

УДК 910:004.65+004.8:625.7

Гуцул Т.В.,

targut@meta.ua, ORCID: 0000-0002-7192-3289,

Чернівецький національний університет ім. Ю. Федьковича

АНАЛІЗ ПРОДУКТИВНОСТІ ТА ОСОБЛИВИХ УМОВ ФУНКЦІОНУВАННЯ МЕТОДУ ГЕОІНФОРМАЦІЙНОЇ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ПЛАНУВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ ДОРОЖНЬОЇ МЕРЕЖІ

Розглянуто результати апробації методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації для планування потоків транспортної мережі на різній за природними умовами та складністю місцевості в розрізі адміністративних районів Чернівецької області. Проведено оцінку часової та просторової складності означеного методу для розв'язання задач різної розмірності та перешкод в них. З'ясовано умови не виявлення населених пунктів та запропоновано комбіновані прийоми для одержання результату за будь-яких умов.

Ключові слова: ГІС, мультиагентна оптимізація, мурашиний метод, планування доріг, транспортні потоки.

Вступ. В останні роки вирішення комбінаторних задач оптимізації все частіше опирається на залучення методів обчислювального інтелекту. Зокрема, до числа таких відносять і так звані мурашині методи, які моделюють поведінку колонії мурах при розв'язанні загальної задачі. Сучасна література достатньою мірою висвітлює розв'язок оптимізаційних задач з використанням мурашиних методів за умови використання існуючих транспортних мереж. Однак технічна реалізація трасування напрямку проходження ймовірного маршруту майбутньої дороги з урахуванням числа агентів географічної природи та встановлених обмежень будівельних норм на відкритій місцевості залишається практично не дослідженою [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мурашині методи знайшли, і досі знаходять нові найрізноманітніші сфери свого практичного застосування. Практична їх реалізація в транспортній сфері та дорожніх дослідженнях стосується переважною мірою задач оптимізації існуючих систем, і демонструє хороші показники.

Реалізовано проект оптимізації перевезень громадським транспортом за геоданими матриць кореспонденцій, і досягнуто підвищення щільності

пасажирів з 25 осіб/км до 38 осіб/км при підвищенні ефективності та скороченні загальної протяжності автобусних маршрутів [2].

Оптимізовано управління ланцюгами постачань шляхом моделювання відправлень до пунктів споживання по густорозчленованій мережі доріг. В результаті, цілком реальне зниження вартості скорочення виробничих витрат, у тому числі транспортних у середній та довготривалій перспективі [3]. Розрахунок транспортної доставки можливий в умовах не жорстких часових рамок та стану доріг з використанням адаптивних агентів [4].

Транспортні мережі особливо вразливі до різноманітних надзвичайних ситуацій (як правило, стихійних лих). В результаті, вони можуть бути заблоковані (приміром падаючими деревами) або зруйновані на тривалий час (зсувами, ерозією, землетрусами) та утворити декілька ізольованих частин. Дослідження спрямовані на перерозподіл мережі на окремі частини для здійснення планування інженерно-будівельних заходів з використанням метаевристичного підходу заснованого на колонії мурах особливо корисні для великих за розмірністю мереж, і дозволяють покращити оптимальні результати на 38% протягом 5 хвилин ітерацій [5].

Суттєві досягнення одержано щодо оптимізації управління поведінкою з твердими побутовими відходами на основі поєднання ГІС-засобів та методу мурашиних колоній. Зменшення існуючих відстаней внаслідок симуляції нових транспортних маршрутів дозволило скоротити відстані перевезень від 10,2% до 28,78% [6]. Практично співмірний показник одержано в префектурі Аттики (передмістя Афін, Греція) з оптимізацією 111 шляхів транспортування. Одержане скорочення шляху збору і транспортування склало 25,6% [7].

Динамічне планування туристичних маршрутів на основі адаптивного методу оптимізації колонії мурах продемонструвало скорочення тривалості поїздок на 32,32% та скорочення часу обчислень на 25,53% [8].

Постановка завдання. Більшість сучасних методів мурашиної колонії опираються на 2-D поверхні рельєфу, не враховуючи вплив схилу місцевості на вибір шляху. Окрім того, апробація роботи методу в інших дослідженнях здійснювалася на невеликих за площею територіях та фізичним обсягом даних. Все це обумовлює, з'ясування особливостей поведінки методу на різних за площею та природними умовами територіях.

Основна частина. З'ясування продуктивності мурашиного методу опиралося на його технічну реалізацію згідно [1] та особливості, зазначені в [9].

Визначення складності методу здійснювалося в двох аспектах – часовому (необхідний час на розв'язок заданої розмірності задачі) та просторовому (кількість необхідних ресурсів пам'яті при аналогічних умовах).

Встановлення затрат обчислювальних потужностей потребує виконання спеціалізованих тестів спрямованих на оцінку продуктивності процесора. Оскільки база результатів таких тестувань для різних моделей процесорів міститься на окремому спеціалізованому порталі [10], то залишається лише порівняти результати функціонування методу для одного й того ж набору даних на різних моделях обчислювальних потужностей.

