрузки  $t_n$  контейнеровоза, а также среднего времени простоев судна без грузовых операций в ожидании причалов и т.п.  $t_{np}$ .

Акватория СМП (рисунок 2), разделенная на семь зон для ледовой проводки и порты, входящие в нее.



Таблица 1 – Протяженность и средняя толщина льда по зонам СМП для маршрута № 1

Номер участка		1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Протяженность, км		967	796	746	615	452	619	652	739	2217	
Протяженность, морские мили		522	430	403	332	244	334	352	399	1197	
Навигация	Месяц	Мурманск-Западная кромка СМП	Юго-Западная часть Карского моря	Северо-Восточная часть Карского моря	Западная часть моря Лаптевых	Восточная часть моря Лаптевых	Юго-западная часть Восточно-Сибирского моря	Северо-Восточная часть Восточно-Сибирского моря	Чукотское море	Восточная кромка СМП – Петропавловск-Камчатский	
		Зимне-весенняя		Декабрь	0	0	30	50	70	100	140
		Январь	0	30	80	110	140	180	150	50	0
		Февраль	20	80	120	160	180	190	180	150	30
		Март	50	120	180	190	200	200	190	180	50
		Апрель	40	110	170	190	200	200	190	170	40
		Май	30	90	160	170	190	190	170	160	30
		Июнь	20	50	70	110	130	120	70	50	10
Летне-осенняя		Июль	0	10	20	50	60	50	30	10	0
		Август	0	0	10	30	20	10	0	0	0
		Сентябрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Октябрь	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		Ноябрь	0	0	10	20	30	30	20	10	0

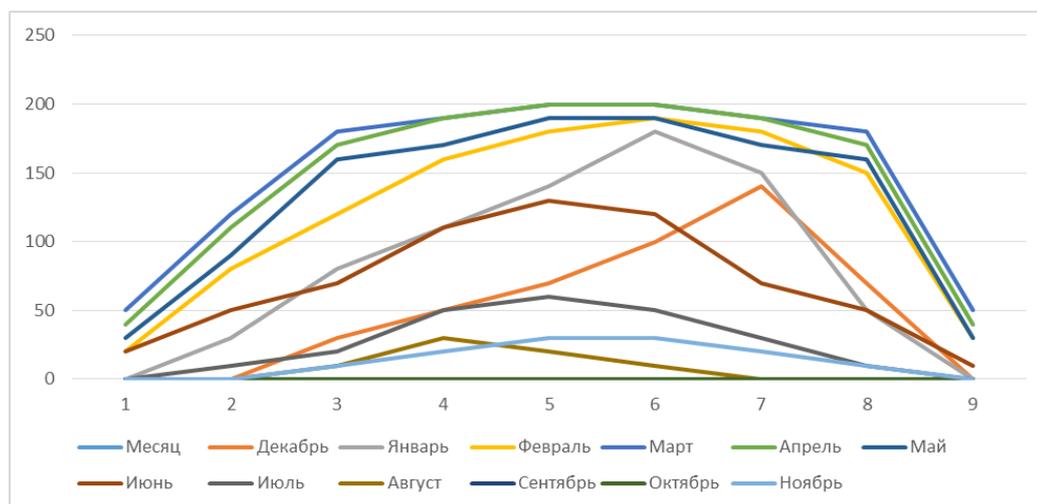


Рисунок 4 – Графики годового изменения толщины льда по участкам для маршрута №1

На основании изложенного была создана блок-схема решения задачи (рисунок 5).

