



ПРИМЕНЕНИЕ МУРАВЬИНОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ РАСЧЁТА ОПТИМАЛЬНОГО МАРШРУТА ОБЛЁТА НАСЕЛЁННЫХ ПУНКТОВ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ

М. Е. Иванов, А. А. Сербин

Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения

В статье рассмотрен принцип оптимизации траектории полёта между населёнными пунктами Арктической зоны европейской части России – решение классической задачи «коммивояжёра» (нахождение кратчайшего пути обхода всех населённых пунктов без их повторного посещения). Расчёт оптимального маршрута произведён с применением муравьиного алгоритма поиска, программная реализация осуществлена в Matlab. Имитация ферментного усиления локальных маршрутов основана на обмене сигналами с гипотетическим неподвижным источником (автоматический радиопеленгатор–маяк, диспетчерский пункт аэродрома, геостационарный спутник и т.п.).

Ключевые слова: Арктика, экраноплан, населённый пункт, граф, маршрут, оптимизация, муравьиный алгоритм, фермент.

Для цитирования:

Иванов, М. Е. Применение муравьиного алгоритма для расчёта оптимального маршрута облёта населённых пунктов европейского севера России / М. Е. Иванов, А. А. Сербин // Системный анализ и логистика. – 2023. – № 3(37). – с. 186 – 194. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-186-194.

APPLICATION OF THE ANT ALGORITHM FOR CALCULATING THE OPTIMAL ROUTE OF FLIGHT OF SETTLEMENTS IN THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA

M. E. Ivanov, A. A. Serbin

St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

The principle of optimizing the flight path between settlements of the Arctic zone of the European part of Russia is considered. The calculation of the optimal route was carried out using an ant search algorithm, the software implementation is implemented in Matlab. The simulation of pheromone amplification of local routes is based on the exchange of signals with a hypothetical stationary source (an automatic radio direction finder, an airfield control room, a geostationary satellite, etc.).

Keywords: Arctic, WIG craft, settlement, graph, route, optimization, ant algorithm, pheromone.

For citation:

Ivanov, M. E. Application of the ant algorithm for calculating the optimal route of flight of settlements in the European north of Russia / M. E. Ivanov, A. A. Serbin // System analysis and logistics. – 2023. – № 3(37). – p. 186 – 194. DOI: 10.31799/2077-5687-2023-3-186-194.

Введение

Освоение Арктической части России сегодня является одной из наиболее приоритетных задач, направленных на поддержание энергетического, политического и территориального суверенитета страны, что также позволяет успешно развивать объявленный ранее курс на импортозамещение. Юридически данный приоритет закреплён 5 марта 2020 года указом №164 Президента В. В. Путина в рамках инициативы «Основы государственной политики в Арктической зоне до 2035 г.» [1]. Необходимость развития Арктики обусловлена масштабом её территории, богатой ресурсами, которая ввиду неблагоприятного климата имеет крайне низкую плотность населения и слабо развита экономически. Развитие соответствующей транспортной, жилищно–коммунальной и производственной инфраструктуры позволит решить эту проблему в долгосрочной перспективе.

Одним из главных аспектов, вследствие которых является актуальной данная тема – транспортная труднодоступность арктических регионов России. Редкие населённые пункты не только расположены на значительных расстояниях друг от друга, но и связаны по большей части посредством грунтовых дорог (асфальтированные покрытия и железные дороги имеют



слаборазвитую сеть). Большинство удалённых поселений имеет единственный способ снабжения – вертолётное сообщение, которое имеет серьёзные ограничения, связанные с предельной практической дальностью полёта (без дозаправки) данного типа техники.

В теории решить задачу снабжения арктических поселений может тяжёлый экраноплан – низколетящий аппарат–амфибия, главным достоинством которого является наилучшая экономия топлива в сравнении с любым высотным самолётом того же массогабаритного класса, а также бóльшая (чем у вертолётов) грузоподъёмность и дальность автономного полёта. К числу достоинств можно отнести способность принимать борт как для объектов портовой инфраструктуры (в т. ч. наличие порта–приписки), так и для аэродромов любого класса (за исключением Е, до 500 метров). Однако отдельного рассмотрения стоят дополнительные трудности создания и эксплуатации тяжёлого экраноплана:

- а) Синтез комбинированной силовой установки из 10–16 двигателей требуемой мощности;
- б) Гибридная механизация судна, которая позволяет взлетать и с твёрдой (колёсное шасси), и с морской поверхности (гидролыжи);
- в) Необходимость создания инфраструктуры для приёма, хранения и ремонта, в том числе и в удалённых труднодоступных местах.

