

Міністерство освіти і науки України
Київський національний університет будівництва і архітектури

Гуцул Тарас Володимирович

УДК 528.48:625.72]:004.942]](477.85)

**ГЕОІНФОРМАЦІЙНА МУЛЬТИАГЕНТНА ОПТИМІЗАЦІЯ
ПЛАНУВАННЯ РОЗВИТКУ ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНОЇ МЕРЕЖІ
(НА ПРИКЛАДІ ТЕРИТОРІЇ ЧЕРНІВЕЦЬКОЇ ОБЛАСТІ)**

05.24.01 – Геодезія, фотограмметрія та картографія

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Київському національному університеті будівництва і архітектури, Міністерство освіти і науки України, м. Київ.

Науковий керівник доктор технічних наук, професор
Карпінський Юрій Олександрович,
Київський національний університет будівництва і архітектури, завідувач кафедри геоінформатики і фотограмметрії, м. Київ

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Куліковська Ольга Євгеніївна,
Державний вищий навчальний заклад «Криворізький національний університет»,
професор кафедри геодезії, м. Кривий Ріг

кандидат технічних наук, доцент
Пеньков Володимир Олексійович,
Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова,
доцент кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем, м. Харків

Захист відбудеться «13» квітня 2020 р. о 14⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.056.09 у Київському національному університеті будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31, ауд. 466.

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Київського національного університету будівництва і архітектури за адресою: 03037, м. Київ, Повітрофлотський проспект, 31.

Автореферат розісланий «6» березня 2020 р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради,
кандидат технічних наук, доцент



О. П. Ісаєв

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Дорожньо-транспортна мережа відіграє важливу роль у соціально-економічному розвитку країни. Її оптимальний стан є передумовою економічного зростання, підвищення конкурентоспроможності національної економіки і якості життя населення. Між рівнем розвитку держави та показником густоти дорожньо-транспортної мережі існує закономірна залежність.

Станом на 01.01.2015 р. Україна опинилася у числі аутсайдерів серед європейських країн за густотою дорожньо-транспортної мережі (42 місце з 51). З показником в $0,28 \text{ км/км}^2$ нас випередили практично всі сусідні країни: Угорщина ($2,15 \text{ км/км}^2$), Чехія ($1,66 \text{ км/км}^2$), Польща ($1,32 \text{ км/км}^2$), Словаччина ($0,90 \text{ км/км}^2$), Білорусь ($0,42 \text{ км/км}^2$), Румунія ($0,35 \text{ км/км}^2$). Відставання Молдови лише в тисячних ($0,276 \text{ км/км}^2$), а у європейській частини Російської Федерації майже співмірний показник ($0,25 \text{ км/км}^2$), і це враховуючи менший показник густоти населення та рівня господарської освоєності території. Закономірно, що й за рівнем валового внутрішнього продукту Україна на 47 місці із 51. Це спричинює потребу невідкладного розвитку оптимальної дорожньо-транспортної мережі для задоволення соціально-економічних викликів і успішного виконання ролі транзитної держави.

Чернівецька область займає зручне географічне положення і межує одночасно з двома державами. Унікальна своєрідність та контрастність геоморфологічної будови території, а також значні мінеральні, лісові, туристично-рекреаційні ресурси з одночасно низьким рівнем розвитку дорожньо-транспортної мережі роблять її актуальним об'єктом дослідження, результати якого можуть бути інтерпретовані для будь-якої іншої території України.

Основна причина недостатнього розвитку дорожньо-транспортної мережі пов'язана з недостатнім фінансуванням ремонту, будівництва та реконструкції, що спричинює погіршення існуючої та сповільнення темпів вишукування нової. Нагальна потреба зростання конкурентоспроможності галузей економіки вимагає підвищення ефективності планування логістики дорожньо-транспортних мереж, у тому числі із залученням сучасних інформаційних технологій.

Важливе значення для проведеного дослідження мали наукові праці, в яких висвітлено сучасні тенденції та методи розв'язання транспортно-логістичних задач з урахуванням поведінкових моделей колоній мурах, зокрема: Л. Ф. Гульницького, І. А. Кузьміна, В. В. Лотиша, О. В. Муляревича, А. А. Олійника, О. О. Олійника, О. С. Субботіна, В. Й. Хазіна, С. Д. Штовби, а також аналізу методів і моделей для цифрового моделювання рельєфу, зокрема: Б. І. Денисюка, Ю. О. Карпінського, Н. Ю. Лазоренко-Гевель, А. А. Ляценка, А. А. Постельняка та інших.

У вирішенні поставлених в дисертаційній роботі завдань помітну роль відіграли публікації зарубіжних авторів, зокрема щодо оптимізації мурашиних колоній: A. Coloni, G. Defteraiou, L. Dong, M. Dorigo, J. Genderen, H. Gewen, X. Gong, G. Han, C. Hao, Z. Jiang, N. Karadimas, M. Kolokathi, Kun-Ming Yu, H. Lingchao, V. Loumos, V. Maniezzo, Z. Masoumi, Ming-Gong Lee, A. S. Niaraki, T. Stütze, L. Wang, Z. Wenbo, L. Wei, F. Xinxin, C. Yanguang, Y. Yao, M. Zhang, Y. Zhao та інших.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Обраний напрям дослідження пов'язаний із реалізацією завдань наукового напрямку кафедри геоінформатики та фотограмметрії Київського національного університету будівництва і архітектури – «Розробка та впровадження в практику технологій, методів, моделей і рекомендацій для ГІС, фотограмметрії та дистанційного зондування Землі» (№ державної реєстрації – 0108U006506), де здобувачем як виконавцем створено інформаційну систему, здатну формулювати різноманітні варіанти трасування оптимальних альтернативних шляхів між заданими населеними пунктами.

Висновки й основні положення роботи опосередковано пов'язані із реалізацією завдань Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки, схваленої Постановою Кабінету Міністрів України від 11.01.2018 №34-р.

Мета і задачі дослідження. *Метою* дослідження є підвищення ефективності функціонування дорожньо-транспортної мережі на основі методу мурашиної оптимізації.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені та виконані наступні *завдання*:

- 1) проаналізувати існуючі методи і підходи щодо використання мультиагентних методів в оптимізації дорожньо-транспортних мереж;
- 2) розробити моделі вихідних геоінформаційних даних та способи оптимізації результатів моделювання з використанням методів оптимізації мурашиних колоній;
- 3) дослідити параметри характеристик інформаційного процесу, що характеризують метод оптимізації колонії мурах;
- 4) експериментально апробувати метод геоінформаційної мультиагентної оптимізації для планування розвитку дорожньо-транспортних мереж.

Об'єкт дослідження – дорожньо-транспортна мережа Чернівецької області.

Предмет дослідження – оптимізація структури дорожньо-транспортної мережі Чернівецької області з застосуванням геоінформаційного мультиагентного методу.

Методи дослідження базуються на: визначенні тенденцій використання ГІС та САПР в проектуванні доріг; порівнянні методів проектування автомобільних доріг; оцінюванні точності глобальних висотних даних території дослідження відносно топографічних карт різних масштабів; ГІС-картографуванні просторової інформації та оверлейному аналізі на етапі наповнення геопросторової бази даних; структурно-графічному моделюванні в частині розробки схеми функціонування методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації; експериментальній апробації методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації на етапі перевірки програмно-апаратної реалізації методу та з'ясуванні впливу факторів на функціонування методу; вимірюванні існуючих просторових характеристик дорожньої мережі для порівняння з результатами одержаними внаслідок апробації методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації планування транспортних потоків дорожньої мережі.

Наукова новизна одержаних результатів полягає у розв'язанні актуальних задач організації дорожньо-транспортних мереж з використанням методів геоінформаційної мультиагентної оптимізації мурашиного потоку. Зокрема:

обґрунтовано:

1. Можливість застосування мультиагентних методів оптимізації для розв'язання задач планування та оптимізації дорожньо-транспортних мереж з використанням геопросторових даних.

розроблено:

2. Модифікований метод Max-Min мультиагентної оптимізації мурашиної системи для трасування основного та конкурентних варіантів дорожньо-транспортних мереж з урахуванням характеристик місцевості для кожної комірки grid-поверхні.

3. Геопросторові моделі засновані на загальнодоступних даних, які враховують інформацію щодо умов місцевості (крутизни схилів, рослинного покриву, об'єктів гідрографії, забудованості території, наявності інженерних споруд) при проектно-вишукувальних роботах щодо вибору варіанту траси.

удосконалено:

4. Комбіновану технологію планування оптимальних маршрутів, що поєднує традиційну технологію трасування основного напрямку та конкурентних варіантів проходження маршруту з урахуванням особливостей місцевості з використанням топографічних карт та модифікований метод Max-Min мультиагентної оптимізації мурашиної системи з урахуванням геопросторових даних.