В якості вхідного набору даних оберемо файл формату *.csv Герцаївського району, оскільки він містить мінімальну кількість комірок (473420), що дозволить провести більшу кількість тестувань при менших часових затратах та підвищити достовірність одержаних результатів. Умову задачі сформулюємо, як: залучення 1000 мурах та здійснення ними 200 ітерацій з урахуванням параметрів контролю впливу α та β і швидкості вивітрювання феромону на рівні 0,001 для пошуку та прокладання варіантів оптимальних маршрутів між 24 центроїдами населених пунктів згідно обмежень зазначених в [1] на поверхні розмірністю 473420 комірок. При виконанні експерименту залучено перелік різноманітних апаратних засобів наведених в табл. 1, що ґрунтувався в основному на їх широкій розповсюдженості серед пересічних користувачів ПК. За даними табл. 1 можна виявити лінійну залежність між продуктивністю процесора та тривалістю розв'язку досліджуванним методом (коефіцієнт кореляції -0,83, що засвідчує високий рівень зв'язку).

Слід зауважити, що згідно [10] умовний бал продуктивності сучасних топ-100 моделей процесорів коливається в діапазоні від 14880 до 28860 балів, а отже задача з аналогічними умовами означеним методом повинна розв'язуватися як мінімум в 2-4 рази швидше.

Таблиця 1

Виявлення просторової та часової складності методу

№	Модель процесору	Умовна бальна оцінка продуктивності процесору	Тривалість виконання тестування на експериментальних даних в форматі:	
			год.:хв.:сек.	сек.
1	Intel® Core™ i7 4702MQ CPU 2.20 GHz	7138	0:56:18	3378
2	Intel® Core™ i5-2500 CPU 3.30 GHz	6474	1:11:30	4290
3	Intel Core i3-4170 3.7GHz PassMark	5186	1:45:38	6338
4	AMD Phenom II X4 945	3675	2:01:25	7285
5	AMD Athlon™ II X2 245 2.9 GHz	1682	2:53:35	10415
6	Intel Pentium CPU B950 2.10 GHz	1638	2:55:29	10529
7	Intel® Celeron® CPU B830 1.80 GHz	1521	3:01:42	10902
8	Intel® Core™ 2 Duo CPU T5850 2.16GHz	1115	4:07:15	14835
9	Intel® Core™ 2 Duo CPU E4500 2.20 GHz	817	6:21:40	22900

Вплив розмірності вхідних даних, що були представлені у вигляді файлів формату *.csv на тривалість розв'язку оптимізаційної задачі за вищезазначених умов показано в табл. 2. Можна помітити, що обсяг вхідних даних суттєво варіюється, пов'язано це не тільки із розмірністю території, але і її складністю (наповненістю комірок значеннями агентів).

Таблиця 2

Характеристика розмірності вхідних даних в розрізі адміністративних районів Чернівецької області

Район	Всього комірок, шт.	Фізичний розмір, кБ	Кількість центроїдів в межах району	Сполучено центроїдів	Тривалість тестування, год.:хв.:сек.
Герцаївський	473420	26200	24	16	1:11:30
Кіцманський	934392	51784	46	6	2:48:17
Заставнівський	935983	51890	39	5	3:05:34
Сокирянський	1006713	55800	29	4	3:57:13
Глибоцький	1007752	55865	38	7	2:56:37
Кельменецький	1017325	56375	33	8	3:57:18
Хотинський	1093040	60680	39	3	3:25:03
Новоселицький	1123893	62354	43	2	0:56:30
Путильський	1342270	75723	51	0 (4) ¹	1:33:57 ¹
Вижницький	1376410	77141	34	0 (2) ¹	1:02:58
Сторожинецький	1778894	99716	39	3	4:51:53

¹) – наведені значення для Вижницького та Путильського районів без урахування значення крутизни схилу

За даними табл. 2 виявляємо тенденції відсутності зв'язку між розмірністю вхідного файлу та тривалістю розв'язку задачі досліджуванням методом. Крім того, спостерігається знаходження далеко не всіх центроїдів із заданих умовою, що підтверджує припущення про неоднорідність даних, тому слід з'ясувати особливості структури та просторового розміщення агентів на територіях адміністративних районів, вплив зміни кількості ітерацій (табл. 3) та чисельності популяції мурах зайнятих пошуком та сполученням центроїдів (табл. 4) разом з регулюванням параметрів щодо контролю значення феромону та можливості досягнення оптимальніших результатів.

У гірських районах Чернівецької області задача початково не була розв'язаною, так як там природно одні з найважчих умов, і частині населених пунктів присвоєно статус гірських. Згідно ЗУ «Про статус гірських населених пунктів в Україні» критерієм віднесення населених пунктів до гірських є розташування населеного пункту або частини його, на якій проживає більш як половина мешканців цього населеного пункту, на висоті 400 метрів і вище над рівнем моря на території, рельєф якої дуже розчленований байраками, водотоками і т. ін., та розміщення 50 і більше відсотків сільськогосподарських угідь у межах цього населеного пункту на схилах крутизною 12° і більше [11].

Слід зауважити, що такими є всі населені пункти Путильського (51), третина Вижиницького (11) та декілька Сторожинецького районів (2).