Следующим этапом является формирование перечня поселений в российской Арктике, которые рассматриваемое судно будет обслуживать. Здесь целесообразно разделение на отдельные локальные задачи по географическому принципу: наличие Уральских гор, разделяющих страну на европейскую и азиатскую части, накладывает некоторые ограничения на перемещение низколетящего аппарата над сушей. С другой стороны, облёт горных массивов над Баренцевым и Карским морями лишает смысла задачу поиска оптимального маршрута ввиду неоправданного увеличения преодолеваемой дистанции – и, как следствие, теряется преимущество в экономии топлива низколетящего аппарата по сравнению с высотным на одинаковые расстояния. Поэтому в рамках данной статьи будут рассмотрены Европейский Север России (64–65° северной широты и выше) в качестве географической области поиска оптимального маршрута облёта 25 населённых пунктов разной степени развития инфраструктуры, экономических возможностей и удалённости друг от друга.

Оптимизация производится с использованием имитации функционирования муравьиной колонии – полиномиального алгоритма поиска кратчайшего пути обхода точек графа [2, 3]. Этот механизм впервые был описан учёным М. Дориго в докторской диссертации (Optimization, Learning and Natural Algorithms) 1992 года. Прототипом послужило поведение группы муравьёв в колонии во время сбора еды и материалов для строительства колонии: на первом этапе насекомые осуществляли хаотичное перемещение по разнообразным маршрутам, затем наиболее кратчайшие пути отмечались с помощью выделения пахучего фермента (pheromone). По путям, отмеченным ферментом, двигались следующие муравьи, оставляя после себя точно такой же след, что усиливало запах и делало его более привлекательным для последующих групп. На более длинных путях фермент быстрее испарялся, поэтому постепенно о них муравьи «забывали». Таким образом, остаются наиболее кратчайшие маршруты следования из точек A_i в точки B_j , регулярно подкрепляемые ферментом муравьёв, путешествующих по ним.

Математическая модель

Пусть имеются две соседние вершины графа i и j . Вероятность перехода k -го муравья между ними вычисляется формулой [4]:

$$P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} \quad (1.1)$$



где $\tau_{ij}(t)$ – количество фермента на ребре $i - j$, который меняется в течение каждой итерации t , $J_{i,k}$ – список ещё не посещённых городов. Величина η_{ij} называется видимостью, которая обратна расстоянию D_{ij} и соответствует желанию муравья, находящегося в вершине i , посетить j :

$$\eta_{ij} = \frac{1}{D_{ij}} \quad (1.2)$$

Параметры α и β являются настраиваемыми эмпирически и соответствуют весам ферментного следа $\tau_{ij}(t)$ и видимости η_{ij} . Значение $\alpha = 0$ соответствует «жадному» алгоритму классической теории оптимизации, в то время как $\beta = 0$ приводит к преждевременной сходимости муравьиного алгоритма к субоптимальному решению.

Следует заметить, что формула (1) не фиксирует факт перехода из точки i в точку j , а лишь является вероятностью данного события. Поэтому выбор пути не всегда основан на доверии к большему значению $P_{ij}(t)$, и может быть осуществлён стохастически (например, методом «колеса рулетки»).

После того, как муравей преодолел расстояние между i и j , он откладывает на этом участке количество фермента

$$\Delta\tau_{ij,k}(t) = \frac{Q}{D_{ij}(t)} \text{ при } (i, j) \in T_k(t) \quad (1.3)$$

где $T_k(t)$ – маршрут, пройденный k -ым муравьём на t -ой итерации, $D_{ij}(t)$ – длина этого маршрута, Q – параметр, требующий регулировки, который имеет тот же порядок, что и длина маршрута.