набули подальшого розвитку:

5. Схеми планування оптимальних (альтернативних) маршрутів дорожніх мереж у розрізі адміністративних районів Чернівецької області на перспективу.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості здійснення пропонуваним методом автоматизованого процесу трасування основного та конкурентних варіантів проходження траси з урахуванням вимог діючих державних будівельних норм. Засобами об'єктно-орієнтовної мови програмування Java 8 розроблено програмно-методичний комплекс для трасування основного напрямку та конкурентного варіантів проходження маршруту модифікованим Max-Min методом мультиагентної оптимізації мурашиної системи.

Запропоновані розробки дозволять покращити роботу Служби автомобільних доріг в Чернівецькій області в напрямку реалізації Державної цільової економічної програми розвитку автомобільних доріг загального користування державного значення на 2018-2022 роки. (довідка 050619/№564), підвищити взаємодію Чернівецької обласної державної адміністрації (довідка №01.52/30-1097) з місцевими громадами, створити передумови для економії бюджетних коштів.

Наукові результати дослідження використовуються в навчальному процесі Чернівецького національного університету ім. Юрія Федьковича при викладанні курсів: «Інформаційні технології в геодезії», «Інформаційні технології в менеджменті землеустрою», «Технології інженерно-технічного проектування» для студентів галузі знань «Архітектура та будівництво» спеціальності «Геодезія та землеустрій» (довідка №11/17-1453).

Особистий внесок здобувача. Всі результати, що складають основний зміст дисертаційного дослідження, отримані здобувачем самостійно. Це підтверджується одноосібними публікаціями за ключовими аспектами проблеми: порівняння методів мультиагентної оптимізації, з'ясування особливостей мурашиного алгоритму, програмно-апаратна реалізація методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації, аналіз продуктивності та особливих умов функціонування методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації.

В наукових працях, опублікованих із співавторами здобувачу належить:

[1] – оцінка можливості використання глобальних ЦММ для потреб дорожнього планування з урахуванням їх точності відносно радянських топографічних карт різних масштабів;

[8] – система заходів наповнення геопросторових баз даних;

[13] – система заходів для розвитку геодезичних мереж.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційного дослідження доповідалися на 6 наукових конференціях, зокрема: VIII всеукраїнській конференції з міжнародною участю у Київському національному університеті ім. Т. Шевченка «Молоді науковці – географічній науці» (м. Київ, 23-24 листопада 2012 р.); XIII міжнародній науковій міждисциплінарній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у Київському національному університеті ім. Т. Шевченка «Шевченківська весна – 2015. Географія» (Київ, 2-3 квітня 2015 р.); міжнародній науковій конференції «Від географії до географічного українознавства: еволюція освітньо-наукових ідей та пошуків (до 140-річчя започаткування географії у Чернівецькому національному університеті ім. Ю. Федьковича)» (Чернівці, 11-13 жовтня 2016 р.); XII всеукраїнській науково-практичній конференції студентів, аспірантів та молодих вчених у Київському національному університеті ім. Т. Шевченка «Молоді науковці – географічній науці» (Київ, 16-17 листопада 2016 р.); II міжнародній науково-технічній конференції у Київському національному університеті будівництва і архітектури «Геопростір» (Київ, 27-29 жовтня 2016 р.); XXI міжнародній конференції користувачів ESRI в Україні «ГІС в управлінні територіальним розвитком» (Київ, 23-24 жовтня 2018 р.).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 13 наукових праць, у тому числі – 5 у вітчизняних виданнях, що входять до переліку наукових фахових видань з технічних наук, визначених МОН України; 1 стаття у міжнародному науковому рецензованому журналі, що входить до наукометричної бази даних (Scopus); 2 публікації, які додатково відображають результати дисертаційного дослідження та входять до переліку фахових видань; 5 публікацій у збірниках праць за матеріалами конференцій.

Загальний обсяг опублікованих праць – 4,0 друкованих аркушів, з яких 2,95 є самостійним доробком дисертанта.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається із анотації, вступу, трьох розділів, висновку, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг дисертації становить 171 сторінка, із них 147 сторінок – основна частина. У тексті міститься 59 графічних ілюстрацій, з них 12 на окремих сторінках, 21 таблиця, з них 1 на окремій сторінці, список використаних джерел обсягом 125 найменувань на 14 сторінках, додатки на 9 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, завдання і методи дослідження, наведено основні наукові результати роботи та їхнє практичне значення, викладено відомості про повноту публікації результатів роботи.

У першому розділі «**Аналіз сучасного стану та тенденцій в плануванні транспортних потоків дорожньої мережі**» викладено аналіз існуючих методів проектування автомобільних доріг та пошуку оптимального шляху в графах, види мультиагентної оптимізації та роль в них методів мурашиного потоку; розглянуто тенденції використання засобів ГІС та САПР в проектуванні доріг на сучасному етапі; проаналізовано зарубіжний досвід застосування мурашиних методів для розв'язання задач у сфері дорожнього планування.

Автомобільні дороги – капіталомісткі споруди, проектування яких повинно спрямовуватися, з одного боку, на досягнення високих експлуатаційних якостей, а з іншого – на мінімізацію будівельних витрат. Серед множини методів, в останні роки для розв'язання комбінаторних задач оптимізації все частіше застосовуються методи штучного інтелекту. Класична теорія штучного інтелекту потребує однієї інтелектуальної системи, в якій містяться всі необхідні ресурси. В мультиагентних системах використовується зворотний принцип.

Інноваційним напрямом розвитку методів штучного інтелекту є мультиагентні методи інтелектуальної оптимізації, що моделюють колективний інтелект тварин, комах та інших живих істот, – методи *Swarm Intelligence*. Їх нещодавня поява обумовлює відносно незначну дослідженість, однак висока результативність при розв'язанні різних оптимізаційних задач засвідчує перспективність даного напрямку.

Головна особливість мультиагентних методів колективного інтелекту полягає в їх біонічній природі. Ці методи дозволяють групам особин розв'язувати різні важкі практичні задачі в природі, що свідчить про ефективність їхньої поведінки, а отже, і про ефективність функціонування даних методів. Подальше вивчення можливих областей їхнього застосування в аспекті розв'язанні оптимізаційних задач, в яких вони ще не застосовувалися, є актуальним.

В роботі з метою збереження єдності термінології використовується прийнята в математиці біологічна термінологія поведінки мурах.

Серед всіх існуючих на сьогодні методів мультиагентної оптимізації: бджолиного, роевого та мурашиного для розв'язання задачі оптимізації планування потоків дорожньо-транспортної мережі ефективніше придатний – мурашиний метод. Встановлено, що при рівних умовах оптимізація наявної мережі відбувалася оптимально. З практичної точки зору такі зміни дозволяли моделювати появу мосту або іншої додаткової дороги чи перешкоди. Наприклад, симулювати розмиття дорожнього полотна або інших додаткових несприятливих об'єктів та отримувати інформацію щодо пристосування агентів до обставин.

Мурашиний метод базується на тому, що агенти (мурахи) змінюють навколишнє середовище, залишаючи слід із феромонів для передачі сигналів іншим мурахам колонії. Непряма форма зв'язку між особами, названа «стігмергією», і представляє собою поширений протягом часу вплив, при якому одна особа змінює деяку область навколишнього середовища, а інші особини одразу використовують її

для розв'язання задачі. Колектив мурах за рахунок явища стігмерії утворює складну мультиагентну систему, в якій для непрямой комунікації між агентами застосовується сукупність значень міток – пам'ять колонії мурах. Інформації щодо зміни навколишнього середовища характерний локальний характер, проте вона може бути змінена (або сприйнята) лише комахами, які відвідали даний фрагмент середовища. З часом навколишнє середовище змінюється і сліди руху мурах поступово випаровуються, тому залишаються тільки оптимальні. Постійний рух мурах через ці маршрути спричинює залишки феромонів. Довші маршрути з часом стають менш привабливими, тому автоматично відкидаються методом. Стігмергія є непрямую та асинхронною формою комунікації, в якій комахи змінюють навколишнє середовище для передачі інформації іншим, котрі в свою чергу змушені реагувати на такі зміни. Практичну реалізацію цього явища в багатьох мурашиних колоніях здійснюють за допомогою спеціального ферменту «феромону», який виділяється в результаті руху. Адаптивність поведінки мурах заснована на сприйнятті випаровувань феромонів, яке в природі триває декілька діб. Таким чином, мурашиний метод гарантує наближення до оптимального розв'язку. Проте швидкість наближення неможливо передбачити.