За одну ітерацію методу, кожна мураха здійснює повний маршрут між двома населеними пунктами. А отже, більша кількість ймовірних варіантів завдяки використанню алгоритму Мах-Мін дозволить здійснити сортування в порядку зростання відстаней прокладених маршрутів та обрати серед них мінімальне значення, котре максимально наближене до оптимально можливого. Однак, навіть якщо такий розв'язок і буде знайдено, то метод все одно продовжить підтримувати різноманітність множини рішень, що позначиться на тривалості його виконання.

Для дослідження сили впливу ітерацій (табл. 3) залучимо сталу кількість мурах (1000 особин) та раніше встановлені параметри впливу $\alpha = 0,5$ та $\beta = 0,5$ і швидкості вивітрювання феромону на рівні 0,001 для пошуку прокладання варіантів оптимальних маршрутів між сталою кількістю центрів (24 шт.) для території Герцаївського району.

Таблиця 3

Вплив кількості ітерацій на загальну довжину та час пошуку маршруту

№	Кількість ітерацій	Тривалість тестування, сек.	Задано/знайдено населених пунктів	Загальна протяжність, м
1	100	0:59:15	8/24	187338
2	200	1:10:06	15/24	250600
3	300	1:10:04	16/24	256500
4	400	1:36:47	22/24	444800
5	500	1:25:28	21/24	391300
6	600	1:53:26	19/24	395100
7	700	1:24:29	15/24	211600
8	800	1:48:26	23/24	314400
9	900	1:54:29	15/24	197700
10	1000	1:54:21	22/24	371800

Робимо висновки, що при незначній кількості мурах, можливі шляхи між деякими населеними пунктами не сформуються, так як мурахи при пошуку маршрутів з центрів можуть потрапити до зон локальних мінімумів, і природно в таких випадках не згенерувати взагалі жодних результатів.

Для дослідження впливу кількості комах (табл. 4) залишимо сталою кількість ітерацій 1000, так як вона ймовірніше призводить до оптимальнішого результату; параметри впливу $\alpha = 0,5$ та $\beta = 0,5$ і швидкості вивітрювання феромону на рівні 0,001 для пошуку прокладання варіантів оптимальних маршрутів між сталою кількістю центрів (24 шт.) для території Герцаївського району.

На перший погляд може здатися, що чим більше мурах, тим результативніше працюватиме метод. Дійсно, методи з великою кількістю

к-ть мурах ітерацій	1000	2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000	10000	
	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
Населений пункт	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Маморниця	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Маморниця Вама	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Могилівка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Молниця	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Остриця	–	–	+	–	+	–	+	–	+	–	–
Петрашівка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Підвальне	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Тернавка	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Хряцька	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Щурень	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+

Поясненню одержаних в табл. 5 результатів може бути розгляд умов місцевості поблизу означених населених пунктів, що представлений на рис. 1. Так, у випадку з населеним пунктом Буківка, прокладання маршруту обмежувалося розташованою перешкодою (лісом), а та вузька частина (шириною в 3 комірки), що залишалася, зводила шанси потрапляння мурах випадковим чином сюди до локального мінімуму. У випадку з Острицею складності додавав несприятливий рельєф в західній частині Герцаївського району, одночасно поєднаний з забудовою.

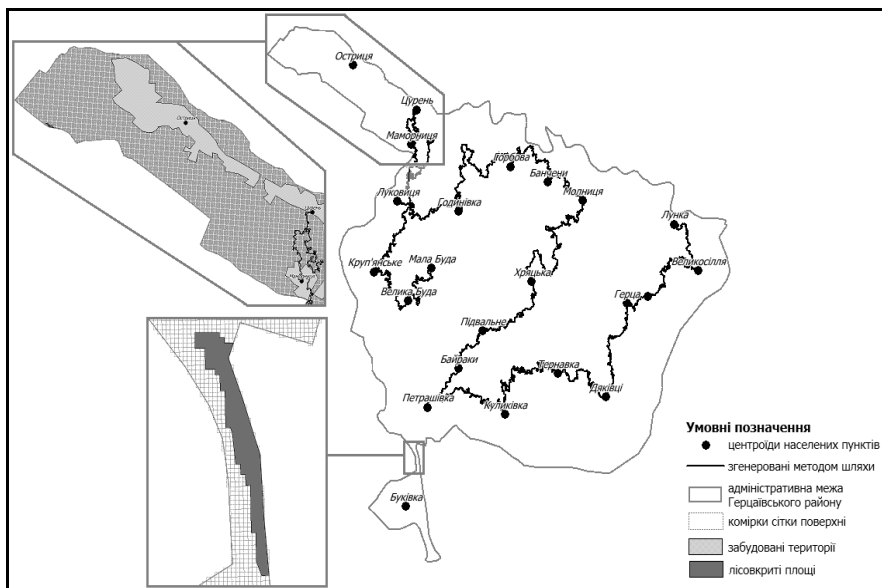


Рис. 1. Умови не виявлення населених пунктів

Роль значень параметрів α і β наступна: якщо α встановлено близьким до нуля, тоді найближчі міста мають більшу ймовірність бути знайденими. Це перетворює метод в класичний стохастичний жадібний алгоритм (з багатьма початковими точками, оскільки мурахи розподілені випадково на цих точках).