Для полноценной работы муравьиного алгоритма важно не только приращение фермента, но и его испарение. Пусть коэффициент испарения $p \in (0, 1)$, тогда формула, по которой количество фермента на участке маршрута будет обновляться с каждой последующей итерацией, примет вид

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t) \quad (1.4)$$

где $\Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij,k}(t)$, m – общее число муравьёв в колонии. В начале работы алгоритма $\tau(0) = \tau_0$, в то время как $m = \text{const}$. Число муравьёв в колонии обычно равно количеству городов: слишком большое значение m приводит к быстрому нахождению субоптимальных решений, в то время как малое количество муравьёв гарантирует потерю их кооперации и рассинхронизацию работы колонии как системы. В первую очередь из-за ограниченного взаимодействия, вследствие чего испарение фермента будет происходить быстрее выделения на всех участках маршрута. В начале оптимизации каждый муравей начинает движение со своей вершины (города) и заканчивает его только тогда, когда посетит все пункты лишь один раз, т. е. вероятность (1) посещения следующего города, не принадлежащего списку не посещённых, нулевая:

$$P_{ij,k} = 0 \text{ при } j \notin J_{i,k} \quad (1.5)$$

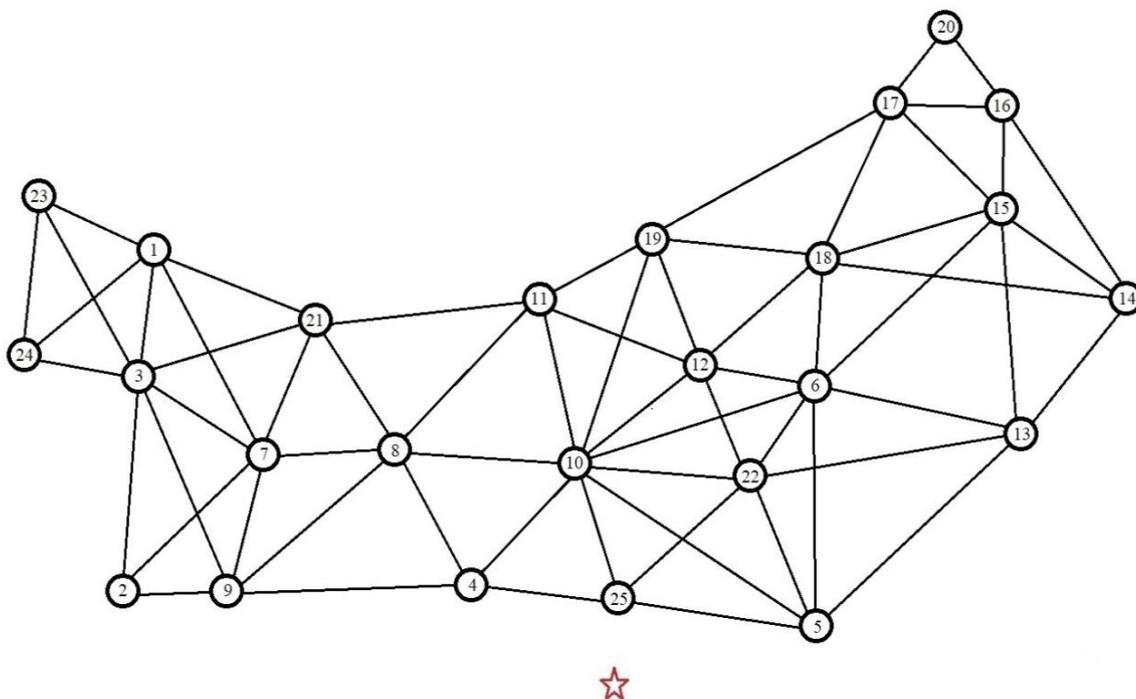
Таким образом, сформированный математический аппарат позволяет решить целевую задачу нахождения $\min \sum_{k=1}^m D_{ij,k}$ при условии $j \notin J_{i,k}$, которая является классической задачей



коммивояжёра применительно к населённым пунктам российской Арктики.

Практическая и программная реализация алгоритма

На рисунке 1 представлен граф, вершинами которого являются населённые пункты европейской части российской Арктики, а рёбра – фактические расстояния между ними с учётом кривизны Земли, которые не являются прямыми. Число населённых пунктов n равно кол-ву муравьёв m (экранопланов, стартующих с разных вершин), $m = n = 25$.



64-65 параллель

Рис. 1. Граф населённых пунктов европейской части российской Арктики ($\geq 64^\circ$ с. ш.)

Вершины графа обозначены номерами, которые соответствуют следующим населённым пунктам (Табл. 1):

Таблица 1 – Поселения Европейского Севера России ($\geq 64^\circ$ с. ш.)

