

-

()

()

()

()

:

II , _____ -20-1

(,)

123 « ' _____ »

()

-

(- -)

,

()

:

(, ,)

() _____ (,)

-

()

123 « ' »

()

-

(- -)

,

()

:

“ ” 20 .

(, ,)

1.

“ 25 ” 2021 . 169
13 2020 .

2.

3.

, IntelliJIDEA 2020.3.3, Java,
Java Maven,

4.

1)

;

2)

;

3)

;

4)

;

5)

;

6)

.

5. _____ , _____ , _____ , _____ , _____
 () _____
 - -17

6. _____ , _____ .1) (_____)

	(_____ , _____ , _____ , _____)		

1		03.11.21-09.11.21	
2		10.11.21-17.11.21	
3		18.11.21-23.11.21	
4		24.11.21-01.12.21	
5		02.12.21-07.12.21	
6		08.12.21-09.12.21	
7	-	10.12.21-11.12.21	

25 2021 .

 ()

 () _____ (_____ , _____)

: 95 ., 17 ., 13 .,

2 ., 32 .

, , , ,
* ,
, , ,
, .

,

.

,

.

.

(

).

ABSTRACT

Master's thesis: 95 pages, 17 figures, 13 tables, 2 appendices, 32 sources.

LABYRINTH, GRAPH, ROUTE, SHORTEST PATH, DIJKSTRA ALGORITHM, A* SEARCH ALGORITHM, GREEDY SEARCH ALGORITHM, LEE ALGORITHM, GENETIC ALGORITHM, ANT COLONY ALGORITHM, ANNEALING ALGORITHM.

The major goal of this thesis is to analyze performance and effectiveness of computational intelligence instruments in context of solving mazes and finding the shortest path through them.

In order to analyze these algorithms, an application has been developed that finds a path through a user-specified maze utilizing each of the researched algorithms. A set of tests has been implemented to test the algorithms in various conditions. The analysis of computational intelligence algorithms has also been made in comparison to more classic solutions to such problems (e.g. Dijkstra algorithm).

	,	,	,	
	.....			8
	.....			9
1	.....			11
1.1	.....			11
1.2	.....			12
1.2.1	.....			12
1.2.2	.....			13
1.2.3	.....			15
1.2.4	.....			16
1.3	.....			19
2	.....			20
2.1	.....			20
2.1.1	.....			21
2.1.2	.....			22
2.1.3	*			22
2.1.4	.....			23
2.2	.....			24
2.2.1	.....			25
2.2.2	.....			26
2.2.3	.....			27
3	.....			29
3.1	.....			29
3.2	.....			30
3.3	.....			32
3.3.1	.....			32
3.3.2	.....			33

3.3.3	*	.....	34
3.3.4		.....	35
3.3.5		.....	35
3.3.6		.....	37
3.3.7		.....	38
4		.....	40
4.1		.....	40
4.2		.....	44
4.2.1	«	»	45
4.2.2	«	»	47
4.2.3	«	»	48
4.2.4	«	»	50
4.2.5	«	»	52
4.2.6	«	»	54
4.2.7		.....	56
		.....	58
		.....	60
		.....	63
		.....	73
.1		.....	73
.1.1		.....	73
.1.2	*	.....	74
.1.3		.....	76
.1.4		.....	78
.1.5		.....	79
.1.6		.....	83
.1.7		.....	86
.2		.....	91
.2.1		.....	91
.2.2		.....	92

, , ,

—
— , ,
—

— - ,

,
— ,

—

—

—

DTO — ,
(., Data Transfer Object)

IS-IS — (., Intermediate System to Intermediate System)

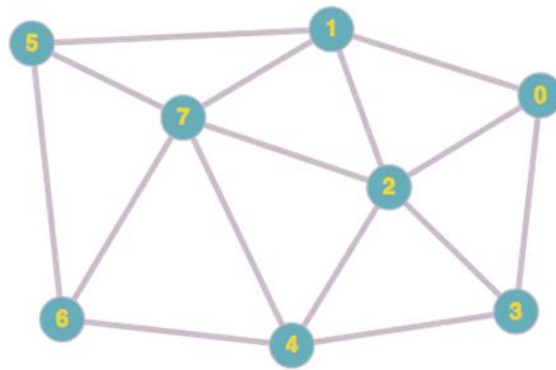
OSPF — (., Open Shortest Path First)

STATE- — ,

1

1.1

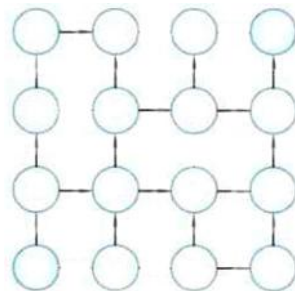
, , . (1.1).



1.1 –

(1.2).

, , , () [1].



1.2 –

, , ,
 - .
 ,
 () , ,
 , [2].
 ,
 :
 - ;
 - ;
 - (, ,).
 [4]. , ,
 - , ,
 .
 ,
 :
 - ;
 - ;
 - .
 ,
 [3].