В роботі розглянуто такі розширення мурашиного методу: метод мурашиних систем, заснований на елітній стратегії; метод мурашиних систем заснований на ранжируванні; метод системи мурашиних колоній; максі-мінний метод мурашиних систем. Використання більш жадібних стратегій пошуку потенційно підсилює проблему передчасної стагнації. Таким чином, ключем до найкращої роботи методів АСО є комбінування підходу сильнішого використання кращих розв'язків із ефективними механізмами запобігання передчасній стагнації. Максі-мінний метод мурашиних систем (MMAS) був розроблений спеціально для задоволення цих вимог. Метод Max-Min «мурашиної системи» переважно приводить до найближчого сусіднього населеного пункту (центроїду) формулюючи локально оптимальне рішення.

Наразі роботу з лінійно-протяжними просторовими об'єктами проблемно реалізувати без залучення спеціалізованих програмних технологій ГІС та САПР. Порівнюючи їх, слід зауважити про доцільність та переваги моделювання розвитку дорожніх мереж, розрахунку їх різноманітних варіантів, одержання попередньої картографічної інформації саме із застосуванням засобів ГІС.

Виходячи з цього, проведено аналіз застосування мурашиного методу у поєднанні з ГІС-технологіями для розв'язання різноманітних оптимізаційних задач. Встановлено, що всі вони опираються на реально існуючі дорожні мережі у вигляді графів, тоді як в роботі здійснено трасування оптимального варіанту напрямку дорожньо-транспортної мережі лише за набором точок-інтересу в 3D просторі.

У другому розділі «**Методико-технологічні особливості геоінформаційної мультиагентної оптимізації планування транспортних потоків дорожньої мережі**» обґрунтовано необхідні вихідні дані, в тому числі для поверхні для функціонування агентів; розроблено математичну модель; графічно описано уніфікованою мовою моделювання схему програмно-апаратної реалізації мурашиного методу; обґрунтовано постобробку результатів функціонування методу, їх візуалізацію та шляхи лінійного спрощення.

Запропонована в роботі модифікація методу Метод Max-Min мурашиної системи в цьому дослідженні полягала у врахуванні коефіцієнту складності прокладання

маршруту, який впливав на його довжину – функціональну відстань. Ця модифікація здійснювала ефективний вплив на поведінку мурах та вибір оптимальних маршрутів, в тому числі з урахуванням умов рельєфу, як одного із факторів.

В мультиагентних системах задачі розподілено між агентами, кожен із яких розглядається як член групи або організації. Розподіл задач передбачає призначення ролей всіх членів групи, визначення міри їх відповідальності та вимог щодо досвіду. В цьому дослідженні, кожен інтелектуальний агент приймав рішення щодо доцільності використання комірки для проходження частини лінійного об'єкту у вигляді траси майбутньої дороги. Вихідними даними були геопросторові шари інформації щодо: крутизни схилів (*a*), інженерних споруд (*b*), лісів (*c*), багаторічних насаджень (*d*), забудови території (*e*), об'єктів гідрографії (*f*).

Крутизна схилу (*a*) – геоморфологічний параметр, що розраховувався на основі похідної поверхні першого порядку. Основним критерієм оптимальності, як правило виступає вартість будівництва доріг та їх подальшої експлуатації. Вона залежить як від довжини дороги, так і від проходження ділянок траси по певним елементам поверхонь рельєфу місцевості. В ролі перешкод варто враховувати як забудовані території, природні об'єкти, водойми, існуючі споруди та комунікації, так і схили макрорельєфу місцевості із значеннями крутизни вище допустимої. Вся сукупність перешкод може бути вираженою у вигляді ЦММ.

Застосування загальнодоступних геопросторових даних для трасування автомобільних доріг в порівнянні з наземними методами дозволяє: зменшити терміни та об'єми польових геодезичних робіт; підвищити продуктивність процесу вишукувань та знизити їх вартість; скоротити вартість будівництва за рахунок вибору найоптимальніших варіантів та використання детальнішої інформації щодо місцевості.

ЦММ одержуються різними методами. Серед них, зокрема: традиційні топографо-геодезичні знімання, методи GNSS, методи аналогової та цифрової фотограмметрії, LIDAR-сканування, гідролокаційні, радіолокаційні, застосування супутникової альтиметрії та інтерферометрії. Переважно всі наведені методи – дороговартісні, що стримує їх застосування.

Відсутність оцінки точності даних (для різних типів місцевості – рівнинної, горбистої, гірської) глобальних висот ASTER GDEM та SRTM для території дослідження обумовила потребу її здійснення. Якість ЦММ в роботі оцінено шляхом порівняння одержаних результатів з нормативним значенням середньоквадратичного відхилення визначення висотного положення точки.

Одержані результати (табл. 1) демонстрували значно менші значення похибки матриці SRTM порівняно з матрицею ASTER_GDEM практично у всіх порівнюваних випадках. Із всіх побудованих карт різниць найменше стандартне відхилення та коефіцієнт варіації характерні для ЦММ SRTM рівнинної (4,83) та горбистої (3,04) місцевості, що свідчить про максимальне наближення цих даних до топографічних карт масштабу 1:25000. Таким чином, встановлено можливість застосування відкритих даних радарної інтерферометричної зйомки у вишукуванні на стадії техніко-економічного обґрунтування та трасування проходження лінійних споруд.

Розходження висотних значень глобальних поверхонь відносно окремих відміток топографічних карт

Тип рельєфу	Назва пункту ДГМ або висотної відмітки	Висота на топографічній карті, м	Висота на матриці ASTER_GDEM, м	Різниця, м	Висота на матриці SRTM, м	Різниця, м
Рівнинний	Анадоли	252,812	246	6,812	246	6,812
	Долиняни	293,942	282	11,942	290	3,942
	Владична	294,678	293	1,678	286	8,678
Горбкуватий	Слобідка	404,505	398	6,505	395	9,505
	уріз води «320,6»	320,600	316	4,600	319	1,600
	уріз води «312,5»	312,500	301	11,500	310	2,500
Гірський	Черешенька	439,645	429	10,645	434	5,645
	Сисна	418,352	407	11,352	413	5,352
	Кічера	785,400	774	11,400	774	11,400

В роботі розглянуто *інженерні споруди (b)* – точковий шар, котрий охоплював всі прохідні ділянки над водними об'єктами, що представлено у вигляді мостів, деяких видів гідротехнічних споруд та водопропускних труб. Під час класичного трасування автомобільної дороги спочатку обирають контрольні точки, через які повинна пройти майбутня траса, або які слід оминати. Слід зауважити, що нехтування наявністю водопропускних труб призводило до пошуку альтернативного шляху навіть через незначну водну перешкоду, що в рази перевищувало економічно-обґрунтований варіант, і погіршувало якість результатів, сформованих мурашиним методом. Основними джерелами даних для створення цього шару використано дані ДЗЗ, за якими шляхом візуального дешифрування встановлено місця локалізації об'єктів інженерних споруд.

Ліси (c) та багаторічні насадження (d) містять території вкриті природною лісовою та чагарниковою рослинністю, і сільськогосподарські угіддя під штучно створеною деревною, кущовою чи трав'яною рослинністю. Врахування особливостей земельного покриву вдалося досягти з використанням методології CORINE, спрямованої на формування і періодичне оновлення бази даних CLC земного покриву і комп'ютерне картографування цих даних на основі фотоінтерпретації радіометрично і геометрично скоригованих орторектифікованих супутникових зображень, отриманих у межах, зокрема проекту IMAGE. База даних CLC є доступною в операційному режимі для більшості регіонів Європи за звітні 1990, 2000, 2006, 2012 роки у мережах Copernicus Land Monitoring Service і містить інформацію щодо поточного стану ділянок з використанням мінімального блоку картографування розміром 25 га, а поріг для виявлення змін земного покриву встановлюється у розмірі 5 га.

Забудовані території (e) включали територію наявних населених пунктів. Тобто – сукупність земельних ділянок, що використано як просторовий базис для розміщення об'єктів забудови промисловості та загального користування. Території населених пунктів обумовлюють потребу врахування складу земель, їх функціонального використання, форми власності та обмежень прав на них, і т. ін. Хоча, вилучення таких земельних ділянок можливе для суспільних потреб згідно пункту «г» ст. 143 Земельного Кодексу України (зокрема, під розміщення лінійних об'єктів та об'єктів транспортної інфраструктури – доріг, мостів, естакад та об'єктів необхідних для їх експлуатації), однак наявність земельних поліпшень спричинює

високу вартість відшкодування. Окрім того, на територіях населених пунктів вже сформовано доволі густу дорожню мережу та розроблено заходи щодо її перспективного розвитку з урахуванням генеральних планів. Джерелом даних використано геометрію просторових об'єктів населених пунктів розміщених на геопорталі «Адміністративно-територіального устрою України».