Якщо β встановлено близьким до нуля, то спрацьовує тільки поширення феромонів, і це швидко призводить до ситуації, в якій всі мурахи обирають один і той же маршрут, що в загальному є не оптимальним. Таким чином, повинен зберігатися баланс між цими параметрами та інтенсивністю випаровування феромону [7]. Саме через це, виявлення зміни значення параметрів впливу α та β не здійснювалося, і всюди приймалося сталим.

Слід зауважити, що приміром в дослідженні [7] метод мурашиної оптимізації виконувався 27700 разів для підбору різних комбінацій параметрів.

Звичайно, можна припустити, що у мурашиного методу є недоліки, пов'язані з відсутністю гарантії найоптимальнішого результату, і можуть існувати інші більш якісні варіанти, до яких мурахи не добралися (див. рис. 1). Однак, встановлена швидкість одержання результату враховуючи потужності сучасних обчислювальних засобів робить метод придатним для використання.

Результати наведені в табл. 2 демонструють неможливість знаходження будь-яких розв'язків для Вишницького та Путильського районів за заданих умов. Специфіка цієї території обумовлена перш за все складністю умов рельєфу місцевості. Перегляд сформованої поверхні засвідчив відсутність варіантів для прокладення маршрутів майбутніх автошляхів згідно існуючої методики, а отже слід змінити підходи. Теоретично, одним з таких кроків може бути підвищення деталізації рельєфу.

Для перевірки цієї гіпотези обрано фрагмент топографічної карти масштабу 1:25000 з складними умовами місцевості. Зокрема, в межах полігону площею 168,3 км² перепад висот становить 751 м. Середня крутизна схилів перевищує 21°. Територія густо вкрита деревною рослинністю, показник лісистості перевищує 57%. Розгалуженість річкової сітки становить 2,46 км/км², що практично в 10 разів перевищує пересічний показник для території України. Незважаючи на складність умов, тут розміщено 12 населених пунктів (рис. 2).

Гідрологічно коректна цифрова модель рельєфу будувалася з роздільною здатністю 10 та 20 м. Загальна кількість комірок становила 422304 та 1689204 відповідно. Таким чином, кількість вхідних даних практично повністю зімітувала найбільший та найменший досі досліджені адміністративні райони (згідно табл. 2). Подальша деталізація до 5 м спричинила складність обробки ще на етапі зведення даних, а розраховані орієнтовні витрати часу на їх обробку означеним методом, зросли б також у кілька разів.

Високий показник лісистості служить вагомою перешкодою. Практично кожна друга комірка зайнята цим обмеженням, а отже на перший погляд з високою ймовірністю при прокладанні гірських доріг не вдасться оминати їх вирубки. Однак, з іншого боку в Україні незадовільно розвинута лісова транспортна інфраструктура. До прикладу, якщо в Фінляндії густота дорожньої мережі в лісовому фонді на 1000 га становить 12,3 км, в Північній Європі – 30, в Німеччині – 36, то в Україні всього 11. Найгостріше ця проблема характерна для гірських регіонів Західної України. Володіючи потужними запасами цінних перспілих порід в Карпатах, місцеві лісгоспи не можуть їх заготовлювати через неможливість добратися. Розвинута мережа доглянутих лісових доріг – передумова ефективного лісового господарства, конкурентоздатності лісозаготівель та низьких затрат на перевезення деревини, а також дозволяє протягом усього року доставляти деревну сировину на підприємства галузі. А отже, навіть якщо проєктований оптимальний маршрут пролягатиме через ареали деревної рослинності, це лише відкриватиме перспективи для освоєння лісових ресурсів цієї території. Саме через це, в мурашиному методі при його застосуванні для пошуку оптимальних шляхів в гірських районах, вплив агенту рослинності доцільно відключити.

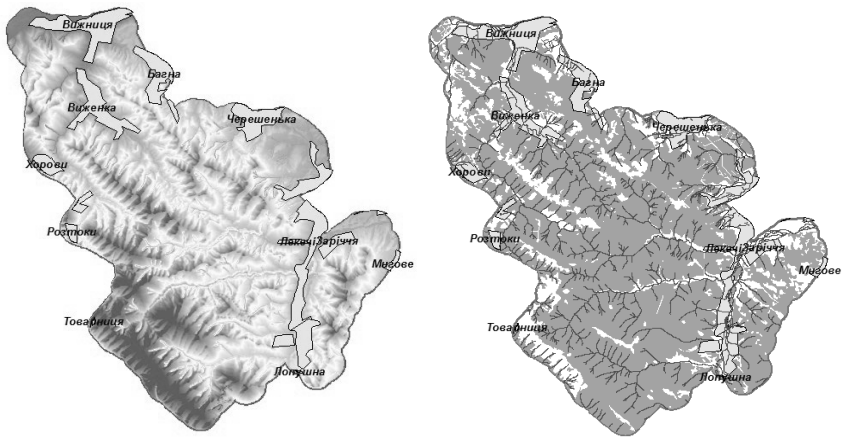


Рис. 2. Умови досліджуваної гірської місцевості

Забудованим територіям в гірській місцевості теж характерний опосередкований вплив. Деяким районам Карпат притаманний хутірський тип розселення, що склався історично під впливом складного гірського рельєфу та провідної ролі скотарства в структурі занять місцевих мешканців. Селянські двори у таких поселеннях розташовано на значній відстані один від одного і розсіяно по гірських долинах та схилах навколишніх гір. Подекуди

утворювалися групи приблизно з 2-4х дворів. Під'їздів до окремих садиб не було, центральна дорога проходила паралельно з водною артерією по дну гірської річки та не сполучала між собою селянські двори, а лише певний населений пункт із сусідніми поселеннями.