1.2

1.2.1

,
 , Google OpenStreetMap (1.3).

[31].

. .)

A

B.

[14].

(1.4).



1.4 –

«

»

1.2.3

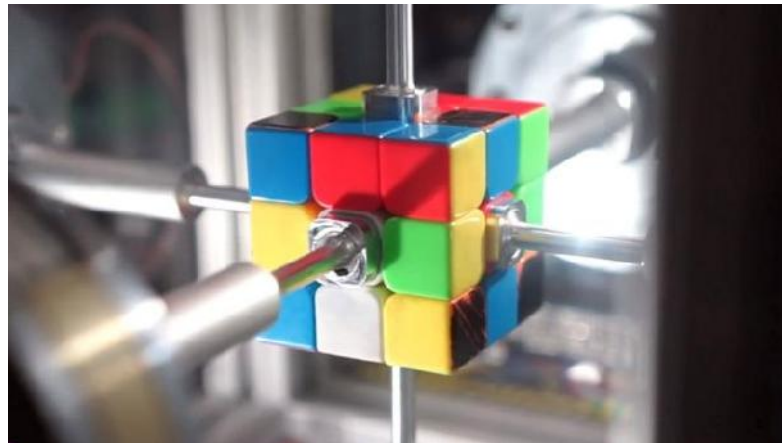
[8].

3x3

(1.5).

0.38

3.47



. (,) . [7].

(), :

- ALT;
- Arc Flags;
- Contraction hierarchies;
- Transit Node Routing;
- Reach based Pruning;
- Labeling.

1.3 ,

[9]. (,), , ,

- ;
 - *;
 - ;
 - ().
- , ,

[10].

*
(
).

[22].

[21].

[28].

[26].

« » [25].

1.3

,

.

.

,

-

.

:

- « » (« »);

- ;

- ;

- ;

- ;

- .

.

,

-

.

,

,

.

2

.

.

,

[30].

.

2.1

—

,

,

,

,

.

,

.

,

: «

».

,

,

:

—

,

,

—

,

.

,

,

[8].

:

,

,

:

—

,

,

.

,

,

2.1.1

1959

OSPF

IS-IS [15].

« »

0,

U,

U

U,

u,

U

U

u

[18].

2.1.2

() –
 ,
 ,
 « – », n
 « f(n), n,
 , , , ,
 - » [19].
 « – »
 , , , ,
 , , , ,
 .
 « – ».
 , ,
 . A* (-star)
 « – » [20].

2.1.3 *

A* – ,
 ,
 () (,).
 «
 + » (f(x)). – :
 (x) ()
 g (x) ,),
 (h(x)).

$h(x)$

$h(x)$

[22].

1968

1959

()

« A».

A*.

2.1.4

() –

(),

« »

« »

–

« ».

« »

« ».

[21].

,
 , « »
 .
 « », ,
 .

2.2.1

— ,
 ,
 , .
 « »,
 - ,
 . « - »
 , «
 » [28].

- :
- ;
- ();
- ();
- ().

[24].

,
 .
 « », .

[27].

» ((mutation)), (crossover) «

[23].

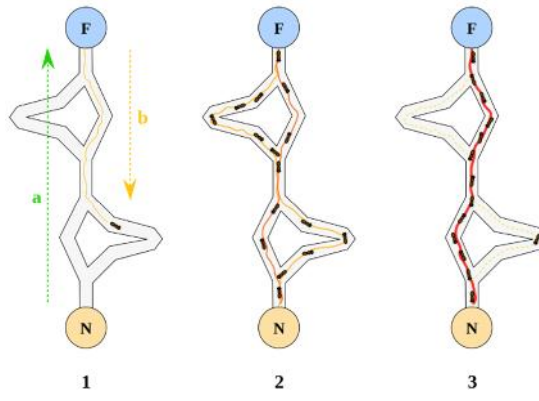
2.2.2

(),

:

;

(2.1).



2.1 –

()

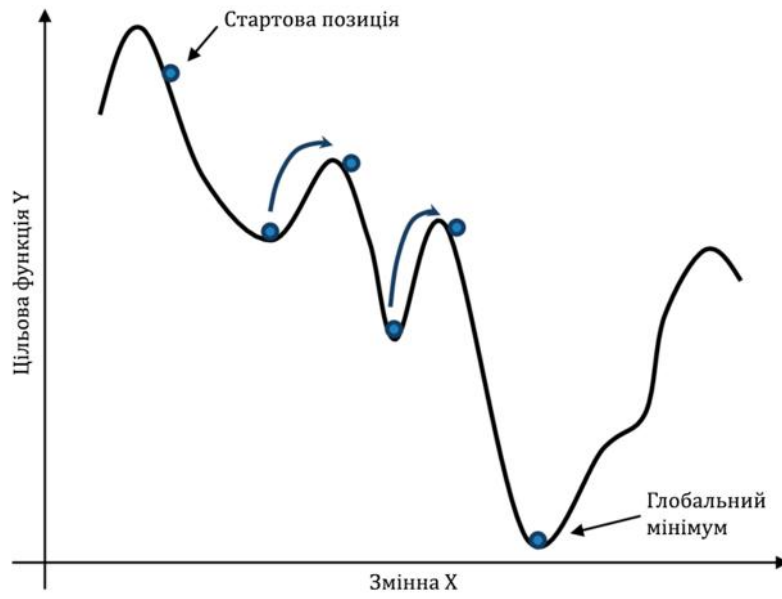
AntOptima.