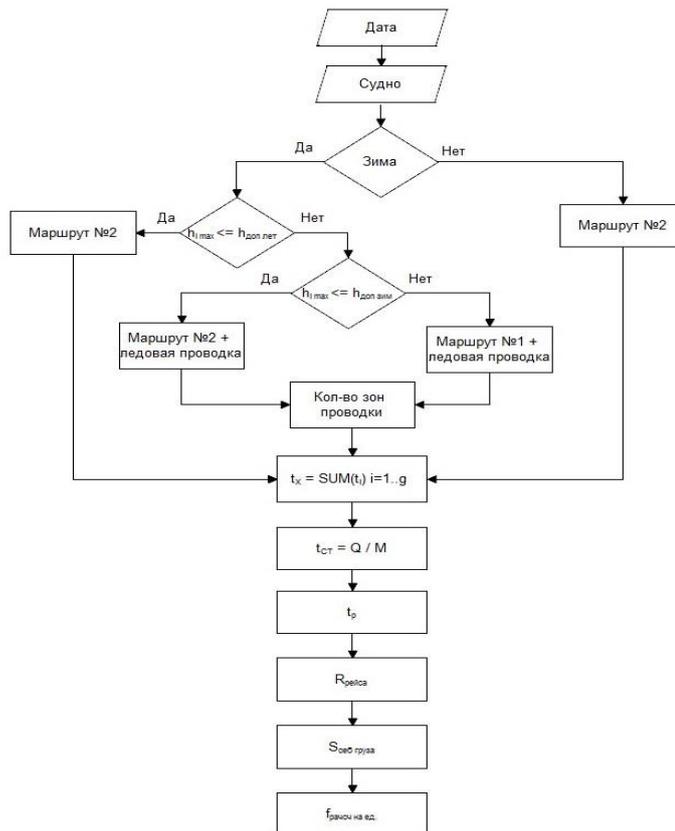


Рисунок 5 – Алгоритм расчета тарифа на перевозку единицы груза

В третьей главе описывается процесс разработки программного продукта модели эксплуатации контейнерных перевозок на базе 1С Предприятие 8.3.

Разработанный программный продукт работает по алгоритму приведенному на рисунке 6. Вид справочников и расчеты приведены на рисунках 7, 8.

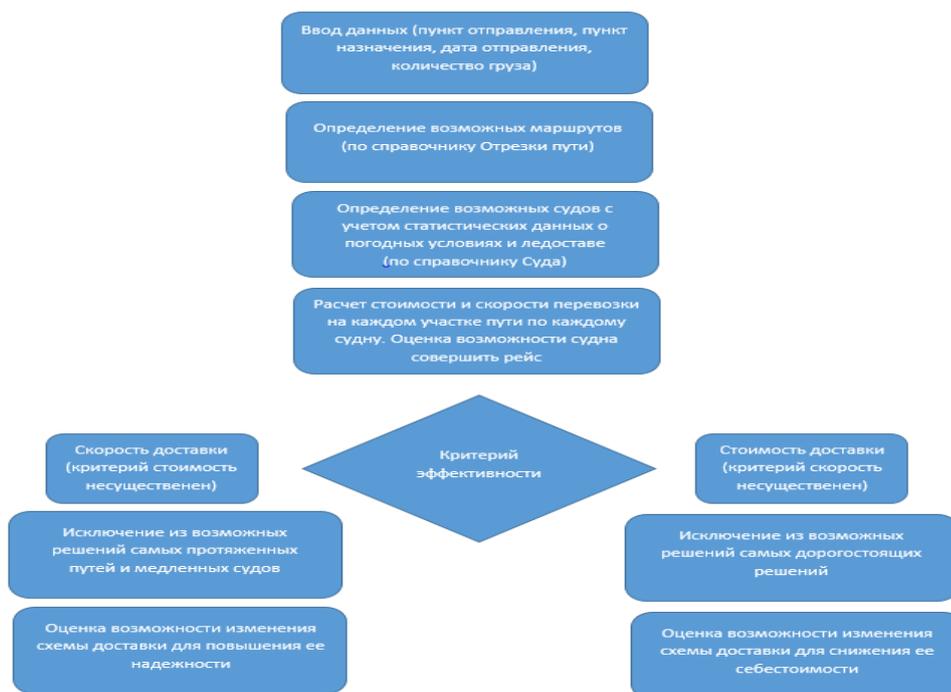


Рисунок 6 – Алгоритм работы программы

Использование данного программного продукта позволяет существенно сократить время разработки программы, встроенные средства управления СУБД автоматически обеспечивают целостность данных и представление их в нормальной форме.