Значна розгалуженість річкової сітки, і наявність інженерних споруди обумовлюють особливі підходи в картографуванні. Конвертація векторних даних в растрові для подальшого аналізу призводить до втрати точності. Наявність навіть незначних фрагментів об'єкту гідрографії в сусідніх комірках призводить до їх повного заповнення, тоді як міст чи водопропускна труба зображується точковим об'єктом, і при перетворенні займає відповідно одну комірку. Таким чином, виникає ситуація, коли наявність інженерної споруди може виключити можливість прохідності маршруту на даній ділянці місцевості (рис. 3). В свою чергу, така обставина завідомо збільшує загальну довжину маршруту, що знижує його реальну оптимальність.

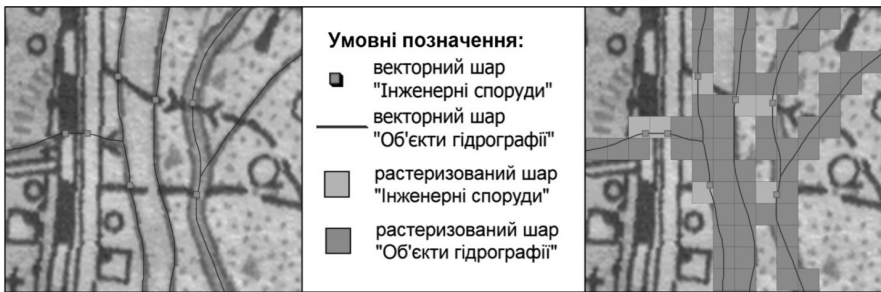


Рис. 3. Часткове зникнення прохідності внаслідок растрезації

Експериментально встановлено, що побудова буферної зони розмірністю 30 м на сітці з роздільною здатністю 20 м дозволяє повною мірою забезпечити прохідність через растрований лінійний об'єкт (рис. 4).

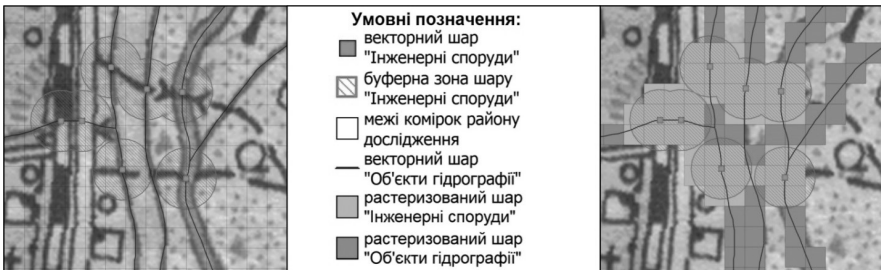


Рис. 4. Одержання можливості прохідності після побудови буферних зон

Причини не виявлення всіх центроїдів населених пунктів заданих умовою полягають в:

- *відсутності можливості подальшого руху* (вихід мурах за межі карти). Коли мураха потрапляє в кінцеву точку, розміщену на границі карти, і подальший рух не можливий. Точка, з якої вона прийшла не може бути відвіданою, а нових точок немає.

- *самоперетині маршруту*. При комбінації маршрутів може відбутися перетин відвіданих комірок, а отже такий маршрут буде відкинтий. У кожної мурахи маршрут буде без самоперетинів, однак при їх комбінації існує ймовірність появи ділянок маршруту, які містяться в іншому маршруті або дублюють його.

- *точка може бути відшуканою, проте не належати до найкоротшого маршруту*, а отже маршрут буде проігноровано. Як правило в такі точки можна дістатися лише з якогось одного населеного пункту. Приміром, означений проблемний момент виникав при пошуку населених пунктів Буківка та Остриця (табл. 5).

- *надмірна деталізація території*. Збільшення дискретності поверхні призводить до умовного збільшення кількості комірок між центроїдами, а отже зменшується ймовірність їх відшукування внаслідок виникнення трьох попередніх умов.

- *спробі мурахою відвідати вже відвідану точку* призводить до ігнорування всього маршруту.

Таким чином, для формування мережі оптимальних маршрутів зі сполученням всіх заданих центроїдів (населених пунктів), слід дотримуватися поєднання (комбінування) одержаних результатів за наступною послідовністю.