[26].

2.2.3

(2.2).

1953



2.2 –

[25].

3

3.1

```

    ,
    ,
    , -
    .

```

Graph.

```

- ( );
- ( );
-
.
:
- ;
- ;
- ;
-

```

Transition.

```

- ;
- .

```

ShortestPathDTO.

```

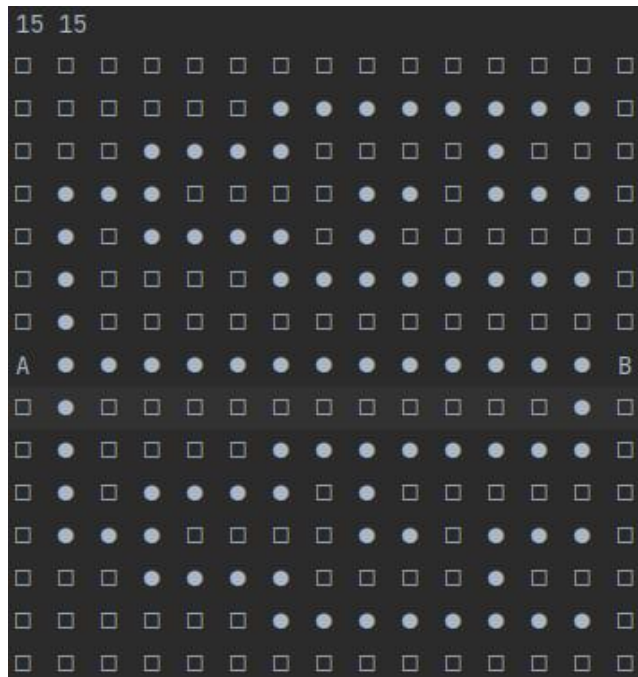
ShortestPathDTO
- ;
- .

```

ShortestPathDTO

3.2

(3.1).



3.1 –

« » ,

, « » , « »

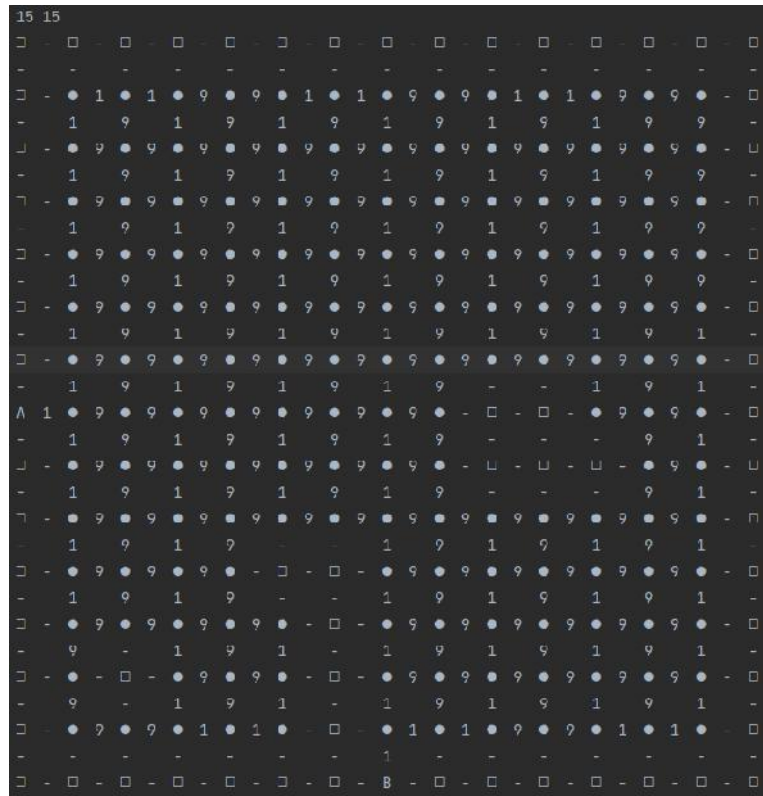
, « » - .

.

(

),

(3.2).



3.2-

InputMazeParser,

), (

ArrayToGraphConverter.

, Graph.

3.3

,
BiFunction.

,
ShortestPathDTO,

3.3.1

DijkstraBasic.

0.

().

int32).

3.3.2

GreedySearchBasic.

()

0.

« » « »

.

.

,

,

,

-

.

,

.

-

,

-

,

.

3.3.3

*

*

AStarBasic.

*

,

0.

<<

>>

<<

>>

.

,

,

,

-

.

-

,

-

.

-

,

,

,

.