1	Мурманск / Североморск	6	Нарьян–Мар	11	Шойна	16	Амдерма	21	Краснощелье
2	Костомукша	7	Умба	12	Индига	17	Варнек	22	Усть–Цильма
3	Апатиты	8	Сосновка	13	Печора	18	Варандей	23	Никель
4	Архангельск	9	Соловецкий	14	Воркута	19	Бугрино	24	Ковдор
5	Ухта	10	Мезень	15	Каратайка	20	Белушья Губа	25	Карпогоры

Между i -ми и j -ми вершинами проведено 62 ребра с длинами D_{ij} , соответствующими расстояниям между населёнными пунктами (в км): из графа были исключены ij -рёбра, если соответствующие им в реальности населённые пункты находятся на чрезмерно больших расстояниях друг от друга (по сравнению с другими ближайшими по соседству).

Красной звездой под графом отмечен гипотетический излучатель сигнала, который может быть использован для имитации ферментного усиления маршрутов прохождения



экраноплана: им может быть специально построенный и оборудованный диспетчерский пункт, автоматический радиопередатчик или геостационарный спутник на орбите. С ним у экраноплана в полёте должна быть установлена связь на каждом участке прохождения пути. Таким образом, чем больше расстояние от источника сигнала (красной звезды) до участка $i - j$ общего маршрута, тем менее этот участок предпочтителен с точки зрения ферментного усиления и будет иметь меньшее значение $\tau_{ij}(t)$ количества фермента на ребре $i - j$.

В табл. 2 представлены основные характеристики рёбер графа; расстояния D_{ij} соответствуют реальным расстояниям между населёнными пунктами, указанными в таблице 1.

Таблица 2 – Основные характеристики графа, необходимые для оптимизации маршрута

Рёбра $i - j$	Расстояния D_{ij} , км	Фермент T_{ij}	$N = 1/D$	Вероятности перехода $P_{ij,k}$
1 – 23	123,2	0,715	0,0081169	0,024118277
1 – 24	190,5	0,725	0,0052493	0,015815902
1 – 3	157,0	0,805	0,0063694	0,021308220
1 – 21	244,0	0,800	0,0040984	0,013625458
1 – 7	259,0	0,825	0,0038610	0,013237474
23 – 24	205,6	0,715	0,0048638	0,014452197
3 – 23	242,0	0,725	0,0041322	0,012450121
3 – 24	121,5	0,755	0,0082305	0,025823887
3 – 21	160,0	0,825	0,0062500	0,021428162
3 – 7	105,5	0,855	0,0094787	0,033679420
3 – 9	298,0	0,850	0,0033557	0,011853691
2 – 3	350,0	0,815	0,0028571	0,009676995
2 – 7	291,8	0,870	0,0034270	0,012390388
2 – 9	244,0	0,875	0,0040984	0,014902845
7 – 9	193,0	0,880	0,0051813	0,018948564
7 – 21	140,0	0,850	0,0071429	0,025231428
4 – 9	229,5	0,925	0,0043573	0,016749814
8 – 9	278,0	0,900	0,0035971	0,013453914
7 – 8	276,0	0,880	0,0036232	0,013250264
8 – 21	180,5	0,870	0,0055402	0,020030555
4 – 8	214,5	0,930	0,0046620	0,018018001
4 – 10	225,5	0,950	0,0044346	0,017507656
4 – 25	197,6	0,985	0,0050607	0,020715730
8 – 10	178,5	0,925	0,0056022	0,021535475
8 – 11	217,0	0,850	0,0046083	0,016278341
11 – 21	307,5	0,825	0,0032520	0,011149612
10 – 11	226,4	0,890	0,0044170	0,016336707
10 – 25	204,6	0,980	0,0048876	0,019905422
5 – 25	456,0	0,985	0,0021930	0,008976816
22 – 25	399,0	0,980	0,0025063	0,010207141
5 – 10	513,7	0,975	0,0019467	0,007887620
10 – 22	364,6	0,925	0,0027427	0,010543287
6 – 10	432,6	0,900	0,0023116	0,008645835
10 – 12	291,1	0,890	0,0034352	0,012705704
10 – 19	392,0	0,870	0,0025510	0,009223253
11 – 12	206,6	0,850	0,0048403	0,017097773