Об'єкти гідрографії (f), представлено поєднанням лінійних об'єктів річкової мережі та полігональних об'єктів водойм (ставків та озер). Джерело даних – геопортал «Водні ресурси України» презентований Держводагентством на початку 2018 р. Окрім доповнених та частково виправлених даних геометрії об'єктів гідрографії, включено і буферні захисні зони відповідно до їх розмірів.

Значний вплив на якість проходження маршруту обумовлено способом візуалізації ландшафту. В основному для цього використовується представлення карти у вигляді матриці прохідностей. Вибір форми комірки відіграє важливу роль при реалізації методу – впливає на довжину одержаного шляху. Наразі, оптимальною є квадратна комірка з 8 найближчими сусідами.

В роботі карту було інтерпретовано у вигляді набору комірок квадратної форми, які утворили сітку. Центроїди квадратів співпадали з регулярною мережею висотних даних SRTM та містили атрибутивні характеристики (a, b, c, d, e, f) кожного із них в цій точці та унікальну нумерацію (ID). У свою чергу вихідні атрибути кожної із точок формують функцію вигляду $k(a, b, c, d, e, f)$ задаючи вплив кожного фактору на подальше проходження маршруту методом мурашиної оптимізації. Характеристика поверхні для показника (a) охоплює діапазон значень крутизни схилу від $[1, \dots, 90]$, тоді як решта факторів (b, c, d, e, f) описуються діапазоном $[0, 1]$, де 0 – повна відсутність впливу ознаки, а 1 – її наявність (табл. 2). Це означало, що навіть часткова наявність перешкоди в межах квадрату, враховувалася та повною мірою абстраговано поширювалася на нього.

Таблиця 2

Діапазони можливих значень поверхні

ID	Крутизна схилу	Інженерні споруди	Ліси	Багаторічні насадження	Забудовані території	Об'єкти гідрографії
ID	a	b	c	d	e	f
$[1; \infty]$	$[1, \dots, 90]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$	$[0, 1]$

В свою чергу, вихідні атрибути кожної із точок формують функцію вигляду $k_i = a_i \times b_i \times c_i \times d_i \times e_i \times f_i$ задаючи вплив кожного фактору на подальше проходження маршруту методом мурашиної оптимізації згідно з переліком умов:

$$k_i = \begin{cases} a_i & \text{при } b_i = 1; \\ 20 a_i & \text{при } b_i = 0 \text{ та } c_i = 1; \\ 70 a_i & \text{при } b_i = c_i = 0 \text{ та } d_i = 1; \\ 500 a_i & \text{при } b_i = c_i = d_i = 0 \text{ та } e_i = 1; \\ 1000 a_i & \text{при } b_i = c_i = d_i = e_i = 0 \text{ та } f_i = 1. \end{cases} \quad (1)$$

Наведені в формулі (1) значення 20, 70, 500 та 1000 встановлено шляхом виконання експериментальних тестувань з умовою, що одержані за ними результати значень k_i комірок при обчисленні складності прокладання маршруту не перекриють один одного.

Функціональна відстань (імпеданс) між двома населеними пунктами A та B (рис. 1) розраховувалася за формулою (2):

$$dist_{AB} = \sum_{i=1}^n \Delta x_i \times k_i \quad (2)$$

де:

A – ідентифікатор початкового населеного пункту;

B – ідентифікатор кінцевого населеного пункту;

n – кількість комірок маршруту між пунктами A та B ;

$i = 1, 2, 3 \dots n$ – кількість комірок;

Δx_i – відстань між пунктами i та $i + 1$; $\Delta x_i = \sqrt{(x_{i+1} - x_i)^2 + (y_{i+1} - y_i)^2}$

k_i – значення коефіцієнту складності прокладання маршруту для комірки.

Загальна відстань включатиме суму всіх відстаней Δx_i , які проходять між населеними пунктами, які складають поточний маршрут та описується формулою (3):

$$\sum_{i=1}^W \Delta x_i \rightarrow \min \quad (3)$$

де:

W – кількість населених пунктів маршруту.

Ймовірність переходу мурахи з поточної точки до наступної розраховано за формулою (4):

$$P_i = \frac{l_i^q \times r_{i,j}^p}{\sum_{m=0}^S l_m^q \times r_{i,j}^p} \quad (4)$$

де:

P_i – ймовірність переходу за напрямком i ;

l_i – величина обернена вазі (довжині) i – го переходу;

$r_{i,j}$ – кількість феромону на ребрі i, j ;

q – величина, що визначає «жадібність» методу;

p – величина, що визначає стабільність методу $q + p = 1$.

S – множина не відвіданих вузлів;

m – індекс, який використовується для визначення сусідніх не відвіданих вузлів.

Рух мурахи від вузла до вузла i до вузла j буде з ймовірністю:

$$P_{i,j} = \frac{(r_{i,j}^\alpha)(u_{i,j}^\beta)}{\sum (r_{i,j}^\alpha)(u_{i,j}^\beta)} \quad (5)$$

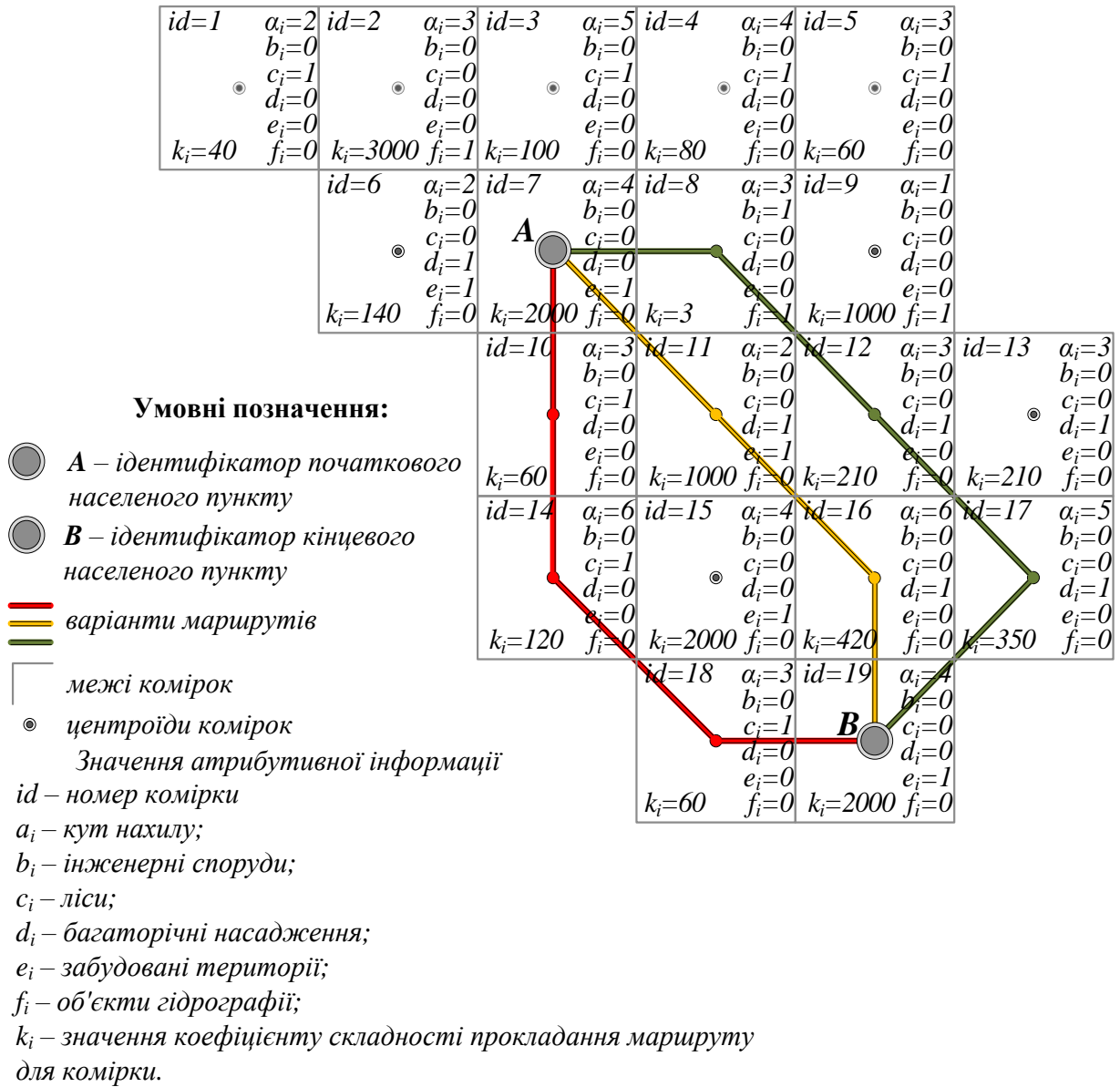
де:

$r_{i,j}$ – кількість феромонів на ребрі i, j ;

α – параметр контролю впливу $r_{i,j}$ (визначає вагу сприйняття «запахи» мурахою);

$u_{i,j}$ – привабливість ребер i, j ;

β – параметр контролю впливу $u_{i,j}$ (визначає рівень феромонів).