-

-

.

.

.

3.3.4

LeeBasic.

0.

3.3.5

GeneticBasic.

ShortestPathDTO

(

),

(

)

:

ShortestPathDTO.

-1 (

,

0).

(),

:

- ;

- , ;

- , .

.

,

.

3.3.6

AntBasic.

A B,

« »

.

,

.

« ».

3.3.5, 5.b

.

:

- ;

- 3.1;

- ;

- 0 ;

« -
 » ;
 - , .

$$P_{i,j} = T_{i,j}^a + \frac{1}{W_{i,j}^b}, \tag{3.1}$$

$P_{i,j}$ - (i, j);
 $T_{i,j}$ - (i, j);
 $W_{i,j}$ - (i, j);
 a - ;
 b - .

, -
 .
 , .
 , .
 ().
 . ,
 , .

3.3.7

AnnealingBasic.

« » .
 ,

3.3.5.

,
 ,
 0.
 ,
 :
 -
 ;
 -
 ;
 -
 ;
 -

3.3.5,

.
 -
 .
 .
 ,
 3.2.

$$P_{s+1} = e^{-\Delta/T}, \tag{3.2}$$

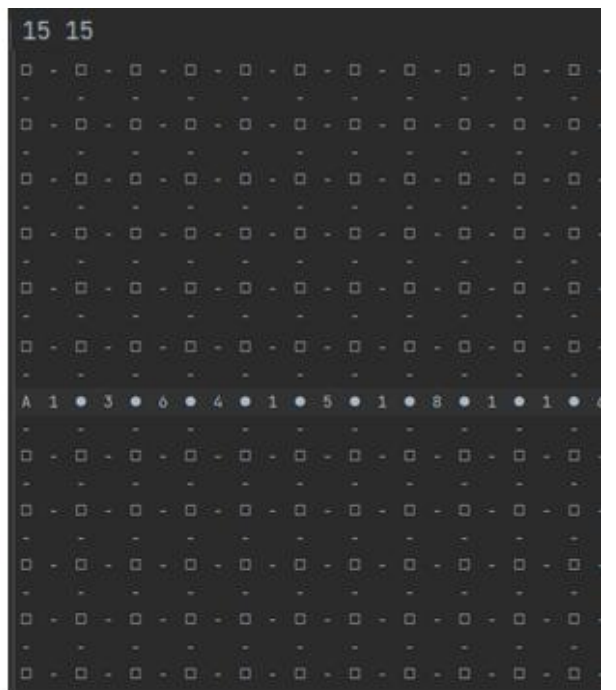
P_{s+1} -
 -
 ,) ;
 T - « »
 « »

4

4.1

,
 .
 — .
 , , .
 .
 .

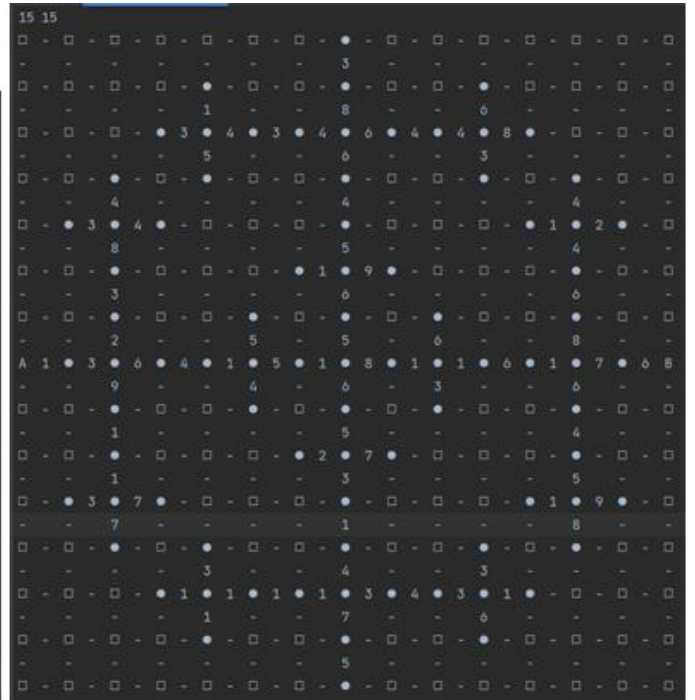
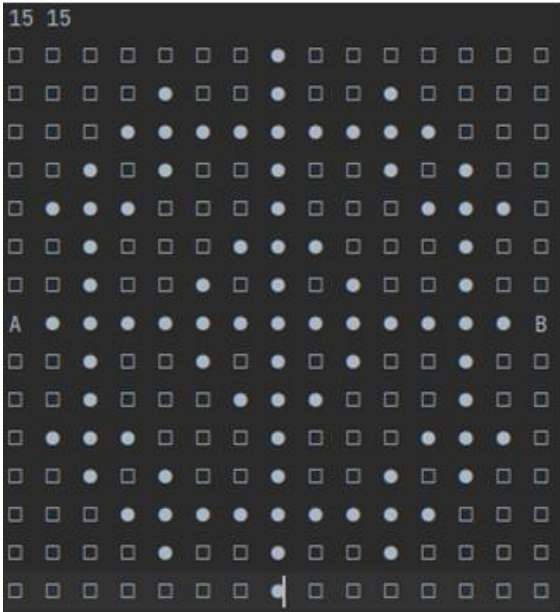
4.1.