Першочергово, слід запустити виконання методу одразу для всього району. Слід зауважити, що попри значну тривалість обчислень вдасться знайти лише певну кількість послідовно сполучених між собою оптимальним шляхом центроїдів. Решту комірок території виділити таким чином, щоб одна з околиць містила декілька центроїдів, до яких методом вже вдалося сформувати маршрут та експортувати в окремий *.csv-файл. У випадку наявності відокремлено розташованих центроїдів, котрі не належать до найкоротшого маршруту, слід знову зробити вибірку з наявністю в ній кількох центроїдів, шляхи до яких були віднайдені і експортувати результат у вигляді *.csv-файл.

За вказаною методикою, для досліджуваного району внаслідок наявності фактору випадковості руху мурахи, що призводить до формування унікальних маршрутів під час кожної ітерації можна одержати множину оптимальних маршрутів. В кожному окремому випадку, сполученими будуть різні населені

пункти. Якщо розглянути результати табл. 3, що представлені графічно у вигляді схеми (рис. 5), то можна помітити, що всі вони узагальнено демонструють приблизно однакову траєкторію. Постає логічна потреба виведення з них єдиного максимально оптимального. У випадку, якщо його загальна протяжність зменшиться, то ціль можна вважати досягнутою.

Для перевірки цієї гіпотези, одержані дані слід згрупувати до єдиного векторного шару, розділити на сегменти (ребра) та додати вузли в місця перетину з подальшим повторним поділом на сегменти. Зі створеного шару сформувати набір мережних даних для ArcGIS Network Analyst. В ручному режимі послідовно проставити всі зупинки, які співпадають з центроїдами населених пунктів. Утворений маршрут експортувати у вигляді *.shp файлу, після чого дізнатися довжину об'єкта як атрибуту геометрії.

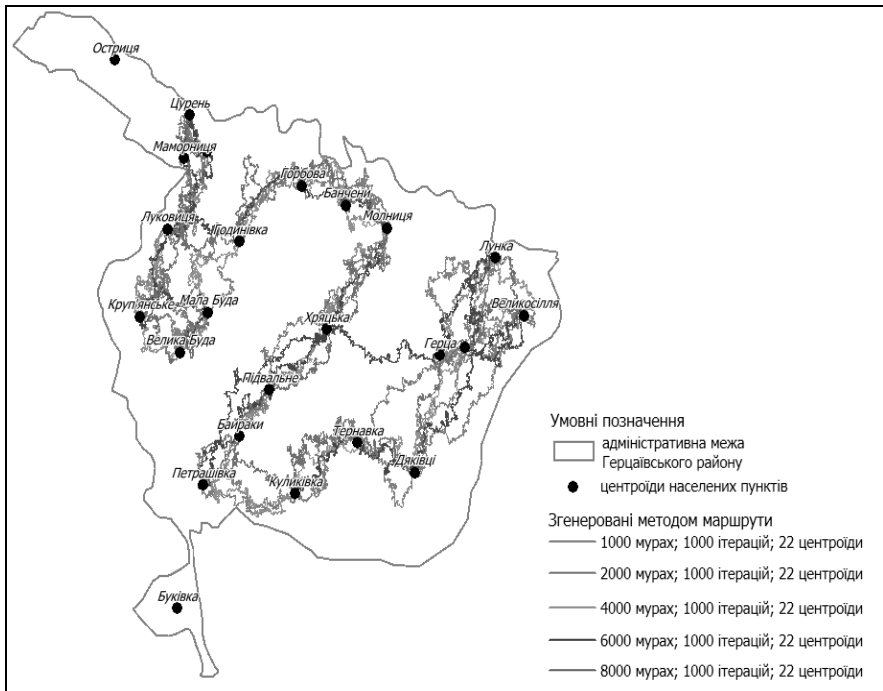


Рис. 5. Варіанти маршрутів знайдених методом за різних умов

Загальна довжина прокладеного комбінованим методом маршруту склала 154900 м (рис. 6), а цей показник на 43 % оптимальніший за найкоротший маршрут одиночним методом, наведеним в табл. 3.

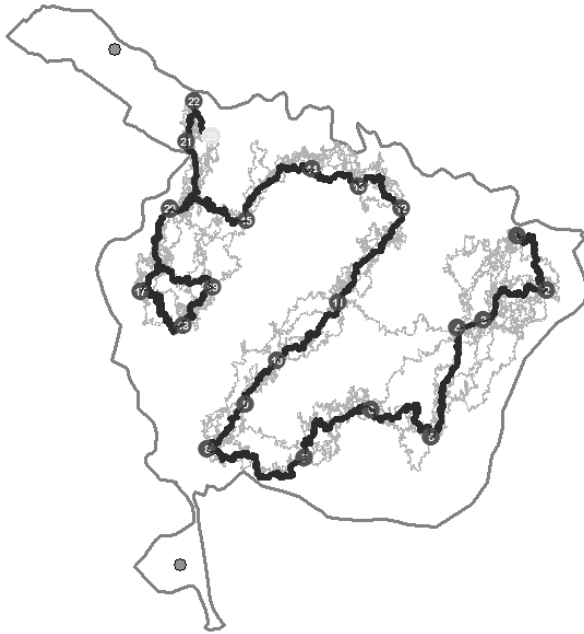


Рис. 3.6. Одержаний варіант

Висновки. В результаті численних експериментальних апробацій було одержано вихідні параметри, які успішно застосовувалися для оптимізації планування транспортних потоків дорожньої мережі решти Чернівецької області. Понад 75% маршрутів досліджуваний метод відшукував одразу, а решту – шляхом застосування комбінаційних підходів. Кількість комбінаційних підходів дещо зростає зі складністю умов місцевості, коли суттєво обмежується варіативність. Таким чином, можна стверджувати про можливість застосування геоінформаційної мультиагентної оптимізації при оптимізації планування транспортних потоків в умовах решти території України.