Обчислення коефіцієнту складності *k_i* (імпедансу) прокладання маршрутів

Dist(red) _{A,B}		Dist(orange) _{A,B}		Dist(green) _{A,B}	
Комірка	Значення <i>k_i</i> в комірці	Комірка	Значення <i>k_i</i> в комірці	Комірка	Значення <i>k_i</i> в комірці
id7	2000	id7	2000	id7	2000
id10	2060	id11	3000	id8	2003
id14	2180	id16	3420	id12	2213
id18	2240	id19	5420	id17	2563
id19	4240			id19	4563

Рис. 1. Узагальнена схема прокладання маршруту

В роботі з'ясовано, що коли значення параметру α встановлено близьким до нуля, то ймовірність відшукування найближчих міст буде більшою. Якщо β встановлено близьким до нуля, то спрацьовує лише поширення феромонів, що швидко призводить до ситуації, в якій всі мурахи обирають однаковий маршрут, і в загальному не оптимально. Таким чином, запропоновано зберігати баланс між цими

параметрами та інтенсивністю випаровування феромону. Саме через це, в роботі значення параметрів впливу α та β всюди приймалось сталим $\alpha = 0,5$; $\beta = 0,5$.

Внаслідок виконання умови руху, кожна мураха згенерувувала маршрут. Одержаний масив маршрутів відсортувався за довжинами від *min* до *max* враховуючи кількість населених пунктів *W*.

Згідно із запропонованим у роботі методом, після генерації маршрутів слід виконати оновлення феромонів на найоптимальнішому маршруті.

$$r_{i,j} = (1 - \rho)r_{i,j} + \Delta r_{i,j}, \quad (6)$$

де:

$r_{i,j}$ – кількість феромонів на ребрі i,j ;

ρ – швидкість випаровування феромону;

$\Delta r_{i,j}$ – кількість відкладеного феромону.

В свою чергу, кількість відкладеного феромону $\Delta r_{i,j}$ обчислено за формулою (7):

$$\Delta r_{i,j} = \frac{Q}{dist_{AB}} \quad (7)$$

де:

Q – константа, що відноситься до кількості феромону, що було залишено на шляху ($Q = 1$);

$dist_{AB}$ – функціональна відстань між двома населеними пунктами *A* та *B*.

Кількість феромонів гранично обмежується умовами *max, min*. Феромони відкладалися тільки на кращих маршрутах виявлених при повторному застосуванні математичної операції. Всі ребра ініціюються значенням *max*.

При прокладанні маршруту матриця феромонів для відповідних переміщень із будь-якої точки до сусідньої матиме деяке константне значення. В конкретному випадку – 1. В процесі функціонування методу на кожній ітерації знаходиться маршрут з мінімальною вартістю проходу. Для такого маршруту відбуватиметься збільшення значення феромону, а для решти його випаровування, тобто зменшення на певне число, визначене користувачем як параметр запуску розрахунку. Хоча, вибір кожної наступної точки для руху мурах i є випадковим, але наявність феромону на маршруті руху із будь-якої точки в сусідню збільшує ймовірність вибору саме такого варіанту руху. Це призводить до того, що значення феромону зростає в найбільш відвідуваних точках. Таким чином, оптимальні маршрути постійно вдосконалюються, в той час як випаровування феромону, по суті мінімізує можливості вибору певних точок, а отже, як наслідок зменшуватиметься і потенційне поле пошуку варіантів проходження ймовірного маршруту.

Дослідження модифікацій методів оптимізації мурашиних колоній (ACO) демонструвало, що підвищення продуктивності може бути одержано за допомогою інтенсивнішого використання кращих розв'язків знайдених в процесі пошуку.

Програмну реалізацію методу здійснено використанням об'єктно-орієнтовної мови програмування Java 8. Середовищем для розробки стало вільноінтегроване середовище модульних кросплатформених додатків – Eclipse. В процесі роботи над даним методом, використовувались такі Open Source бібліотеки: Google Guava, Apache Commons IO, Apache Commons Lang, Apache Commons Collections, Apache

Log4j; класи Point, Route, Ant, Environment, Path, AntMovingTask, RouteComporator, Update-EnvironmentTask, RouteUtilityFactory, ACO, ACO2. Графічний інтерфейс створено за допомогою стандартних класів – Jpanel, JButton, JTexbox.

Результати обчислень доступні у вигляді файлу формату *.csv та містять 5 стовпців інформації (*id* – унікальний номер запису; *x,y* – прямокутні координати по осях *OX* та *OY*; *centroid_name* – назва центроїду населеного пункту; *impedance* – вартість пересування). Графічне виведення результатів полягало у порядкувому сполученні точок за даними їх координат. При цьому, можлива поява самоперетинів та блискавкоподібних зламів помилкових артефактів. Виникнення помилок топології в першу чергу пов'язано з особливостями пошуку результатів. Наприклад, в деяких випадках суміжні комірки містили ідентичні значення. В роботі встановлено, що графічне спрощення результатів оптимально здійснювати шляхом поділу поліліній на окремі сегменти з подальшим залученням модулю ArcGIS Network Analyst. Порядкова нумерація центроїдів населених пунктів дозволяла обрати оптимальний варіант маршруту.

Об'єктивне порівняння результатів трасування маршрутів можливе за наявності ідентичних статичних точок між населеними пунктами. Офіційної бази центроїдів населених пунктів в Україні не існує. Різні веб-картографічні сервіси містять суттєво відмінні дані. Тому, в роботі використано полігони векторного шару забудови і результати функції *Features to points*.

У третьому розділі «**Експериментальна апробація та аналіз моделювання дорожньої мережі методом геоінформаційної мультиагентної оптимізації**» з'ясовано часову і просторову складність та вплив різних факторів на продуктивність модифікованого Max-Min методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації; експериментально встановлено причини випадків не виявлення центроїдів (населених пунктів); запропоновано та апробовано підходи до підготовки вихідних даних та налаштувань; порівняно одержані варіанти маршрутів з існуючою мережею; обґрунтовано перелік перспективних напрямків подальшого розвитку методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації.

Обчислювальна складність – кількість елементарних операцій витрачених на розв'язання поставленої задачі. В роботі складність залежала не тільки від розмірності вхідних даних, але й від самих даних. Розрізняють часову та просторову складність. Перша визначає необхідний час на розв'язок задачі заданої розмірності за допомогою досліджуваного методу, а друга – кількість необхідних ресурсів за аналогічних умов.

Необхідні затрати обчислювальних потужностей встановлено через продуктивність процесорів, тобто кількість виконуваних ними операцій протягом одиниці часу. Єдиний коректний спосіб вимірювання означеної продуктивності полягав у оцінці за допомогою проведення спеціалізованих тестів. Найбільша за повнотою та достовірністю база результатів тестувань для різних моделей процесорів на сьогодні розміщена на окремому порталі та ґрунтується на здійсненні програми PassMark.

Для проведення тестувань було обрано стандартну умову та набір процесорів наведених у таблиці 3 (виходячи з їх широкої розповсюдженості).

Вихідним для тестування був файл формату *.csv Герцаївського району, оскільки він містив мінімальну кількість комірок, що дозволило провести більшу

кількість тестувань за менших часових затрат. До прикладу, умова була сформульована, як залучення 1000 мурах та здійснення ними 200 ітерацій, з урахуванням параметрів контролю $\alpha = 0,5$ та $\beta = 0,5$ і швидкості вивітрювання феромону на рівні 0,001 для пошуку варіантів оптимальних маршрутів між 24 центроїдами населених пунктів.

Таблиця 3

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

Візуалізація результатів (рис. 2) засвідчила, що між часовою та просторовою складністю і продуктивністю процесора існує лінійна залежність, а отже витрати часу та пам'яті на пошук оптимальних маршрутів повною мірою залежали від обчислювальних потужностей процесорів. Сучасні моделі процесорів спроможні реалізовувати виконання методу в 2-4 раз швидше.