4.1 – « » ,

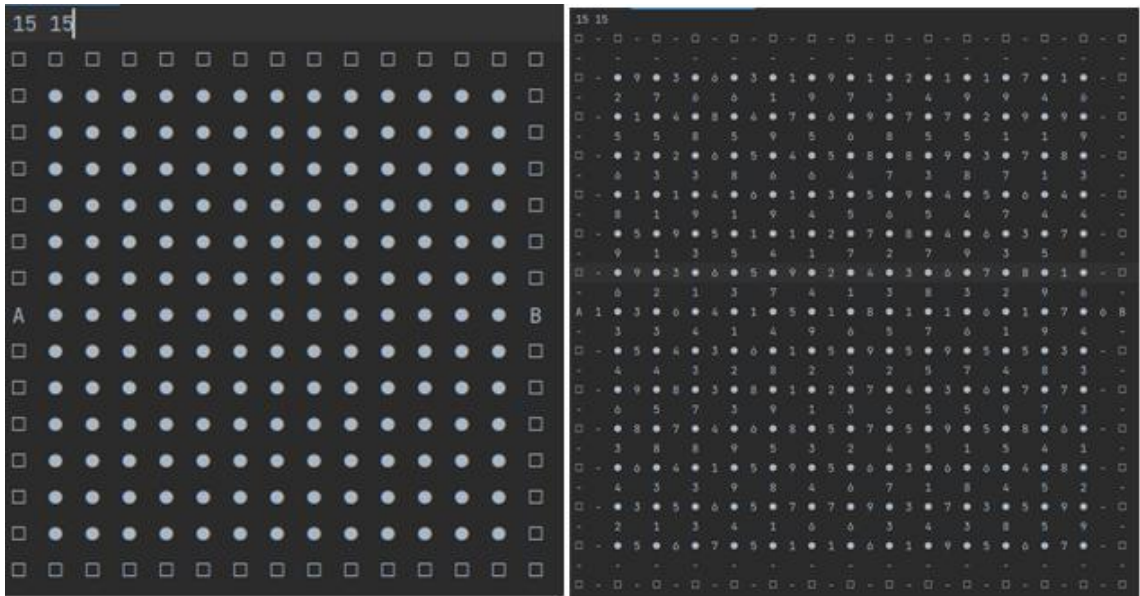
« ».

4.2.



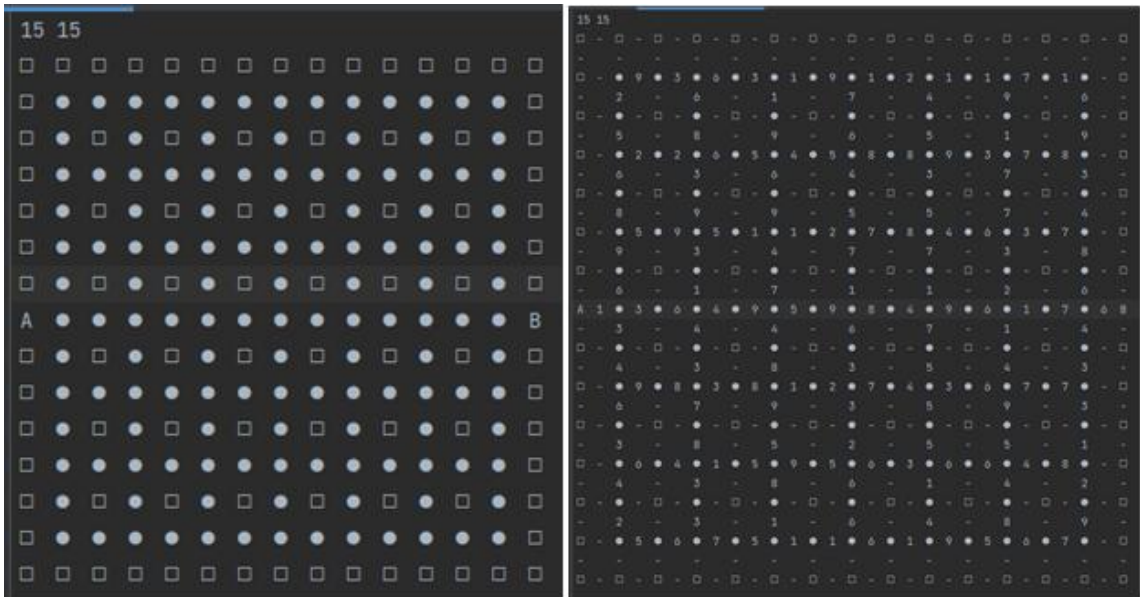
4.2 – « »,

(4.3).



