

Геоинформатика. 2025. № 2. С. 4–12.
Geoinformatika. 2025;(2):4–12.

Моделирование геообъектов и геопроцессов

Научная статья
 УДК 004.9
<https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-4-12>

Оптимизационная задача определения грузового состава перевозок на ледовых трассах по оценке грузоподъемности ледяного покрова

© 2025 г. — Евгений Петрович Истомин^{а)}, Ярослав Андреевич Петров^{б)}, Ирма Андреевна Мартын^{в)}

¹ ФГБОУ ВО «Российский государственный гидрометеорологический университет»; Санкт-Петербург, Россия

^{а)}biom220@bk.ru, ^{б)}yaroslav.petrov025@gmail.com, ^{в)}irma_martyn@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрены алгоритм и математический аппарат определения грузоподъемности ледяного покрова по данным оценки его толщины, зависящей от его структуры и температуры. Состав грузовой перевозки и вид грузового транспорта определяются исходя из оценочной толщины льда в месте транспортировки. Расчет характеристик ледового покрова, толщины нарастания льда в зависимости от погодных условий производится на основе эмпирической формулы Н.Н. Зубова. Грузоподъемность льда и состав грузов вычисляются на основе расчетных методов, базирующихся на положениях теории упругости. Результаты оценки толщины льда представляются с применением геоинформационных систем в пространственном виде, расчеты осуществляются на языке программирования Python с табличным выводом их результатов и аналитической запиской.

Ключевые слова: математическое моделирование; оптимизация; грузоподъемность льда; ледовые перевозки; Арктика.

Для цитирования: Истомин Е.П., Петров Я.А., Мартын И.А. Оптимизационная задача определения грузового состава перевозок на ледовых трассах по оценке грузоподъемности ледяного покрова // Геоинформатика. — 2025. — № 2. — С. 4–12. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-4-12>.

Modeling of geological objects and geoprocesses

Original article

Optimization problem of determining the cargo structure of transportation on ice routes based on the assessment of the cargo capacity of the ice cover

© 2025 — Evgeny P. Istomin^{а)}, Yaroslav A. Petrov^{б)}, Irma A. Martin^{в)}

Russian State Hydrometeorological University; St. Petersburg, Russia

^{а)}biom220@bk.ru, ^{б)}yaroslav.petrov025@gmail.com, ^{в)}irma_martyn@mail.ru

Abstract: The article discusses the algorithm and mathematical apparatus for determining the carrying capacity of the ice cover based on the assessment of its thickness, determined from its structure and temperature. The composition of the freight transportation and the type of freight transport are determined based on the estimated ice thickness at the transportation location. Calculation of the ice cover characteristics, the thickness of ice growth depending on weather conditions, is based on the empirical formula of N.N. Zubov. Determination of the carrying capacity of ice and the composition of cargo is based on calculation methods based on the provisions of the theory of elasticity. The results of the ice thickness assessment are presented using geographic information systems in spatial form, the calculations are made in the Python programming language with a tabular output of the calculation results and an analytical note.

Key words: mathematical modeling; optimization; ice carrying capacity; ice transportation; Arctic.

For citation: Istomin E.P., Petrov Y.A., Martyn I.A. Optimization problem of determining the cargo structure of transportation on ice routes based on the assessment of the cargo capacity of the ice cover. *Geoinformatika*. 2025;(2):4–12. <https://doi.org/10.47148/1609-364X-2025-2-4-12>. In Russ.

Введение

Одной из основных целей анализа ледового покрова является определение его толщины и, как следствие, грузоподъемности для возможности транспортировки грузов. Данный вопрос особенно актуален для территории Российской Федерации, где большая часть находится в поясе постоянного холода. Определение грузоподъемности ледовых трасс — важный фактор для безопасности и эффек-

тивности транспортировки грузов в арктических условиях [1–3].

Грузоподъемность ледового покрова определяется как возможная нагрузка, при которой происходит образование трещин во льду, предельная грузоподъемность — несущая способность, превышение которой приводит к пролому льда. Оба эти явления представляют опасность при транспортировке грузов по ледовым трассам.

Грузоподъемность ледового покрова в свою очередь связана с прочностными и физическими характеристиками льда. На несущую способность льда оказывают влияние прежде всего климатические и погодные условия. Исходя из этого становится логичным первоначальное определение толщины нарастания и итоговой толщины льда в зависимости от суровости зимы [4–6].

Материалы и методы

Первоначально рассмотрим математический аппарат оценки толщины ледового покрова в месте транспортировки в зависимости от погодноклиматических условий [7]. В работе был выбран наиболее надежный и простой метод, основанный на эмпирической формуле Н.Н. Зубова в зависимости от суровости зимы, определяемой количеством градусодней мороза:

$$H = (25 + H_0) / (25 + H_0)^2 + 8 \cdot (\pi(-T)a), \quad (1)$$

где H — конечная толщина льда, см; H_0 — начальная толщина льда, см; $(\pi(-T)a)$ — сумма градусодней мороза за расчетный период.