Не компилируемый интерпретируемый язык позволяет реализовывать программные алгоритмы с минимальными временными затратами, а работа системы будет гарантирована на любом персональном компьютере с установленной системой 1С Предприятие.

В конце главы приводятся результаты испытания программы. На рисунке 9 представлено сравнение продолжительности рейса между портами Роттердам – Токио для «южного» и «северного» маршрутов. На рисунке 10 – себестоимость перевозки в течении года по различным маршрутам.

Наименование	Код	Маршрут	Порт	Протяженность (в км)	Протяженность (в морск. милях)
Маршрут 1 Мурманск-Петролаповск-Камчатский	000000001				
= Западная часть моря Лаптевых	000000005	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		615	249
= Восточная часть моря Лаптевых	000000006	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		452	204
= Юго-западная часть Восточно-Сибирского моря	000000007	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		619	311
= Северо-Восточная часть Восточно-Сибирского моря	000000008	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		652	444
= Чукотское море	000000009	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		739	350
= Юго-Западная часть Карского моря	000000003	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		796	151
= Северо-Восточная часть Карского моря	000000004	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...		746	325
= Мурманск-Западная кромка СМП	000000002	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...	Мурманск	967	522
= Восточная кромка СМП – Петролаповск-Камчатский	000000010	Маршрут 1 Мурманск - Петрола...	Петролаповск-Камчатский	2 217	1 236

Рисунок 7 – Справочник «Отрезки пути» для различных маршрутов

Расчет перевозки Номер: 000000001 Дата: 11.06.2021 14:42:41

Начало перевозки: 02.03.2021 Окончание перевозки: 31.08.2021

Маршрут: Маршрут 1 Мурманск - Петролаповск-Камчатский Судно: Норильский нильев Количество контейнеров: 648

N	Отрезок	Толщина	Средняя скор...	Погруз...	Начало	Окончание	Дней	Протяженность	Расходы аморти...	Расходы рем...	ФОТ осн	ФОТ доп	ФОТ Соц. стр...	Расходы питание
1	Мурманск-Западная к...	50		☑	02.03.2021	03.03.2021	1		13 512,45	1 351,25	2 958,16	443,72	1 027,37	133,00
2	Мурманск-Западная к...	50	15	☐	03.03.2021	04.03.2021	2	522	27 024,89	2 702,49	5 914,91	887,24	2 054,25	266,00
3	Юго-Западная часть ...	110	9	☐	05.03.2021	06.03.2021	2	151	27 024,89	2 702,49	5 914,91	887,24	2 054,25	266,00
4	Северо-Восточная ч...	180	2	☐	07.03.2021	13.03.2021	7	325	94 587,12	9 458,71	20 698,69	3 104,80	7 188,65	931,00
5	Западная часть моря...	190	2	☐	14.03.2021	20.03.2021	7	249	94 587,12	9 458,71	20 698,69	3 104,80	7 188,65	931,00
6	Восточная часть мор...	200	2	☐	21.03.2021	25.03.2021	5	204	67 562,23	6 756,22	14 785,18	2 217,78	5 134,89	665,00
7	Юго-западная часть ...	200	2	☐	26.03.2021	31.03.2021	6	311	81 074,67	8 107,47	17 741,94	2 661,29	6 161,78	798,00
8	Юго-западная часть ...	200	2	☐	01.04.2021	01.04.2021					1,40	0,21		0,49
9	Северо-Восточная ч...	190	2	☐	02.04.2021	12.04.2021	11	444	148 636,90	14 863,69	32 525,72	4 878,86	11 296,18	1 463,00
10	Чукотское море	170	2	☐	13.04.2021	20.04.2021	8	350	108 099,56	10 809,96	23 655,45	3 548,32	8 215,54	1 064,00
11	Восточная кромка С...	40	15	☐	21.04.2021	24.04.2021	4	1 197	54 049,78	5 404,98	11 828,42	1 774,26	4 108,01	532,00
12	Восточная кромка С...	40		☑	25.04.2021	26.04.2021	1		13 512,45	1 351,25	2 958,16	443,72	1 027,37	133,00