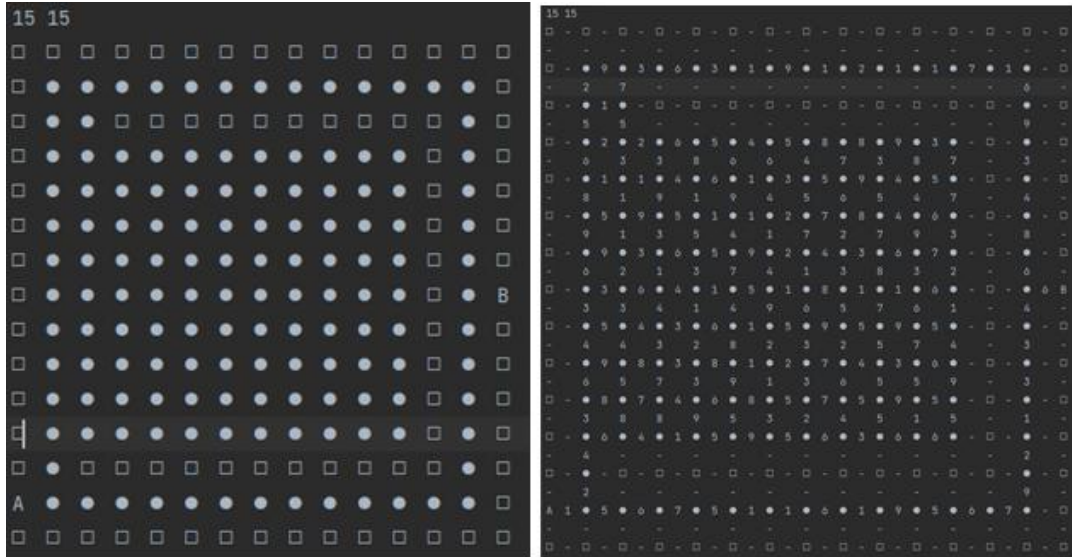
4.3 – « »,

« »,
(4.4).



4.4 – « »,

4.5.



4.5 – « »,

« ».
U-

4.6.


```

Genetic algorithm invocation has finished.
Time spent: 19732900ns
Shortest path size: 19
Shortest path cost: 75
Shortest path visually:
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □
□ ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● □
□ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □
□ ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● □
□ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □
□ ● ● ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ● ● ● □
□ ● □ ✓ □ ● □ ● □ ✓ □ ● □ ● □
✓ ✓ ✓ ✓ ● ● ● ● ● ✓ ✓ ✓ ✓ ✓ ✓
□ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □
□ ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● □
□ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □
□ ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● □
□ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □ ● □
□ ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● ● □
□ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □

```

4.7 –

4.7.

«✓»

4.2.1

« »

« »,

(

).

4.1 4.2.

4.1 –

« »

	1,	2,	3,	4,	5,	,
	0,168	0,179	0,185	0,188	0,187	0,181
*	0,295	0,245	0,268	0,308	0,283	0,28
	0,322	0,370	0,357	0,351	0,481	0,376
()	0,152	0,163	0,157	0,156	0,162	0,158
	0,067	0,081	0,074	0,071	0,07	0,073
	0,094	0,124	0,123	0,088	0,086	0,103
	0,116	0,092	0,179	0,106	0,115	0,122

,

.

,

.

4.2 –

« »

	1,	2,	3,	4,	5,	,
	0,147	0,158	0,145	0,215	0,154	0,164
*	0,213	0,254	0,216	0,266	0,216	0,233
	0,280	0,269	0,254	0,253	0,268	0,265
()	0,139	0,154	0,133	0,148	0,129	0,141
	0,065	0,067	0,077	0,099	0,113	0,084
	0,091	0,087	0,086	0,093	0,102	0,092
	0,104	0,073	0,174	0,076	0,166	0,119

,

–

.

4.2.2 « »

,

,

,

.

4.3 4.4.

4.3 – « »

	1,	2,	3,	4,	5,	,
	0,694	0,679	1,287	0,806	0,975	0,888
*	0,270	0,305	0,309	0,276	0,29	0,29
	0,492	0,445	0,492	0,496	0,498	0,485
()	0,603	0,624	0,606	0,61	0,611	0,611
	0,651	0,793	1,164	0,391	0,543	0,708
	1,584	1,684	0,819	0,591	0,221	0,98
	0,584	0,791	1,224	0,526	0,986	0,822

*,

4.4 –

« »

	1,	2,	3,	4,	5,	,
	0,495	0,513	0,592	0,824	0,711	0,627
*	0,599	0,455	0,638	0,721	0,657	0,614
	0,362	0,279	0,435	0,45	0,347	0,375
()	0,549	0,465	0,682	0,896	0,532	0,625
	0,658	0,416	0,233	0,523	0,595	0,485
	0,71	0,701	0,481	0,868	0,51	0,654
	0,551	0,09	0,43	0,206	0,25	0,305

4.2.3

« »

« »

() (4.5-4.6).