Для выбора расчетной схемы грузоподъемности льда, исходя из имеющихся данных наблюдений и установленных физических предпосылок, был выбран расчетный метод, основанный на теории упругости. Данные методы дают точное решение задач об упругой деформации льда под воздействием нагрузок.

Главной задачей здесь является вопрос о предельно допустимых нагрузках [8–10] в зависимости от размеров груза, толщины и структуры ледового покрова и изменений погодных условий. Задача решается для двух случаев в зависимости от вида нагрузки:

- 1) центральный изгиб при нагрузке, равномерно распределенной по площади круга;
- 2) центральный изгиб при нагрузке, равномерно распределенной вдоль бесконечно длинной полосы.

Расчетная схема для центрального изгиба выглядит следующим образом:

$$a \leq \left[2,35\sqrt{b} + 1,18 \frac{\sqrt[4]{h_n^3}}{\sqrt{b}} \right]^2, \quad (2)$$

где a — длина груза, м; b — ширина груза, м; h_n — толщина льда, м.

При длине груза, превышающей значение правой части уравнения, применяется схема для цилиндрического изгиба.

Расчетная температура поверхности льда определяется по формуле

$$T_n = c\delta T_a, \quad (3)$$

где T_a — средняя температура воздуха, °C; δ — коэффициент, учитывающий расчетный слой и равный

1, 0,5 и 0,25 для поверхностного, среднего и нижнего слоев; c — коэффициент Девика.

Грузоподъемность льда для центрального изгиба определяется как:

- 1) для весеннего слабого льда

$$G_{1,max} = \frac{\pi ab\sigma^4 \sqrt[4]{h_n^5}}{52,8 \left[0,58\sqrt{ab} - \sqrt[4]{h_{n1}^3} \right]}, \quad (4)$$

- 2) для зимнего льда под снегом

$$G_{2,max} = \frac{\pi ab\sigma^4 \sqrt[4]{h_n^5}}{105,6 \left[0,41\sqrt{ab} - \sqrt[4]{h_{n1}^3} \right]}, \quad (5)$$

- 3) для зимнего льда без снежного покрова (температура воздуха ниже -25°C)

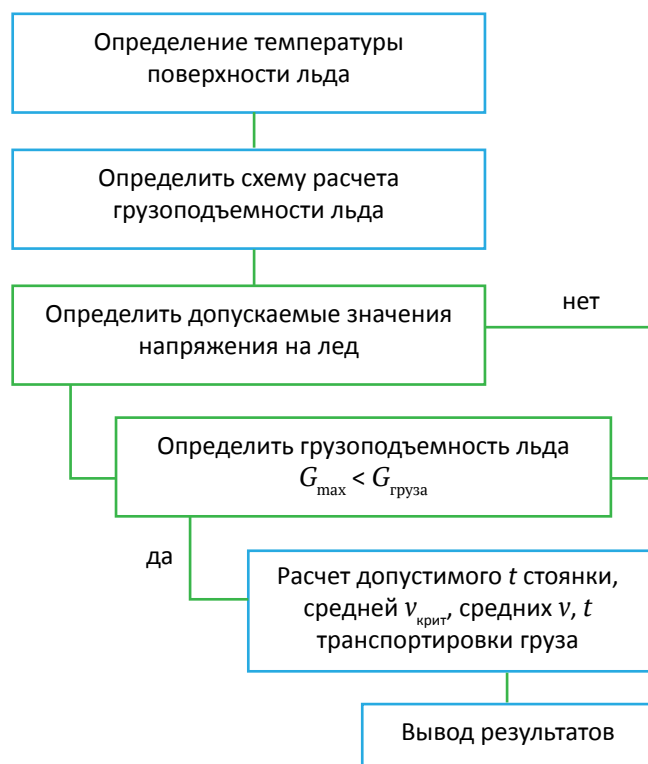
$$G_{3,max} = \frac{\pi ab\sigma^4 \sqrt[4]{h_n^5}}{124,0 \left[0,38\sqrt{ab} - \sqrt[4]{h_{n1}^3} \right]}. \quad (6)$$

При необходимости допустимое время стоянки груза определяется по формуле

$$t = 20 \left[\frac{(G_{max} - G)^2}{G_{max} G} (n + 3) \right]^3. \quad (7)$$

Алгоритм в общем виде представлен на рис. 1.

Рис. 1. Алгоритм расчета оптимального состава транспорта при транспортировке на ледовых трассах
Fig. 1. Algorithm for calculating the optimal composition of transport during transportation on ice routes



В качестве исходных данных, применяемых в работе, были выбраны климатические и погодные гидрометеорологические и гидрологические данные по Карскому морю для нескольких станций с ресурса meteo.ru. Маршрут по ледовой трассе был составлен авторами статьи самостоятельно (исходя из источников ранее используемых маршрутов ледовых трасс), дата выполнения ледовых операций — 20 января 2024 г. Число транспортных средств и их характеристики выбираются самостоятельно (рис. 2).