Рисунок 8 – Результаты расчета составляющих расходов за рейс

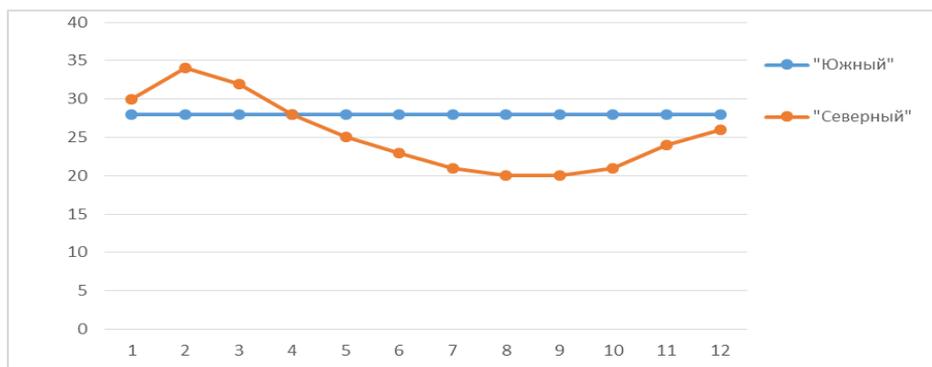


Рисунок 9 – Продолжительность рейсов в течении года, сут

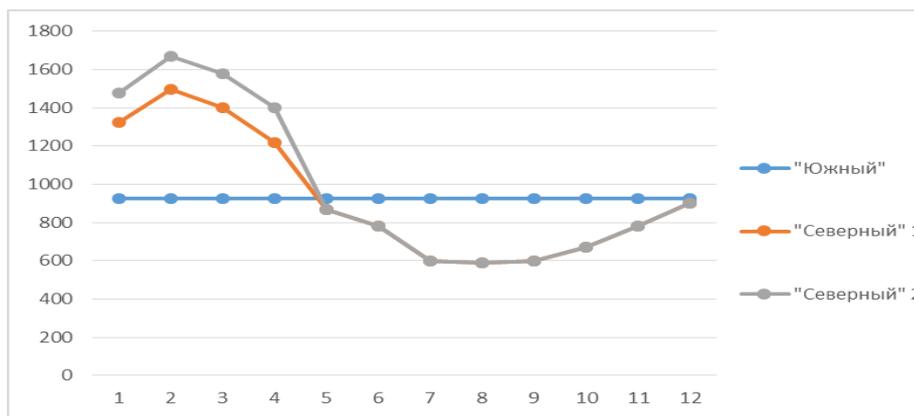


Рисунок 10 – Себестоимость перевозки одного контейнера, у.е.

*В заключении* подводятся основные итоги исследований, проводится анализ полученных результатов.

## СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Ломакина, Н.С. Факторы, влияющие на транзитные перевозки по Северному морскому пути при составлении математической модели эксплуатации транспортных систем / Н.С. Ломакина, А.Л. Григорьева // Молодежь и наука: актуальные проблемы фундаментальных и прикладных исследований. Материалы III Всероссийской национальной научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. В 3-х частях. 2020. С 308 -310.
2. Ломакина, Н.С. Математическая модель оптимизации системы управления процессами на предприятиях и судах ледового плавания на основе модели сетевого планирования / А.Л. Григорьева, Ян Ю. Григорьев, Н.С. Ломакина // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре технического университета, 2021. №1 (49). – С 19-28.
3. Ломакина, Н.С. Особенности построения математической модели организации перевозки грузов по Северному морскому пути / Н.С. Ломакина, А.Л. Григорьева // Сборник трудов I Международной научно-практической конференции молодых учёных «Актуальные проблемы информационно-телекоммуникационных технологий и математического моделирования в современной науке и промышленности», ФГБОУ ВО «КНАГУ», 2021.