4.5 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	,
1	2	3	4	5	6	7
	15	15	15	15	15	15
	2,599	3,082	2,343	2,91	2	2,587
*	15	15	15	15	15	15
	0,398	0,396	0,389	0,422	0,343	0,39
	15	15	15	15	15	15
	0,43	0,801	0,569	0,569	0,453	0,564

4.5

1	2	3	4	5	6	7
()	15	15	15	15	15	15
	1,844	2,109	2,032	2,275	1,786	2,009
	17	19	19	17	23	19
	67,818	69,394	72,005	65,498	73,998	69,743
	43	39	31	35	43	38,2
	36,552	29,323	31,407	29,292	29,245	31,164
	31	21	43	37	35	33,4
	44,759	70,225	50,992	51,03	45,761	52,553

, ,

« »

.

,

,

,

,

.

4.6 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
1	2	3	4	5	6	7
	48	48	48	48	48	48
	2,982	1,801	2,162	3,597	2,343	2,577
*	48	48	48	48	48	48
	1,703	1,728	2,727	1,862	2,232	2,05
	51	51	51	51	51	51
	0,372	0,426	0,35	0,449	0,517	0,423

4.6

1	2	3	4	5	6	7
()	59	59	59	59	59	59
	1,992	1,373	1,794	2,83	3,224	2,243
	70	60	74	70	94	73,6
	48,794	43,855	52,744	61,96	48,369	51,144
	139	138	127	204	124	146,4
	29,597	31,247	32,673	30,12	31,706	31,069
	195	96	124	124	122	132,2
	38,5	35,878	41,256	39,136	37,398	38,434

,

*,

*.

,

.

4.2.4 « »

,

.

,

()

.

,

.

4.7.

,

.

,

4

5.

,

*.

4.7 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
	15	15	15	15	15	15
	1,044	1,895	1,88	1,841	1,522	1,636
*	15	15	15	15	15	15
	0,438	0,323	0,357	0,317	0,428	0,373
	15	15	15	15	15	15
	0,572	0,425	0,618	0,494	0,554	0,533
()	15	15	15	15	15	15
	2,274	2,905	1,861	1,349	1,359	1,95
	19	15	15	15	15	15,8
	61,611	26,132	43,536	40,518	31,575	40,674
	19	15	27	27	31	23,8
	21,345	28,367	34,975	33,39	32,363	30,088
	27	23	23	23	19	23
	36,311	51,141	51,464	39,064	31,867	41,969

« »

, ,
(4.8),

4.8 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
1	2	3	4	5	6	7
	67	67	67	67	67	67
	0,879	3,417	2,214	1,163	0,919	1,718

4.8

1	2	3	4	5	6	7
*	67	67	67	67	67	67
	1,818	2,772	2,444	1,75	2,934	2,344
	78	78	78	78	78	78
	0,228	0,435	0,312	0,247	0,28	0,3
()	72	72	72	72	72	72
	0,938	1,934	2,759	1,075	0,94	1,529
	78	72	70	67	86	74,6
	34,371	42,586	38,435	28,008	42,972	37,274
	109	119	89	86	86	97,8
	25,376	23,357	23,026	24,767	25,493	24,404
	123	115	75	106	81	100
	30,728	38,877	36,766	37,464	31,592	35,085

4.2.5 « »

4.2.2 4.2.3.

4.9-4.10.

4.9 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
1	2	3	4	5	6	7
	21	21	21	21	21	21
	2,297	1,81	1,72	2,514	1,668	2,002

4.9

1	2	3	4	5	6	7
*	21	21	21	21	21	21
	1,796	1,242	1,226	1,021	1,3	1,317
	21	21	21	21	21	21
	0,281	0,342	0,302	0,406	0,554	0,377
()	21	21	21	21	21	21
	2,544	1,578	1,573	2,462	1,873	2,006
	21	21	21	21	21	21
	3,418	3,535	0,293	3,757	3,684	2,937
	21	21	21	21	21	21
	5,281	3,85	7,023	5,835	2,112	4,82
	21	21	21	21	21	21
	3,69	3,634	6.35	0,187	0,525	0,356

(4.10)

4.10 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	,
	88	88	88	88	88	88
	2,102	3,9	2,674	1,75	2,646	2,614
*	88	88	88	88	88	88
	2,261	1,322	1,972	1,788	2,18	1,905
	88	88	88	88	88	88
	0,352	0,199	0,311	0,253	0,297	0,282
()	88	88	88	88	88	88
	1,926	1,804	1,837	2,543	2,028	2,028
	88	88	88	88	88	88
	1,196	3,065	2,451	2,777	1,535	2,205
	88	88	88	88	88	88
	1,563	1,923	1,326	2,187	1,909	1,782
	88	88	88	88	88	88
	0,129	0,123	6,986	1,735	1,017	1,998

4.2.6

« »

4.11-4.12.