Для транспортировки грузов в условиях Крайнего Севера через ледовые переправы используется специализированная техника:

1. Ледовые тракторы — специализированные машины, предназначенные для работы на льду. Они обладают мощными двигателями, широкими гусеницами или колесами с шипами, обеспечивая хорошую проходимость и устойчивость на скользких поверхностях. Ледовые тракторы при необходимости могут буксировать прицепы и сани. Масса ледовых тракторов может варьировать в зависимости от их назначения и конструкции. Легкие модели весят около 10 т, тяжелые — до 30 т и больше. Ледовые тракторы могут развивать максимальную скорость 20–40 км/ч.

2. Специальные прицепы и сани, разработанные для использования на ледяных дорогах. Они обладают широкими полозьями или лыжами, которые помогают снизить давление на лед и предотвратить его разрушение и могут иметь разные размеры (длина 2–12 м, ширина 0,5–2 м) и грузоподъемность в зависимости от потребностей. Прицепы и сани могут перевозить грузы от нескольких сотен килограммов до нескольких тонн.

3. Автомобили повышенной проходимости — внедорожники и грузовики с полным приводом.

Для них необходимы специальные шины с шипами или цепями противоскольжения.

В статье для расчетов будут рассматриваться варианты транспортировки наиболее часто используемыми транспортными средствами, позволяющими эффективно работать в условиях низких температур и скользкой поверхности льда — ледовыми тракторами и санями. В задаче будем рассматривать максимальные нагрузки [11], поэтому были взяты тяжелые тракторы и сани с максимальной массой.

Результаты

На первом этапе проводится оценка толщины нарастания льда в зависимости от гидрометеорологических условий с использованием формулы Н.Н. Зубова для рассматриваемой акватории. Для каждого из типов суровости зимы (мягкая, умеренная, суровая) рассчитана толщина нарастания льда по формуле (1). Пример результата расчетов представлен на рис. 3.

По результатам расчета толщины льда для суровой, умеренной и мягкой зимы были построены пространственные карты распределения толщины льда с применением геоинформационной системы (рис. 4–6). По картам можно отметить, что в Карском море толщина льда меняется преимущественно в зональном направлении. Максимальная толщина льда наблюдается на востоке рассматриваемого района, в условиях мягкой зимы толщина льда достигает здесь 160 см, умеренной зимы — более 180 см и суровой зимы — около 200 см.

Для дальнейшего определения состава грузового транспорта и грузоподъемности льда определены маршрут (см. рис. 2) и дата выполнения ледовых операций — 20 января 2024 г. Состояние ледяного покрова по разрезу в районе ледовой трассы определяется как чистый прозрачный лед,

Рис. 2. Маршрут транспортировки грузов
Fig. 2. Cargo transportation route

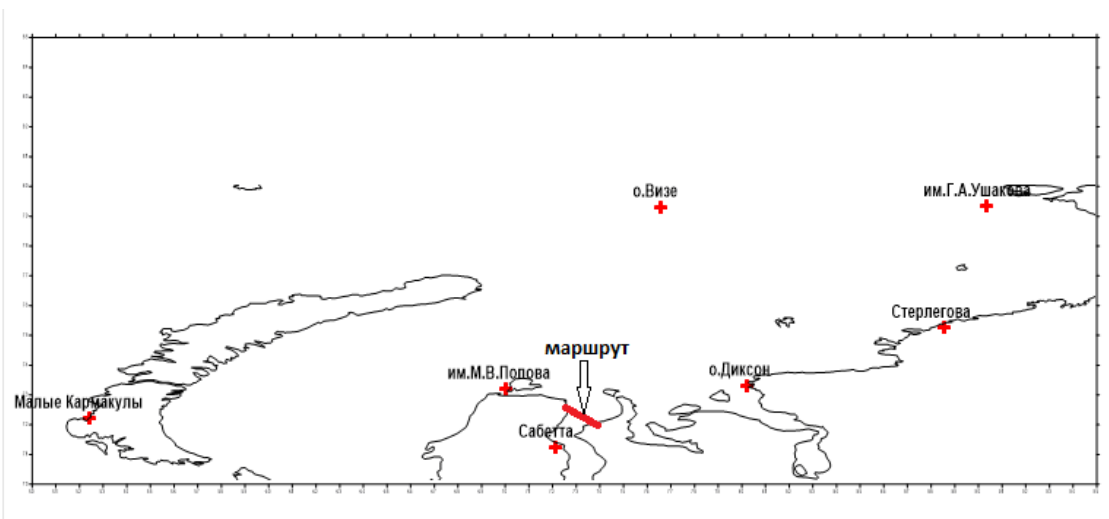


Рис. 3. Рассчитанная толщина льда на станции Сабетта с показателями суммы градусодней мороза
Fig. 3. Calculated ice thickness at Sabetta station with indicators of the sum of degree days of frost