Рёбра $i - j$	Расстояния D_{ij} , км	Фермент T_{ij}	$N = 1/D$	Вероятности перехода $P_{ij,k}$
11 – 19	234,0	0,830	0,0042735	0,014740533
12 – 19	125,5	0,845	0,0079681	0,027981045
12 – 22	282,2	0,870	0,0035436	0,012811890
5 – 22	220,9	0,900	0,0045269	0,016931590
5 – 6	453,8	0,890	0,0022036	0,008150354
5 – 13	244,7	0,880	0,0040866	0,014945128
6 – 22	247,3	0,870	0,0040437	0,014619957
13 – 22	238,0	0,865	0,0042017	0,015103935
6 – 12	167,8	0,855	0,0059595	0,021175082
12 – 18	393,9	0,845	0,0025387	0,008915007
17 – 19	435,3	0,800	0,0022973	0,007637518
18 – 19	352,0	0,830	0,0028409	0,009799104
6 – 18	246,8	0,850	0,0040519	0,014312804
17 – 18	126,1	0,810	0,0079302	0,026694444
6 – 13	334,6	0,825	0,0029886	0,010246581
6 – 15	362,8	0,820	0,0027563	0,009392853
15 – 18	126,5	0,810	0,0079051	0,026610035
13 – 15	443,2	0,820	0,0022563	0,007688915
15 – 17	109,8	0,785	0,0091075	0,029711068
13 – 14	401,3	0,815	0,0024919	0,008439941
14 – 15	187,7	0,790	0,0053277	0,017490965
14 – 16	272,0	0,780	0,0036765	0,011917266
15 – 16	111,0	0,775	0,0090090	0,029015474
16 – 17	59,50	0,765	0,0168067	0,053431260
16 – 20	395,0	0,725	0,0025316	0,007627669
17 – 20	349,3	0,730	0,0028629	0,008685108
14 – 18	288,0	0,815	0,0034722	0,011760237

Полученные по формуле (1.1) вероятности переходов $P_{ij,k}$ от вершины i к вершине j для k -го муравья не гарантируют обязательное перемещение между ними, а только лишь показывают наиболее предпочтительный сценарий для выбора в случае наличия нескольких вариантов (вершин, открытых для посещения). Поэтому возможны ситуации, когда для перехода выбирается вершина с меньшей вероятностью случайным образом: добавление элемента случайности осуществляется, например, методом рулетки или подбрасыванием двух игральные кубиков.

Ниже представлен типовой программный код, реализующий муравьиный алгоритм в среде Matlab [5]:

```

<Ввод матрицы расстояний D>
<Инициализация параметров алгоритма  $\alpha$  (alpha),
 $\beta$  (beta),  $\epsilon$ , Q,  $0 < \tau$  (tau0)>
m=n % Количество муравьев равно числу городов
For i=1:n
For j=1:n % Для каждого ребра
If i~j
eta(i,j)=1/D(i,j); % Видимость
tau(i,j)= tau0; % Фермент
Else tau(i,j)=0;

```



```

% Переход из одного города в тот же самый
% невозможен
End
End
End
For k=1:m
<Разместить муравья k в случайно выбранный
город>
End
<Выбрать условно#кратчайший маршрут T+ и
рассчитать его длину L+>
% Основной цикл
For t=1:tmax
% tmax # количество итераций алгоритма
For k=1:m % Для каждого муравья
<Построить маршрут Tk(t) по правилу (1) и
рассчитать длину Lk(t)>
End
If < “Лучшее решение найдено?” >
<Обновить T+ и L+ >
End
For i=1:n
For j=1:n % Для каждого ребра
<Обновить следы феромона по правилам (2) и
(3).>
End
End
End
<Вывести кратчайший маршрут T+ и его длину L+>

```

Результаты оптимизации

В таблице 3 представлены рассчитанные значения длин маршрутов посещения $S_{ij,n}$ целевых населённых пунктов ($n = 25$) на третьей итерации. Здесь было получено квазиоптимальное расстояние $S_{13...5} = 5294,8$ км. Дальнейшая оптимизация не приводит к наименьшим значениям при заданных начальных условиях, однако их нахождение теоретически возможно при изменении, например, весовых коэффициентов α и β или при изменении параметров моделирования ферментного усиления.