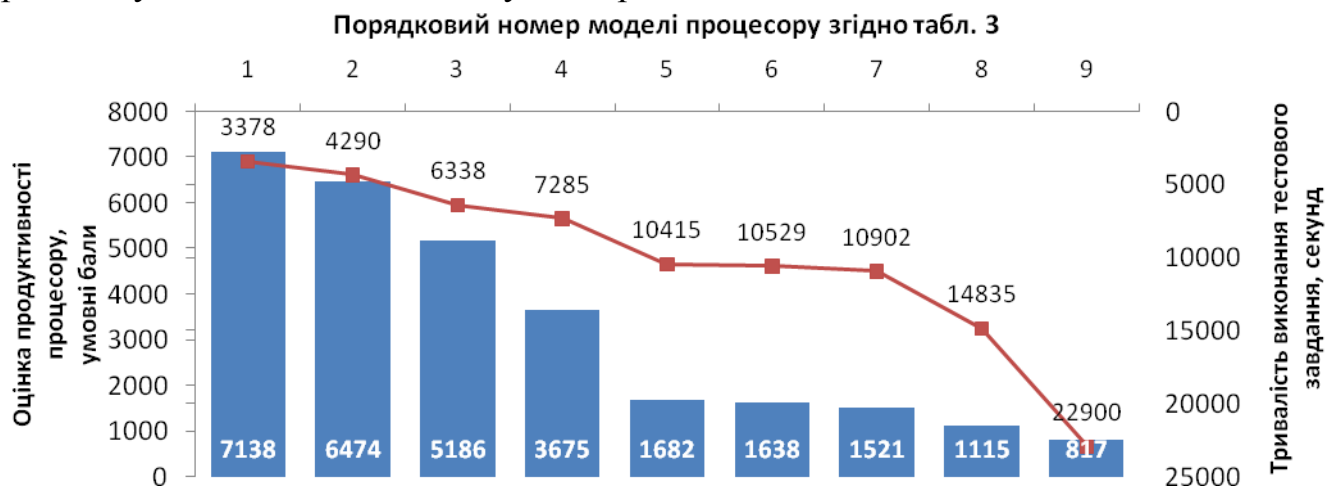


Рис. 2. Лінійна залежність між продуктивністю процесора та тривалістю розв'язку тестового завдання

Додатково проведено серію експериментів на предмет визначення впливу розмірності вхідних даних, кількості проведених ітерацій та кількості особин мурашиної колонії на часові затрати, результативність відшукування центроїдів та загальної довжини одержаних оптимальних маршрутів. Встановлено кореляційні залежності між ними (табл. 4). Таким чином, основними факторами, що збільшували тривалість розв'язку на будь-яких моделях процесорів, були параметри кількості мурах та ітерацій.

Результати кореляційного аналізу взаємозв'язку факторів в методі геоінформаційної мультиагентної оптимізації

Фактори	Розмірність вхідних даних	Кількість ітерацій	Кількість мурах
Тривалість розв'язку	0,31	0,87	0,98
Відшукування центроїдів	-0,77	0,54	0,54
Загальна довжина маршруту	x	0,17	0,64

Оскільки, під час роботи методу далеко не всі задані умовою центроїди сполучалися, то застосовувалися експериментальні налаштування. Наприклад, збільшення кількості ітерацій та збільшення чисельності мурашиних особин однозначно, хоч і покращувало результат, однак однозначно не гарантувало його одержання. Було з'ясовано ймовірні причини не виявлення центроїдів заданих умовою, які полягали в наступному:

- *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 (рис. 3а);
- *самоперетині маршруту*. При комбінації маршрутів може відбутися перетин відвіданих комірок, а отже такий маршрут буде відкинтий (рис. 3б). У кожній 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 (рис. 3в);
- *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 (рис. 3г);
- *спроба мурахою повернутися до вже відвіданої точки* призводить до ігнорування всього маршруту.



Рис. 3. Причини невиявлення центроїдів населених пунктів

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

Першочергово, в роботі варто відбувалося виконання модифікованого Max-Min методу одразу для всього району. Слід зауважити, що при значній тривалості обчислень виникала ймовірність знаходження лише певної кількості послідовно

сполучених між собою оптимальним шляхом центроїдів. Решта комірок території обиралася таким чином, щоб одна з околиць містила декілька центроїдів, до яких цьому методу вже вдалося сформувати маршрут. У випадку наявності відокремлено розташованих центроїдів, які не належали до найкоротшого маршруту, вибірку центроїдів здійснено повторно. Результати функціонування модифікованого Max-Min методу по обробці кожного із *.csv-файлів комбіновано поєднанням в єдиний маршрут.

Внаслідок наявності фактору випадковості руху мурахи, що призводив до формування унікальної мережі під час кожної ітерації одержано множину оптимальних маршрутів. У кожному окремому випадку сполученими виявлялися різні населені пункти. На рисунку 4 помітно, що маршрути узагальнено формують приблизно однакову траєкторію. Виведення єдиного оптимального маршруту здійснено шляхом формування мережних наборів даних для ArcGIS Network Analyst.

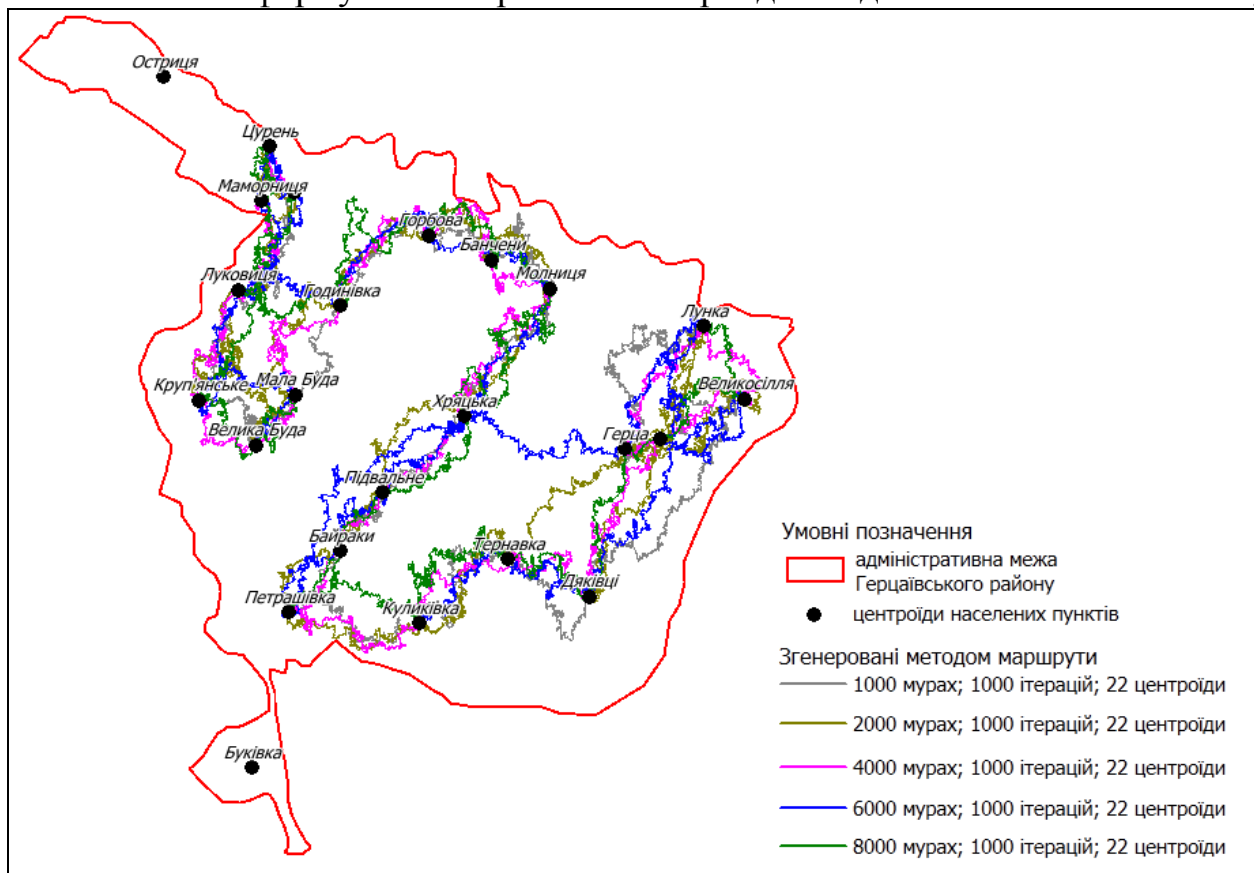


Рис. 4. Варіанти маршрутів знайдених методом за різних умов

В роботі дані згруповано до спільного векторного шару, розділено на сегменти (ребра) та додано вузли в місцях перетину з подальшим повторним поділом на сегменти. В ручному режимі послідовно проставлялися всі зупинки на місці локалізації центроїдів населених пунктів. Утворений маршрут експортувався у вигляді *.shp файлу, з визначенням довжини об'єкту геометрії. Наявність кількох варіантів завжди утворювала новий оптимальний.