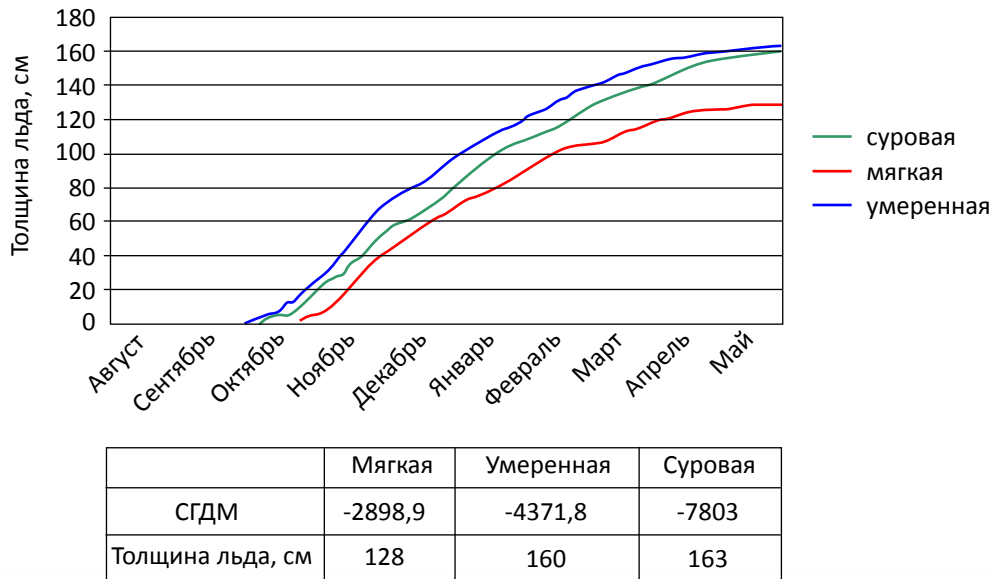


Рис. 4. Пространственное распределение толщины льда в условиях мягкой зимы
Fig. 4. Spatial distribution of ice thickness in mild winter conditions

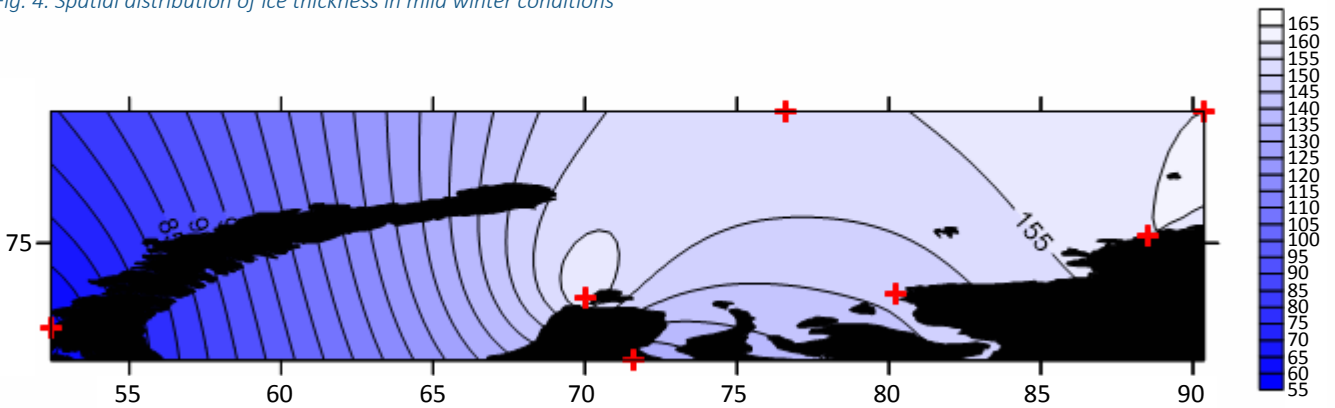


Рис. 5. Пространственное распределение толщины льда в условиях умеренной зимы
Fig. 5. Spatial distribution of ice thickness in temperate winter conditions