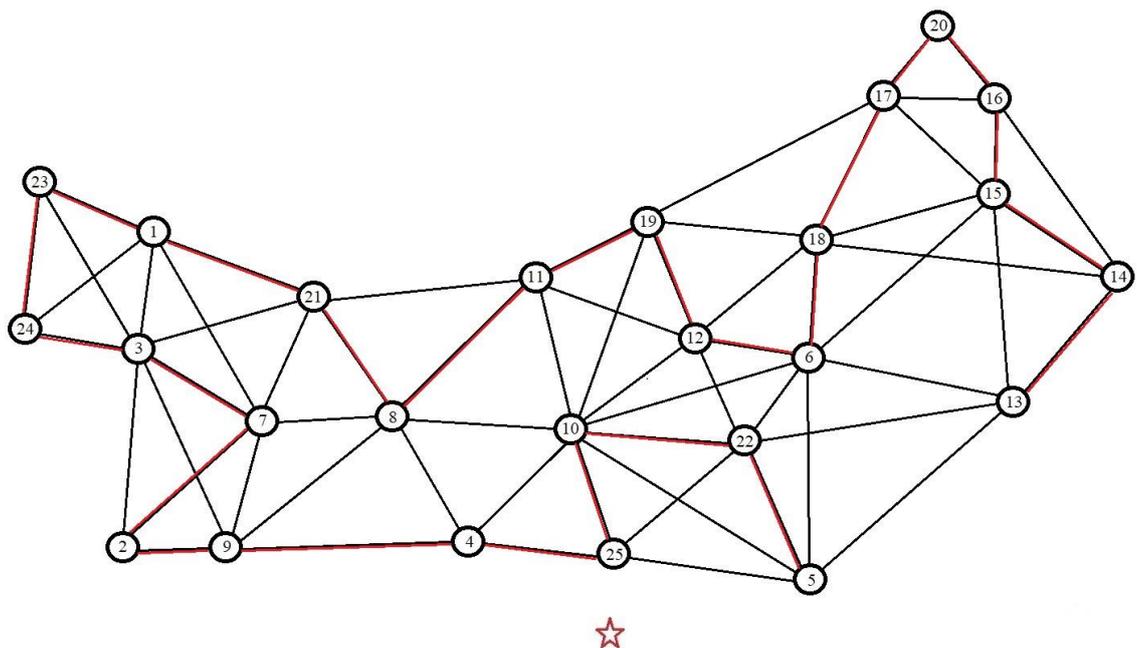
Таблица 3 – Результаты оптимизации

№	Маршрут облёта населённых пунктов	$S_{ij,n}$, км
1	1-23-24-3-7-21-8-10-11-12-19-18-15-17-20-16-14-13-5-6-22-25-4-9-2	5635,1
2	2-9-7-3-24-23-1-21-8-10-4-25-22-5-13-6-12-11-19-18-15-17-20-16-14	5431,1
3	3-7-2-9-4-25-10-12-6-22-5-13-14-15-16-20-17-18-19-11-8-21-1-23-24	5571,5
4	4-25-10-8-7-9-2-3-24-23-1-21-11-12-19-18-15-17-20-16-14-13-5-22-6	5696,4
5	5-22-13-6-12-10-25-4-8-9-7-2-3-24-23-1-21-11-19-18-15-17-20-16-14	5822,3
6	6-12-22-5-13-14-15-16-20-17-18-19-11-8-10-25-4-9-7-21-1-23-24-3-2	5476,5
7	7-3-24-23-1-21-8-10-11-12-19-18-15-17-20-16-14-13-5-6-22-25-4-9-2	5739,1
8	8-10-25-4-9-2-7-3-24-23-1-21-11-19-12-22-5-13-14-15-16-20-17-18-6	5377,8
9	9-2-3-24-23-1-21-7-8-4-10-25-5-22-12-11-19-18-6-13-14-15-16-20-17	6126,3
10	10-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-25-22-6-12-11-19-18-17-20-16-15-14-13-5	5543,5