Перспективи дослідження. Подальші дослідження слід здійснювати за кількома напрямками. Зокрема, оцінку якості джерел даних, а також пошук шляхів їх вилучення з НІГД суттєво підвищить точність проєктних рішень. Варто зауважити, що розвиток дорожньої мережі повинен співпадати з комплексними планами розвитку територій. Тому, локалізацію корисних копалин, лісових ресурсів з можливістю їх промислового використання, унікальних туристичних місць і т. ін. слід формувати у вигляді шару окремих центрів і додавати до методу при трасуванні основного напрямку та конкурентних варіантів проходження майбутніх маршрутів.

Окрім того, варто взяти до уваги аспекти не виявлення усіх центротидів, і шукати шляхи адаптації існуючих оптимізаційних методів для зменшення ступеня їх впливу.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гуцул Т.В. Прикладні аспекти програмно-апаратної реалізації методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації планування транспортних потоків дорожньої мережі / Т.В. Гуцул. // Інженерна геодезія. – 2018. – №65. – С. 114–125.
2. Алгоритм муравьиных колоний для задачи проектирования рациональных маршрутных сетей городского пассажирского транспорта / Е.А. Кочегурова, Я.А. Мартынов, Ю.А. Мартынова, С.Г. Цапко. // Вестник СибГУТИ. – 2014. – №3. – с. 89–100.
3. Вардомацкая Е.Ю. Оптимизация маршрута с использованием теории графов в пакетах прикладных программ. / Е.Ю. Вардомацкая, В.Л. Шарстнев, Я.А. Алексеева // Вестник Витебского государственного технологического университета. – 2016. – №1. – с. 130–139.
4. Gewen H. Multi-agent ant colony optimization for vehicle routing problem with soft time windows and road condition [Електронний ресурс] / H. Gewen, C. Yanguang, C. Hao // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: doi.org/10.1051/mateconf/201817302020
5. Vodák R. A modified ant colony optimization algorithm to increase the speed of the road network recovery process after disasters [Електронний ресурс] / R. Vodák, M. Bíl, Z. Křivánková // International Journal of Disaster Risk Reduction. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.04.004
6. Ajay S. K. Advances in Waste Management / K. Ajay S., D. Kondusamy, S. Jiwan. – Singapore: Springer Nature Singapore Pte Ltd, 2018. – 549 p. – (Select Proceedings of Recycle 2016).
7. Ant Colony System vs ArcGIS Network Analyst: The Case of Municipal Solid Waste Collection / N. Karadimas, N. Doukas, M. Kolokathi, G. Defteraiou // 5th WSEAS Int. Conf. on Environment, ecosystems and development / N. Karadimas, N. Doukas, M. Kolokathi, G. Defteraiou. – Tenerife: WSEAS Transactions on computers, 2007. – p. 128–134.
8. Kun-Ming Yu. Dynamic path planning based on adaptable Ant colony optimization algorithm [Електронний ресурс] / Kun-Ming Yu, Ming-Gong Lee, Shih-Shih Chi // Future Generation Communication Technologies. – 2017. – Режим доступу до ресурсу: doi.org/10.1109/FGCT.2017.8103732

9. Гуцул Т.В. Мультиагентна оптимізація в плануванні потоків дорожньої мережі: особливості мурашиного алгоритму / Т.В. Гуцул. // Містобудування та територіальне планування. – 2016. – №62. – С. 179–185.
10. CPU Benchmarks [Електронний ресурс] // PassMark Software. – 2018. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.cpubenchmark.net/>.
11. Закон України «Про статус гірських населених пунктів в Україні» (Відомості Верховної Ради України (ВВР), 1995 № 9, ст. 58) від 01.01.2001.
12. Штовба С.Д. Муравьиные алгоритмы // Exponenta Pro. Математика в приложениях. – 2003. – №4. – С. 70–75.