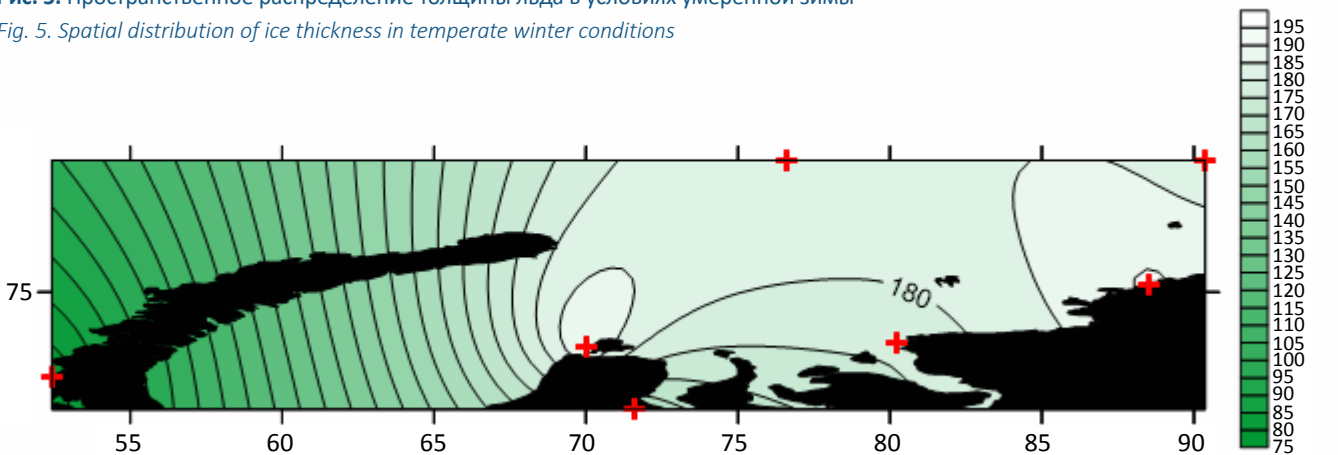
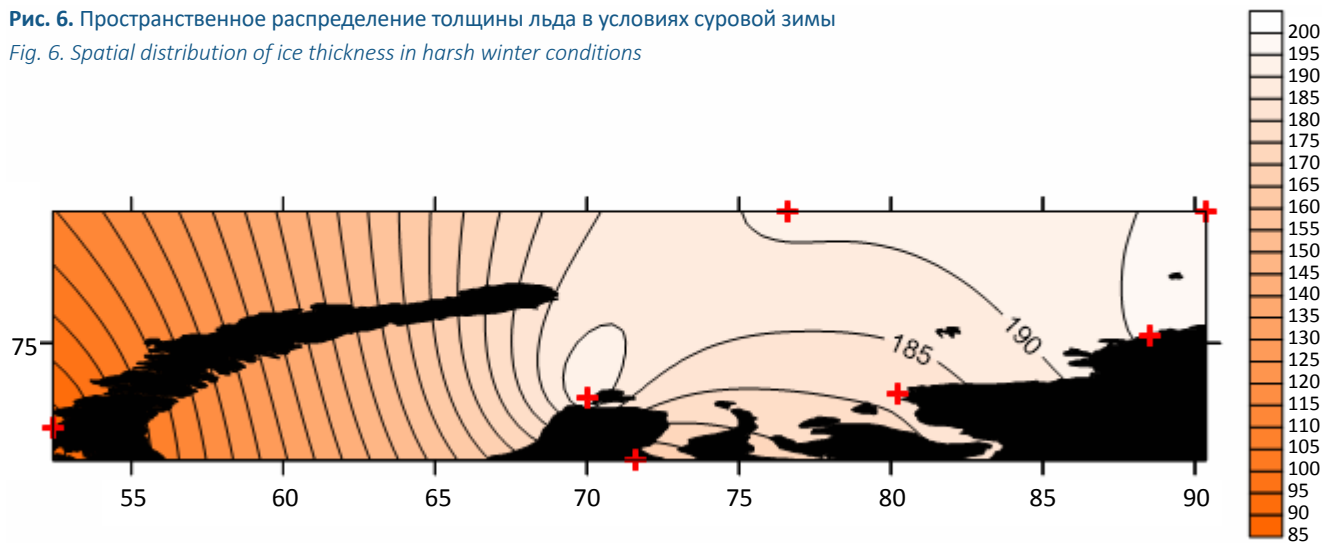


Рис. 6. Пространственное распределение толщины льда в условиях суровой зимы

Fig. 6. Spatial distribution of ice thickness in harsh winter conditions



температура воздуха по прогнозу -15°C . Число имеющихся транспортных средства, доступных для транспортировки груза, – 3 трактора и 15 саней. Исходные данные представлены в табл. 1. Для примера выведены результаты расчетов при ис-

пользовании всех транспортных средств (табл.2), минимально возможного количества каждого имеющегося транспортного средства (табл. 3). Результаты оптимального варианта транспортировки представлены в табл. 4, 5.

Табл. 1. Входные данные для модели

Tab. 1. Input data for the model

Длина трактора, м	4,4	Длина саней, м	5
Ширина трактора, м	3,6	Ширина саней, м	3,50
Масса трактора, кг	30000,0	Масса саней, кг	1500,00
Количество тракторов	3,0	Количество саней	15,00
Грузоподъемность саней, кг	102000	а, м	114,55
Расстояние между трактором и санями, м	1,5	б, м	3,60

Табл. 2. Результаты расчетов для 3 тракторов и 15 саней

Tab. 2. Calculation results for 3 tractors and 15 sleds

	№ точки	h_n , м	h_c , м	H, м	t_n , $^{\circ}\text{C}$	Q, кН/м ²	G_{max} , кН	t, ч	$V_{кр}$, км/ч
0	19	120	38,00	7,5	-7,74260	1206,63	1810,671	1,016516	34
1	20	107	36,55	7,9	-7,45906	1196,82	1512,501	2,745343	36
2	21	95	35,09	8,6	-7,16552	1137,01	1256,975	6,878146	37
3	22	90	33,64	9,6	-7,12162	1177,20	1154,508	10,207910	32
4	23	118	32,13	10,2	-8,29980	1294,92	1872,365	0,833221	33
5	24	104	30,73	11,2	-8,00194	1265,49	1541,860	2,481962	32
6	25	110	29,27	11,8	-8,39066	1304,73	1738,717	1,284934	31
7	26	110	27,82	12,0	-8,57848	1324,35	1757,413	1,208703	30
8	27	112	26,36	11,4	-8,84041	1343,97	1820,234	0,985549	28
9	28	103	24,91	11,7	-8,74210	1334,16	1641,491	1,772331	27
10	29	122	23,45	12,5	-9,55986	1363,59	2110,603	0,391671	26
11	30	100	22,00	7,0	-9,08430	1334,16	1593,535	2,082111	24

Перевозить груз таким вариантом по данной трассе нельзя.