№	Маршрут облёта населённых пунктов	$S_{ij,n}$, км
11	11-12-19-18-17-20-16-15-14-13-6-22-5-25-4-10-8-21-7-9-2-3-24-23-1	5672,7
12	12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-25-10-22-5-13-14-15-16-20-17-18-6	5371,7
13	13-14-15-16-20-17-18-6-12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-25-10-22-5	5294,8
14	14-15-16-20-17-18-6-22-12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-10-25-5-13	5398,3
15	15-16-20-17-18-6-12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-25-10-22-5-13-14	5351,8
16	16-20-17-15-18-6-12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-25-10-22-5-13-14	5351,0
17	17-20-16-15-18-6-22-12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-10-25-5-13-14	5612,3
18	18-17-20-16-15-14-13-22-6-12-19-11-8-21-1-23-34-3-7-2-9-4-10-25-5	5676,4
19	19-12-6-18-17-20-16-15-14-13-22-5-25-10-4-8-9-2-7-3-24-23-1-21-11	5591,1
20	20-17-16-15-14-13-22-6-18-12-19-11-8-21-1-23-24-3-7-2-9-4-10-25-5	5443,0
21	21-7-8-11-10-22-6-12-19-18-17-20-16-15-14-13-5-25-4-9-2-3-1-23-24	5894,6
22	22-5-13-6-12-10-25-4-8-7-9-2-3-24-23-1-21-11-19-18-17-20-16-15-14	5695,7
23	23-1-24-3-7-21-8-10-11-12-6-18-19-17-20-16-15-14-13-22-5-25-4-9-2	5704,9
24	24-3-7-2-9-4-25-10-12-6-22-5-13-14-15-16-20-17-18-19-11-8-21-1-23	5487,4
25	25-4-8-7-9-2-3-24-23-1-21-11-10-12-19-18-17-20-16-15-14-13-6-22-5	5845,1

Кратчайший маршрут на графе расстояний выделен красным цветом (рис. 2):



64-65 параллель

Рис. 2. Граф расстояний с квазиоптимальным маршрутом ($S_{ij,n} = 5294,8$ км)

Заключение

В заключение стоит заметить, что рассчитанный квазиоптимальный маршрут предполагает старт из точки №13, соответствующей населённому пункту Печора. Таким образом, при выборе его в качестве основополагающего для полётного задания экраноплана необходимо провести дополнительные исследования. В частности, целесообразен сравнительный анализ маршрута с началом в Печоре и маршрута из Мурманска/Североморска. Он необходим для экономических расчётов по каждому из них: дешевле обойдётся строительство обслуживающей инфраструктуры для экраноплана в городе Печора или же использование уже готовой базы флота в Североморске (порта в Мурманске)?



И если выгоднее с нуля построить порт приписки в Печоре, то через какое время его строительство окупится благодаря кратчайшему маршруту облёта?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавель В. П. Арктика-2035. Государственная политика России, международное сотрудничество с европейскими государствами в Арктике / В. П. Журавель // Большая Евразия: Развитие, безопасность, сотрудничество: Ежегодник. Материалы Третьей международной научно-практической конференции в рамках Общественно-научного форума "Здравствуй, Россия!", Москва, 14–15 октября 2020 года / Отв. редактор В.И. Герасимов. Том Выпуск 3. Часть 2. – Москва: Институт научной информации по общественным наукам РАН, 2020. – С. 309-314. – EDN YPAXOR.
2. Гвоздев Л. Р. Решение задачи маршрутизации транспортных средств с временными окнами с помощью алгоритма муравьиных колоний / Л. Р. Гвоздев, Т. А. Медведева // Молодой исследователь Дона. – 2022. – № 3(36). – С. 58-61. – EDN DVQPKA.
3. Dorigo M. Optimization, Learning and Natural Algorithms / M. Dorigo // PhD thesis. – Politecnico di Milano, Italy. – 140 p.
4. Калиберда Е. А. "Муравьиный" алгоритм в решении задачи коммивояжера / Е. А. Калиберда, М. Ю. Гуненков, Д. С. Дюсеменов, И. В. Федотова // Прикладная математика и фундаментальная информатика. – 2020. – Т. 7, № 2. – С. 10-17. – DOI: 10.25206/2311-4908-2020-7-2-10-17. – EDN SKFKZZ.
5. Штовба С. Д. Муравьиные алгоритмы / С. Д. Штовба // Мастерская решений. – 2003. № 4 (4). – С. 70-75.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Иванов Михаил Евгеньевич –

Ассистент кафедры 13, инженер кафедры 13
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: sindbad1995@list.ru

Сербин Андрей Алексеевич –

Аспирант
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения
190000, Санкт-Петербург, ул. Большая Морская, д. 67, лит. А
E-mail: SerbinGUAP@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ivanov Mikhail Evgenievich –

Assistant of the department 13, engineer of the department 13
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: sindbad1995@list.ru

Serbin Andrei Alekseevich –

Graduate student
Saint-Petersburg State University of Aerospace Instrumentation
67, Bolshaya Morskaya str., Saint-Petersburg, 190000, Russia
E-mail: SerbinGUAP@yandex.ru