Перевірку сформованих правил в роботі здійснено на фрагменті топографічної карти масштабу 1:25000 (номенклатура М-35-135-В-у) із складними умовами місцевості. Зокрема, в межах полігону площею 168,3 км² перепад висот становив 751 м. Середня крутизна схилів перевищувала 21°. Територія густо вкрита деревною рослинністю, показник лісистості перевищував 57 %. Розгалуженість річкової сітки становила 2,46 км/км², що практично в 10 разів перевищувало пересічний показник

для території України. Влаштування додаткових інженерних споруд умовою не передбачалося, але за потреби може бути додано у вигляді нових центроїдів. Незважаючи на складність умов, тут розміщено 12 населених пунктів.

Високий показник лісистості був вагомою перешкодою. Практично кожна друга комірка зайнята цим обмеженням, а отже на перший погляд з більшою 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 переспілих порід в Карпатах, місцеві лісгоспи обмежені в їх заготівлі через неможливість досягнення до місць потенційно придатних для експлуатації.

Врахування вилучення даних рослинності та забудови, разом з підходом до картографування інженерних споруд на густій річковій мережі, дозволило сполучити між собою всі 12 населених пунктів. Слід зауважити, що маршрути проходили паралельно гірським пасмам, що показано на рисунку 5.

Порівняння варіантів дорожньо-транспортних мереж здійснено шляхом відображення існуючого та змодельованого їх вигляду у розрізі адміністративних районів Чернівецької області (рис. 6). Значення довжин змодельованих лінійних об'єктів в межах адміністративних районів містяться в таблиці 5.

Таблиця 5

Порівняння варіантів дорожньо-транспортної мережі

Район	Існуюча мережа		Змодельований варіант	
	загальна довжина, км	густина мережі, км/км ²	загальна довжина, км	густина мережі, км/км ²
Вижницький	294,1	0,33	196,6	0,22
Герцаївський	151,1	0,49	133,8	0,43
Глибоцький	234,8	0,36	184,9	0,28
Заставнівський	243,3	0,40	199,4	0,33
Кельменецький	266,7	0,40	171,7	0,26
Кіцманський	203,6	0,33	196,0	0,32
Новоселицький	237,9	0,32	195,9	0,27
Путильський	195,3	0,22	292,5	0,33
Сокирянський	238,4	0,36	174,7	0,26
Сторожинецький	338,3	0,29	231,0	0,20
Хотинський	269,1	0,38	211,6	0,30

Практично у всіх випадках в таблиці 5 спостерігається зменшення загальної довжини змодельованих мереж. Насамперед, це пов'язано з більшою кількістю точок інтересу в наявних існуючих. Наприклад, окремо розташовані виробничі потужності за межами населених пунктів, місця видобутку корисних копалин і т. ін. Тоді як в роботі моделювання точок інтересу обмежувалися лише центроїдом населеного пункту.

В роботі для моделювання встановлено однакову для всіх територій умову пошуку: залучення 10000 мурах та здійснення 1000 ітерацій, з урахуванням параметрів контролю впливу $\alpha = 0,5$ та $\beta = 0,5$ і швидкості вивітрювання феромону на рівні 0,0000001. Значні обсяги кількості вихідних даних та неоднорідність природно-господарських умов територій спричинювали тривалі за часом ітерації та різну їх результативність. Тому, у випадках невиявлення деяких центроїдів (відсутності результатів трасування) застосовано комбінований прийом з налаштуванням

відключення рослинного покриву та об'єктів забудови для гірської місцевості. При цьому, територію пошуку зменшено до розмірів двох найближчих центроїдів, між якими заплановано трасування. Зауважимо, що у кожного з адміністративних районів повинно бути сполучення з сусідніми адміністративними районами. В роботі цю умову реалізовано шляхом трасування маршрутів між найближчими суміжними центроїдами. Таким чином, пошук центроїдів продовжено окремо для об'єктів, які з об'єктивних причин не виявлялися протягом першого запуску модифікованого методу.

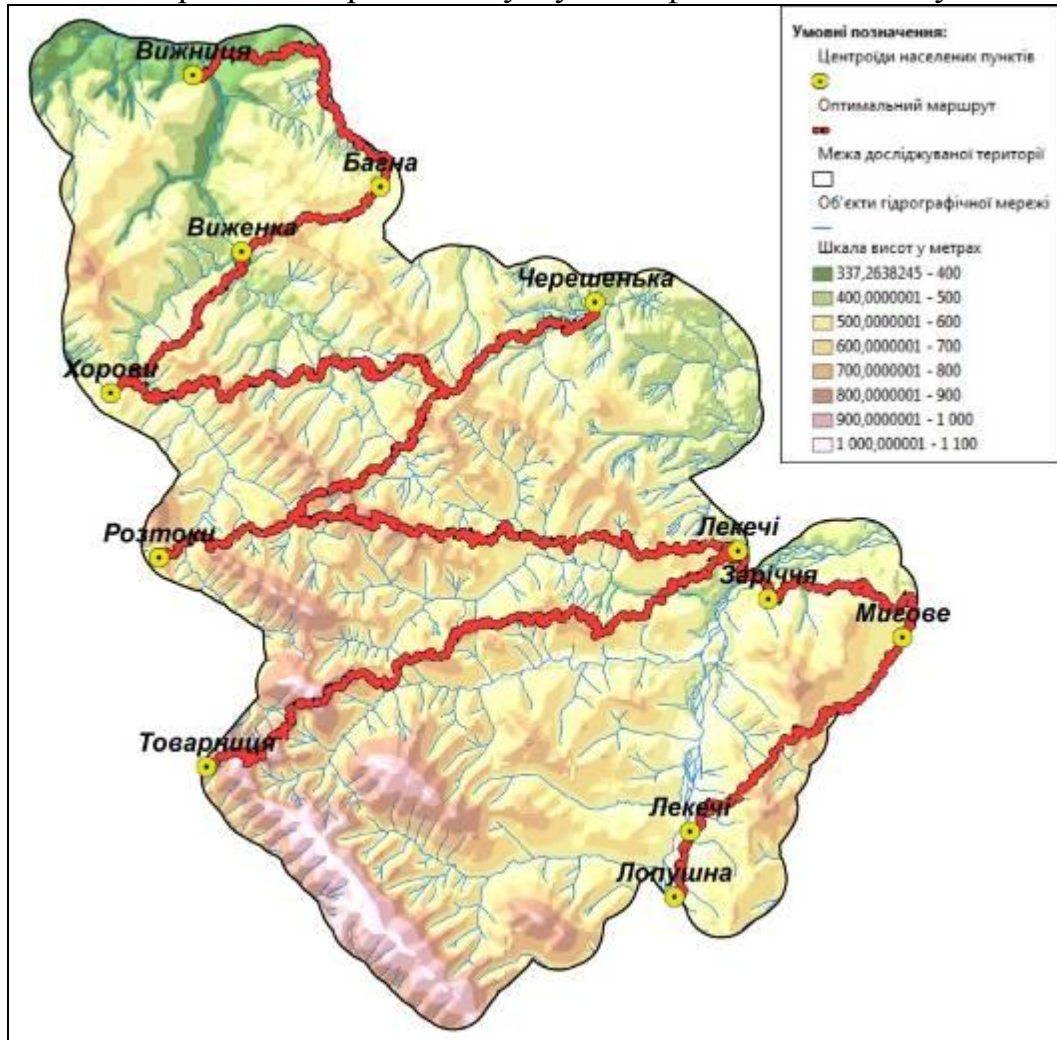


Рис. 5. Схема сформованих маршрутів на ЦМР при комбінуванні умов

Хоча, збільшення варіантів розв'язків в роботі дозволило досягнути певних переваг – плавності елементів геометрії напрямку проходження майбутньої траси, однак з метою об'єктивності експерименту обмежувалися лише першим одержаним позитивним результатом. В роботі модифікований Мах-Мін метод мурашиної мультиагентної оптимізації планування дорожньо-транспортних потоків пов'язав всі населені пункти (центроїди) району в єдину мережу з мінімальною відстанню та дотриманням чинних вимог державних будівельних норм.

В роботі, експериментальна апробація засвідчила спроможність модифікованого Мах-Мін методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації розв'язувати поставлені перед ним задачі. Зміна підходів в обробці інформації або залучення нових технологічних рішень надає цьому методу перспективи розвитку. Насамперед, їх встановлено за такими напрямками:

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Основні наукові і практичні результати роботи:

1. Проведено детальний аналіз сучасних методів і тенденцій у сфері планування транспортних мереж, а також програмних засобів, на яких вони реалізуються. Одержані висновки дозволили виявити перспективний оптимізаційний метод, який досі не використовувався для задач планування нових транспортних мереж. Використання функціональних можливостей ГІС, як інструментарію, дозволило з усією повнотою забезпечити просторову інформацію про чинники та умови місцевості необхідні для моделювання цим методом.