Табл. 3. Результаты расчетов для 1 трактора и 1 саней

Tab. 3. Calculation results for 1 tractor and 1 sled

	№ точки	h_n , м	h_c , м	H , м	T_n , °C	O , кН/м ²	G_{max} , кН	t , ч	$V_{кр}$, км/ч
0	19	120	38,00000	7,5	-7,74260	843,66	870,0122	7,520000e-04	34
1	20	107	36,54545	7,9	-7,45906	824,04	690,4286	1,370000e-06	36
2	21	95	35,09091	8,6	-7,16552	804,42	548,3931	4,820000e-07	37
3	22	90	33,63636	9,6	-7,12162	794,61	494,5299	2,960000e-05	32
4	23	118	32,18182	10,2	-8,29980	892,71	892,4406	1.142000e-03	33
5	24	104	30,72727	11,2	-8,00194	873,09	695,7907	1,970000e-06	32
6	25	110	29,27273	11,8	-8,39066	912,33	802,9609	1,610000e-04	31
7	26	110	27,81818	12,0	-8,57848	922,14	811,5949	2,020000e-04	30
8	27	112	26,36364	11,4	-8,84041	931,95	847,1984	4,700000e-04	28
9	28	103	24,90909	11,7	-8,74210	941,76	737,9394	1,780000e-05	27
10	29	122	23,45455	12,5	-9,55986	961,38	1022,3910	7,323000e-03	26
11	30	100	22,00000	7,0	-9,08430	951,57	708,3082	4,190000e-06	24

Перевозить груз таким вариантом по данной трассе нельзя.

Табл. 4. Результаты расчетов для 1 трактора

Tab. 4. Calculation results for 1 tractor

	№ точки	h_n , м	h_c , м	H , м	T_n , °C	O , кН/м ²	G_{max} , кН	t , ч	$V_{кр}$, км/ч
0	19	120	38,00000	7,5	-7,74260	843,66	1029,0140	2,013646	34
1	20	107	36,54545	7,9	-7,45906	824,04	728,9479	0,242813	36
2	21	95	35,09091	8,6	-7,16552	804,42	531,0259	0,016393	37
3	22	90	33,63636	9,6	-7,12162	794,61	463,7814	0,003314	32
4	23	118	32,18182	10,2	-8,29980	892,71	1035,5550	2,083640	33
5	24	104	30,72727	11,2	-8,00194	873,09	717,8737	0,217754	32
6	25	110	29,27273	11,8	-8,39066	912,33	868,4533	0,762921	31
7	26	110	27,81818	12,0	-8,57848	922,14	877,7965	0,813926	30
8	27	112	26,36364	11,4	-8,84041	931,95	931,7589	1,157016	28
9	28	103	24,90909	11,7	-8,74210	941,76	755,7045	0,311869	27
10	29	122	23,45455	12,5	-9,55986	961,38	1233,4310	5,099752	26
11	30	100	22,00000	7,0	-9,08430	951,57	709,7680	0,200638	24

1. Средняя критическая скорость движения по трассе 30,83 км/ч.
2. Средняя скорость с учетом отношений нагрузок 12,33 км/ч.
3. При движении со скоростью 30,83 км/ч время доставки груза 1,22 ч.
4. При движении со скоростью 12,33 км/ч время доставки груза 3,06 ч.

Заключение

При оценке толщины льда исследуемой акватории Карского моря определено, что в нарастании толщины льда наблюдается прямая зависимость толщины льда и суммы градусодней мороза, для суровой зимы — толщина льда наибольшая, для мягкой зимы — толщина льда наименьшая. Наиболь-

шее сходство в характере нарастания наблюдается в условиях умеренной и суровой зимы. Полученные результаты могут быть применимы при анализе и долгосрочном планировании грузоперевозок на ледовых трассах Карского моря. На выбранном маршруте в заданный период выполнения расчетов оптимального состава груза для транспортировки по

Табл. 5. Результаты расчетов для 1 саней

Tab. 5. Calculation results for 1 sled

	№ точки	h_r , м	h_c , м	H , м	t_r , °C	Q , кН/м ²	G_{max} , кН	t , ч	$V_{кр}$, км/ч
0	19	120	38,00000	7,5	-7,74260	843,66	956,9372	0,910106	34
1	20	107	36,54545	7,9	-7,45906	824,04	698,5677	0,106533	36
2	21	95	35,09091	8,6	-7,16552	804,42	519,8173	0,006002	37
3	22	90	33,63636	9,6	-7,12162	794,61	457,4163	0,000997	32
4	23	113	32,18182	10,2	-8,29980	892,71	968,0745	0,974609	33
5	24	104	30,72727	11,2	-8,00194	873,09	691,9537	0,098757	32
6	25	110	29,27273	11,8	-8,39066	912,33	827,1408	0,363485	31
7	26	110	27,81818	12,0	-8,57848	922,14	836,0348	0,390308	30
8	27	112	26,36364	11,4	-8,84041	931,95	883,5812	0,558283	28
9	28	103	24,90909	11,7	-8,74210	941,76	729,7701	0,149380	27
10	29	122	23,45455	12,5	-9,55986	961,38	1140,7430	2,433347	26
11	30	100	22,00000	7,0	-9,08430	951,57	689,0825	0,095 514	24

1. Средняя критическая скорость движения по трассе 30,83 км/ч.
2. Средняя скорость с учетом отношений нагрузок 12,33 км/ч.
3. При движении со скоростью 30,83 км/ч время доставки груза 1,22 ч.
4. При движении со скоростью 12,33 км/ч время доставки груза 3,06 ч.