REFERENCES

1. Hutsul T.V. Prykladni aspekty prohramno-aparatnoi realizatsii metodu heoinformatsiinoi multyahentnoi optymizatsii planuvannia transportnykh potokiv dorozhnoi merezhi (2018) [Applied Aspects of Software and Hardware Implementation of the Method of Geoinformation Multi-Agent Optimization of Planning of Transport Streams of the Road Network]. *Inzhenerna heodeziia – Engineering geodesy*, 65, 114–125. [in Ukrainian].
2. Kochehurova E.A., Martynov Ya. A., Martynova Yu. A., Tsapko S.H. (2014). Alhorytm muravyinykh kolonyi dlia zadachy proektyrovanyia ratsyonalnykh marshrutnykh setei horodskoho passazhyrskoho transporta [Algorithm of ant colonies for the task of designing rational routing networks of urban passenger transport]. *Vestnyk SybHUTY – Herald of Siberian State University of telecommunications and information sciences*, 3, 89–100. [in Russian].
3. Vardomatskaia E.Yu., Sharstnev V.L., Alekseeva Ya. A. (2016) Optymyzatsiia marshruta s yspolzovanyem teoryy hrafov v paketakh prykladnykh prohramm [Optimization of the route using the theory of graphs in packages of applied programs]. *Vestnyk VGTU – Vestnyk of Vitebsk State Technological University*, 1, 130–139. [in Russian].
4. Gewen H., Yanguang C., Hao C. (2018) Multi-agent ant colony optimization for vehicle routing problem with soft time windows and road condition, China, MATEC Web of Conferences. Retrieved from <https://doi.org/10.1051/mateconf/201817302020>
5. Vodak R., Bil M., Krivankova Z. (2018) A modified ant colony optimization algorithm to increase the speed of the road network recovery process after disasters, *International Journal of Disaster Risk Reduction*. Retrieved from <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.04.004>
6. Ajay S., Kondusamy D., Jiwan S. (2018) *Advances in Waste Management*, Singapore, Springer Nature Singapore Pte Ltd. – 549 p.

7. Karadimas N., Doukas N., Kolokathi M. (2007) Ant Colony System vs ArcGIS Network Analyst: The Case of Municipal Solid Waste Collection, Tenerife, WSEAS Transactions on computers. – pp. 128–134.
8. Kun-Ming Yu, Ming-Gong Lee, Shih-Shih Chi (2017) Ming Yu. Dynamic path planning based on adaptable Ant colony optimization algorithm, Future Generation Communication Technologies. Retrieved from <https://doi.org/10.1109/FGCT.2017.8103732>
9. Hutsul T.V. Mulyahentna optymizatsiia v planuvanni potokiv dorozhnoi merezhi: osoblyvosti murashynoho alhorytmu (2016) [Multi-agent optimization in road traffic planning: features of an ant algorithm]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban and territorial planning*, 62, 179–185. [in Ukrainian].
10. CPU Benchmarks (2018) PassMark Sotware. Retrieved from cpubenchmark.net
11. Zakon Ukrainy «Pro status hirskykh naselenykh punktiv v Ukraini» [Law of Ukraine «On the Status of Mountain Settlements in Ukraine»]. Retrieved from <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/56/95-%D0%B2%D1%80> [in Ukrainian].
12. Shtovba S. D. Muravynye alhorytmy (2003) [Ant algorithms]. *Matematyka v prylozheniyakh – Applied of Mathematics*, 4, 70–75. [in Russian].

Гуцул Т.В.,
Черновицкий национальный университет им. Ю. Федьковича

АНАЛИЗ ПРОДУКТИВНОСТИ И ОСОБЕННЫХ УСЛОВИЙ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ МЕТОДА ГЕОИНФОРМАЦИОННОЙ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ ПЛАНИРОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ ПОТОКОВ ДОРОЖНОЙ СЕТИ

В статье рассмотрено результаты апробации метода геоинформационной мультиагентной оптимизации для планирования потоков транспортной сети на разных за природными условиями и сложностью местности на уровне административных районов Черновицкой области. Произведено оценку временной и пространственной сложности рассматриваемого метода для решения задач разной размерности и препятствий в них. Выяснено условия не обнаружения населенных пунктов и предложено комбинированные способы для получения результата при любых условиях.

Ключевые слова: ГИС, мультиагентная оптимизация, муравьиный метод, планирование дорог, транспортные потоки.

T. Hutsul,
Yuriy Fedkovych Chernivtsi National University

**PRODUCTIVITY ANALYSIS AND SPECIAL CONDITIONS OF THE
FUNCTIONING OF THE METHOD OF GEOINFORMATION MULTIAGENT
OPTIMIZATION OF THE PLANNING OF TRANSPORT FLOWS
OF THE ROAD NETWORK**

The article examines the results of approbation of the method of geoinformation multiagent optimization for planning of flows of the transport network on different natural conditions and complexity of the area in the context of administrative districts of Chernivtsi region. In particular, experimental data with a high degree of detailing served as a fragment of mountain terrain with a difference of heights of 751 m, the average steep slope of 21° , average forests of more than 57%, and a significant branching of the river network – 2.46 km/km^2 , and the presence of 12 settlements.

The estimation of the time and spatial complexity of the indicated method for solving problems of various dimensions and obstacles in them is carried out. The influence of each parameter setting (number of iterations, number of ants, α and β values) on the possibility of finding settlements and the total length of the obtained path are substantiated.

The conditions of non-identification of settlements were found out and combined methods for obtaining the result in all conditions were proposed. Thus, for the formation of a network of optimal routes with a combination of all the given settlements, it is necessary to adhere to the combination (combining) of the obtained results in a certain sequence. The latter are splitting the territory into fragments, as well as involving the ArcGIS Network Analyst module and the Dietcaster method to optimize the length of the path from several iterations.

Keywords: GIS, road planning, multiagent optimization, ant colony optimization, traffic flows.