4.11 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
	27	27	27	27	27	27
	1,289	1,330	1,424	0,929	1,211	1,237
*	27	27	27	27	27	27
	0,968	1,039	1,712	1,389	0,902	1,202
	41	41	41	41	41	41
	1,102	1,055	1,515	1,095	1,025	1,158
()	27	27	27	27	27	27
	1,107	0,863	1,319	1,18	1,064	1,107
	27	27	27	27	27	27
	7,658	7,432	2,127	5,77	6,86	5,969
	27	27	27	27	27	27
	5,23	1,349	24,607	7,486	2,402	8,215
	27	27	27	27	27	27
	2,627	6,847	3,132	35,076	6,717	10,88

,

, ,

,

,

«

»

.

.

.

,

.

,

.

4.12 –

« »

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
	109	109	109	109	109	109
	1,245	0,81	2,149	1,463	0,732	1,28
*	109	109	109	109	109	109
	1,357	1,099	2,154	1,126	1,075	1,362
	177	177	177	177	177	177
	1,856	1,224	1,948	1,271	1,546	1,569
()	113	113	113	113	113	113
	0,739	1,132	1,508	1,039	1,467	1,177
	109	109	109	109	109	109
	46,281	28	38,631	22,458	13,818	29,838
	109	110	122	123	113	115,4
	19,027	31,322	14,119	16,989	26,489	21,589
	110	109	114	109	122	112,8
	30,187	1,997	38,747	12,176	27,134	22,048

4.2.7

50 50

4.13.

4.13 –

	1, .	2, .	3, .	4, .	5, .	, .
	100	100	100	100	100	100
	28,593	30,067	24,17	25,472	30,661	27,793
*	100	100	100	100	100	100
	7,695	6,693	5,771	9,246	7,440	7,369
	116	116	116	116	116	116
	2,258	2,826	2,285	2,108	3,067	2,509
()	100	100	100	100	100	100
	19,377	23,318	24,069	26,361	21,012	22,827
	100	116	104	108	100	105,6
	883,615	1184,79	1164,09	1304,75	1336,05	1174,659
	148	126	126	114	138	130,4
	649,084	869,944	581,42	598,909	595,344	658,94
	118	100	146	132	138	126,8
	806,726	1210,82	975,727	948,453	1091,61	1006,667

,)

,

.

,

.

:

-

,

;

-

;

-

,

.

,

,

.

1. [] / . . . –
: , 2014. – 200 .
2. [] /–
.: , 1990. – 384 .
3. : ,
[] /– .: - ,
2003. – 1104 .
4. .
[] / . . . – .: , 1985. – 352 .
5. .
[] /– .: - , 1997. – 503 .
6. [] / . . . – .: ,
1977. – 208 .
7. .
[] / – : .
, 2005. – 307 .
8. .
[] /– .: , 2003. – 232 .
9. .
[] /– .: , 1985. – 352 .
10. .
[] /– : , 2004. – 208 .
11. [] / – .: .
, 2003. – 176 .
12. . The shortest path through a maze [] / –
Harvard University Press, 1959. – 345 .
13. Fast Route Planning [] . – : www/

- URL: <https://www.youtube.com/watch?v=-0ErpE8tQbw>. – 15.11.2021 . – .
14. [] . – : www/ URL: <https://dtf.ru/gamedev/709133-poisk-puti-ili-kak-vragi-v-igrah-nahodyat-dorogu/> – 15.11.2021 . – .
15. , . . : –2- [] / . . – .: , 2007. – 459 .
16. , . . [] / . . . – .: , 2005. – 150 .
17. , . . [] / . . . – .: , 2006. – 744 .
18. , . . : [] / . . . – .: , 2006. – 576 .
19. [] . – : www/ URL: <https://habr.com/ru/post/120343/> – 15.11.2021 . – .
20. Breadth First Search or BFS for a Graph [] . – : www/ URL: <https://www.geeksforgeeks.org/breadth-first-search-or-bfs-for-a-graph/> – 18.11.2021 . – .
21. [] . – : www/ URL: <http://www.100byte.ru/100btwrks/wv/wv.html> – 14.11.2021 . – .
22. A* Search Algorithm [] . – : www/ URL: <https://www.geeksforgeeks.org/a-search-algorithm/> – 13.11.2021 . – .
23. , . . [] / . . . – .: , 2008. – 783 .
24. , . . , [] / . . . – .: , 2009. – 375 .
25. . [] . –

- : www/ URL: <https://habr.com/ru/post/209610>. – 15.11.2021 . –
26. []. – :
 www/ URL: <https://habr.com/ru/post/105302/> – 15.11.2021 . – . .
27. , . . [] /
 . . . – : , 2008. – 326 .
28. . []. –
 : www/ URL: <https://habr.com/ru/post/128704/> – 15.11.2021 . –
29. []. –
 : www/ URL: <https://ru.freejournal.org/2429961/1/vychislitelnyy-intellekt.html> –
 16.05.2020 . – . . .
30. , . [] / . . – . : ,
 1973. – 301 .
31. , .- . [] / .-
 . – . : , 1991. – 244 с.
32. , . . [] / . . , . . //
 : , -
 . – 2021 – . 99.