выбранному ледовому маршруту тип зимы определяется как «мягкий», данные о толщине льда и его нарастании в условиях мягкой зимы были использованы для дальнейших расчетов.

В результате решения оптимизационной задачи было определено, что оптимальный состав груза при заданных гидрометеорологических условиях составляет 1 трактор или 1 сани, рассчитана средняя скорость движения и критическая скорость, превышение которой приведет к возникновению опасно-

сти для груза. Рассчитано примерное время доставки груза.

Стоит отметить, что на выбранном маршруте при необходимости увеличения единиц грузового состава возможно применение некоторых технических решений, способствующих увеличению грузоподъемности ледовых переправ, например, искусственное наращивание толщины льда или укрепление части или всей ледовой трассы вмораживаемыми в лед настилами.

Список источников

1. Истомин Е.П., Петров Я.А., Мартын И.А., Новожилова Е.С. Оценка изменчивости климатических характеристик Карского моря для безопасного и эффективного использования Северного Морского пути // Геоинформатика. – 2024. – № 2. – С. 45–53. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-2-45-53.
2. Гончарова Г.Ю., Сиротюк В.В., Якименко О.В., Орлов П.В., Долгодворов Р.Е. Повышение несущей способности и безопасности ледовых автотрасс с помощью армирования и модификации льда // Вестник СибАДИ. – 2023. – Т. 20. – № 6 (94). – С. 786–797. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797.
3. Сиротюк В.В., Якименко О.В., Крашенинин Е.Ю., Щербо А.Н. Строительство и испытание опытного участка ледовой переправы, армированной геосинтетическими материалами // Вестник ТГАСУ. – 2008. – № 4 (21). – С. 157–165.
4. Годацкий С.В., Кокин О.В., Кузнецова О.А., Цвезинский А.С., Архипов В.В. Оценка пределов прочности льда на одноосное сжатие в Охотском море по данным измерений и расчётов // Лед и снег. – 2021. – Т. 61. – № 4. – С. 561–570. DOI: 10.31857/S2076673421040108.
5. Babaei H., Barrette P. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure [Электронный ресурс] / National Research Council of Canada. – 2020. – 36 p. – Режим доступа: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft?id=181a8022-2331-41b5-8f6c-2be31ce47905> (дата обращения: 12.03.2025).
6. Thompson Towell K.L., Matthews E.M., Montmayeur O.M., Burch W.T., Elliott T.J., Melendy Jr T.D., Reilly-Collette M.I., Murdza A., O'Connor D.T., Asenath-Smith E. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions // Cold Regions Science and Technology. – 2022. – Т. 198. – 103508. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103508.

7. Мартын И.А., Федоров Д.Д., Малютин А.С. Долгопериодные климатические колебания ледовой обстановки Арктики // Инновационные методы математики и физики в экологических и гидрометеорологических исследованиях : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции / Под ред. И.В. Зайцевой. – СПб.: РГГМУ, 2023. – С. 310–318.
8. Li C., Li Z., Yang Y., Wang Q., Zhang B., Deng Y. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover // *Cold Regions Science and Technology*. – 2023. – Vol. 213. – 103925. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103925.
9. Leppäranta M. *Mechanics of Lake Ice // Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. - Cham: Springer International Publishing, 2023. – P. 159–203. DOI: 10.1007/978-3-031-25605-9_5.
10. Истомин Е.П., Петров Я.А., Мартын И.А., Аганов С.С., Колбина О.Н. Реализация мониторинга гидрометеорологической обстановки и структуры базы данных для обеспечения безопасности деятельности морских объектов с применением ГИС-технологий // *Информация и космос*. – 2023. – № 2. – С. 95–99.
11. Кондратенко А.А., Крестьянцев А.Б., Таровик О.В., Топаж А.Г. Моделирование систем арктического морского транспорта: основы междисциплинарного подхода и опыт практических работ // *Арктика: Экология и экономика*. – 2017. – № 1. – С. 86–101.

References

1. Istomin E.P., Petrov Ya.A., Martyn I.A., Novozhilova E.S. Assessment of the variability of climatic characteristics of the Kara Sea for the safe and efficient use of the Northern Sea Route. *Geoinformatika*. 2024;(2):45-53. DOI: 10.47148/1609-364X-2024-2-45-53.
2. Goncharova G.Y., Sirotyuk V.V., Yakimenko O.V., Orlov P.V., Dolgodvorov R.E. Loadbearing capacity and safety for winter roads improvement reinforcement and ice modification. *The Russian automobile and highway industry journal*. 2023;20(6):786–797. DOI: 10.26518/2071-7296-2023-20-6-786-797.
3. Sirotyuk V.V., Yakimenko O.V., Krasheninina E.U., Scherbo A.N. Building and testing of an ice bridge reinforced with geogrid. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of construction and architecture*. 2008;(4):157–165.
4. Godetsky S.V., Kokin O.V., Kuznetsova O.A., Tsvetsinsky A.S., Arhipov V.V. Estimation of ice strength limits for uniaxial compression in the Sea of Okhotsk according to measurements and calculations. *Ice and Snow*. 2021;61(4):561–570. DOI: 10.31857/S2076673421040108.
5. Babaei H., Barrette P. A computational modeling basis in support of the Canadian winter road infrastructure. 2020. 36 p. Available at: <https://nrc-publications.canada.ca/eng/view/ft/?id=181a8022-2331-41b5-8f6c-2be31ce47905> (accessed 12.03.2025).
6. Thompson Towell K.L., Matthews E.M., Montmayeur O.M., Burch W.T., Elliott T.J., Melendy Jr T.D., Reilly-Collette M.I., Murdza A., O'Connor D.T., Asenath-Smith E. Construction and structural analysis of an arched cellulose reinforced ice bridge for transportation infrastructure in cold regions. *Cold Regions Science and Technology*. 2022;198:103508. DOI: 10.1016/j.coldregions.2022.103508.
7. Martyn I.A., Fedorov D.D., Malyutin A.S. Long-term climate oscillations in the ice situation in the Arctic. In: *Innovatsionnye metody matematiki i fiziki v ehkologicheskikh i gidrometeorologicheskikh issledovaniyakh: sbornik trudov Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii*. Zaitseva I.V., ed. St. Petersburg: RGGMU; 2023. pp. 310–318.
8. Li C., Li Z., Yang Y., Wang Q., Zhang B., Deng Y. Theory and application of ice thermodynamics and mechanics for the natural sinking of gabion mattresses on a floating ice cover. *Cold Regions Science and Technology*. 2023;213:103925. DOI: 10.1016/j.coldregions.2023.103925.
9. Leppäranta M. *Mechanics of Lake Ice*. In: *Freezing of Lakes and the Evolution of their Ice Cover*. Cham: Springer International Publishing; 2023. pp. 159–203. DOI: 10.1007/978-3-031-25605-9_5.
10. Istomin E.P., Petrov Ya.A., Martyn I.A., Aganov S.S., Kolbina O.N. Implementation of monitoring of the hydrometeorological situation and the structure of the database to ensure the safety of offshore facilities using GIS technologies. *Information and Space*. 2023;(2):95–99.
11. Kondratenko A.A., Krestyantsev A.B., Tarovik O.V., Topaj A.G. Arctic marine transport system simulation: multidisciplinary approach fundamentals and practical experience. *Arctic: Ecology and Economy*. 2017;(1):86–101.

Статья поступила в редакцию 18.09.2024 г., одобрена после рецензирования 09.10.2024 г., принята к публикации 11.10.2024 г.
The article was submitted 18.09.2024; approved after reviewing 09.10.2024; accepted for publication 11.10.2024.

Информация об авторах

Истомин Евгений Петрович

Доктор технических наук, профессор, директор института
Информационных систем и геотехнологий
ФГБОУ ВО «РГГМУ»
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
e-mail: biom220@bk.ru
ORCID: 0000-0001-6247-4373
SPIN-код: 6404-9070
AuthorID: 333123
Scopus ID: 56951051300

Петров Ярослав Андреевич

Кандидат технических наук
Доцент кафедры Прикладной информатики
ФГБОУ ВО «РГГМУ»
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
e-mail: yaroslav.petrov025@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9185-441X

Мартын Ирма Андреевна

Кандидат технических наук
Доцент кафедры Прикладной информатики
ФГБОУ ВО «РГГМУ»
192007 Санкт-Петербург, ул. Воронежская, д. 79
e-mail: irma_martyn@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4332-7308

Information about authors

Evgeny P. Istomin

Professor, Doctor of Technical Sciences
Director of the Institute of Information Systems and Geotechnologies
Russian State Hydrometeorological University
79, Voronezhskaya Str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: biom220@bk.ru
ORCID: 0000-0001-6247-4373
SPIN-код: 6404-9070
AuthorID: 333123
Scopus ID: 56951051300

Yaroslav A. Petrov

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of the Department of Applied Informatics
Russian State Hydrometeorological University
79, Voronezhskaya Str., Saint-Petersburg, 192007, Russia
e-mail: yaroslav.petrov025@gmail.com
ORCID: 0000-0002-9185-441X

Irma A. Martin

Candidate of Technical Sciences
Associate Professor of the Department of Applied Informatics
Russian State Hydrometeorological University
79, Voronezhskaya Str., St. Petersburg, 192007, Russia
e-mail: irma_martyn@mail.ru
ORCID: 0000-0002-4332-7308