2. Розроблено геопросторові моделі засновані на загальнодоступних даних. Це дозволить проектним організаціям суттєво заощаджувати на етапі попередніх вишукувань проходження оптимального та конкурентних варіантів напрямку траси. Розкрито джерела просторової інформації, їх характеристики та способи формування у вигляд, придатний для функціонування мурашиного методу. Оцінено точність глобальних висотних даних, як одного з ключових елементів вихідних даних мурашиного методу для території Чернівецької області.

3. Модифіковано Max-Min метод геоінформаційної мультиагентної оптимізації. В результаті, можливо досягати підвищення ефективності планування нових оптимальних напрямків дорожньо-транспортних мереж.

4. З'ясовано просторову та часову складність методу, а також вплив факторів параметрів на одержуваний результат напрямку трасованого маршруту. Таким чином, стало можливим планування необхідних затрат часу, обчислювальних ресурсів та налаштувань параметрів для одержання оптимального результату.

5. Проведено експериментальні дослідження на різних за природними умовами місцевостях. Встановлено особливі умови для важкодоступних місцевостей (гірський рельєф, висока лісистість, значна густота річкової мережі і т. ін.). Таким чином, доведено можливість використання означеного методу для аналогічних за умовами територій України.

6. Запропоновано рекомендаційні напрямки подальшої модифікації геоінформаційної мультиагентної оптимізації планування розвитку дорожньо-транспортної мережі, спрямовані на автоматизацію трудомістких операцій та підвищення результативності.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у наукових виданнях, які включені до наукометричних баз:

1. Hutsul T. Comparative accuracy assessment of global DTM and DTM generated from Soviet topographic maps for the purposes of road planning / T. Hutsul, Y. Smirnov // *Geodesy and Cartography*. – Vilnius: VGTU Journals, – 2017. – Volume 43(4). – p. 173 – 181.

Статті у наукових фахових виданнях України:

2. Гуцул Т.В. Тенденції використання сучасних засобів ГІС та САПР у проектуванні доріг / Т.В. Гуцул // *Вісник геодезії та картографії*. – К.: ДНВП «Картографія», 2015. – № 5-6 (98-99). – С. 57 – 61.

3. Гуцул Т.В. Огляд існуючих методів мультиагентної оптимізації / Т.В. Гуцул // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2016. – № 60. – С. 99 – 105.

4. Гуцул Т.В. Мультиагентна оптимізація планування потоків дорожньої мережі: особливості мурашиного алгоритму / Т. В. Гуцул // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2016. – № 62, Ч. 1. – С. 179 – 185.

5. Гуцул Т.В. Прикладні аспекти програмно-апаратної реалізації методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації планування транспортних потоків дорожньої мережі / Т.В. Гуцул // Інженерна геодезія. – К.: КНУБА, 2018 – №65. – С. 114 – 125.

6. Гуцул Т.В. Аналіз продуктивності та особливих умов функціонування методу геоінформаційної мультиагентної оптимізації планування транспортних потоків дорожньої мережі / Т. В. Гуцул // Містобудування та територіальне планування. – К.: КНУБА, 2018. – № 68. – С. 689 – 705.

Тези у збірниках матеріалів конференцій

7. Гуцул Т.В. Прикладні аспекти автоматизації процесу дешифрування об'єктів забудови / Т. В. Гуцул // Збірник наукових праць Всеукраїнської конференції з міжнародною участю «Молоді науковці – географічній науці» (23-24 листопада 2012 року). – К.: Обрії, 2012. – Вип. 8 – С. 188 – 189.

8. Гуцул Т.В. Технічні аспекти створення геопросторової бази даних об'єктів адміністративно-територіального устрою України / Т. В. Гуцул, О. В. Писаренко // Збірник наукових праць XIII міжнародної наукової міждисциплінарної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Шевченківська весна» (2-3 квітня 2015 року). – К.: Прінт-Сервіс, 2015. – Вип. XIII. – С. 61 – 63.

9. Гуцул Т. В. Можливість застосування геоінформаційних технологій в реалізації мультиагентного методу планування доріг / Т. В. Гуцул // Матеріали міжнародної наукової конференції «Від географії до географічного українознавства: еволюція освітньо-наукових ідей та пошуків (до 140-річчя започаткування географії у Чернівецькому національному університеті ім. Ю. Федьковича)» (11-13 жовтня 2016 року). – Чернівці: Чернівецький нац. ун-т, 2016. – С. 190 – 191.

10. Гуцул Т. В. Можливості геоінформаційного аналізу в дослідженнях стану геодезичного забезпечення території України / Т. В. Гуцул // Збірник тез доповідей другої міжнародної науково-технічної конференції «Геопростір 2016» (27-29 жовтня 2016 року). – К.: КНУБА, 2016. – С. 20 – 23.

11. Гуцул Т. В. Геоінформаційна мультиагентна оптимізація планування потоків дорожньої мережі: особливості мурашиного алгоритму / Т. В. Гуцул // Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-практичної конференції «Молоді науковці – географічній науці» (16-17 листопада 2016 року). – К., 2016. – Вип. XII. – С. 47 – 49.

Статті, які додатково відображають результати дисертаційного дослідження

12. Гуцул Т. В. Дешифрування об'єктів забудови для цілей моніторингу атмосфери урбанізованих територій / Т. В. Гуцул // Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. – Івано-Франківськ: Симфонія форте, 2013. – № 1(7). – С. 131 – 136.

13. Гуцул Т. В. Можливості геоінформаційного аналізу в дослідженнях стану геодезичного забезпечення території України для потреб дорожньої галузі / Т. В. Гуцул, О. В. Писаренко // Інженерна геодезія. – К.: КНУБА, 2017. – № 64. – С. 77 – 88.

АНОТАЦІЯ

Гуцул Т. В. Геоінформаційна мультиагентна оптимізація планування розвитку дорожньо-транспортної мережі (на прикладі території Чернівецької області). – *Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.*

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.24.01 – «Геодезія, фотограмметрія та картографія». – Київський національний університет будівництва і архітектури, МОН України, Київ, 2020.

У дисертаційній роботі виконано дослідження розвитку дорожньо-транспортних мереж з використанням метаевристичного мурашиного методу оптимізації на основі ряду геоінформаційних даних. Експериментально встановлено параметри й особливості поведінки досліджуваного методу при різних умовах та обсягах вхідних даних. Пояснено механізм обробки результатів моделювання та візуалізації їх у традиційному вигляді. На прикладі рекомендаційних схем запропоновано оптимальні шляхи розвитку дорожньо-транспортної мережі Чернівецької області на перспективу та окреслено можливості прикладного застосування даного методу в сфері дорожнього планування.

Результатом проведеного дисертаційного дослідження стала модифікація Max-Min методу мультиагентної оптимізації мурашиної системи для трасування основного та конкурентних варіантів дорожньо-транспортних мереж, що спроможна формулювати різноманітні варіанти проходження оптимальних альтернативних шляхів між заданими населеними пунктами.

Ключові слова: агент, геоінформаційні системи, дорожнє проектування, маршрут, мурашиний метод, оптимізація, транспортна мережа.

АННОТАЦИЯ

Гуцул Т.В. Геоинформационная мультиагентная оптимизация планирования развития дорожно-транспортной сети (на примере территории Черновицкой области). – *Квалификационная научная работа на правах рукописи.*

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.24.01 – «Геодезия, фотограмметрия и картография». – Киевский национальный университет строительства и архитектуры, МОН Украины, Киев, 2020.

В диссертационной работе выполнено исследование развития дорожно-транспортных сетей с использованием метаэвристического муравьиного метода оптимизации на основе ряда геоинформационных данных. Экспериментально установлено параметры и особенности поведения исследованного метода при разных условиях и объемах исходных данных. Объяснено механизм обработки результатов моделирования и их визуализации в традиционном виде. На примере рекомендационных схем предложены оптимальные направления развития дорожно-транспортной сети Черновицкой области на перспективу.

Результатом проведенного диссертационного исследования стала модификация Max-Min метода мультиагентной оптимизации муравьиной системы для трассирования основного и конкурентного вариантов дорожно-транспортных систем, которая может формулировать разные варианты прохождения оптимальных альтернативных маршрутов между заданными населенными пунктами.

Ключевые слова: агент, геоинформационные системы, дорожное проектирование, маршрут, муравьиный метод, оптимизация, транспортная сеть.

ANNOTATION

Hutsul T. Geoinformation multi-agent optimization of road planning (using Chernivtsi region as an example). – *Qualification scientific work retaining manuscripts rights.*

Dissertation for obtaining the scientific degree of the candidate of technical sciences in the specialty 05.24.01 – “Geodesy, Photogrammetry and Cartography”. – Kyiv National University of Civil Engineering and Architecture, MES Ukraine, Kyiv, 2020.

The planning of transport streams using meta-heuristics ant colony optimization method on based on the number of geoinformation agents is under exploration in this dissertation. Foreign experience in using ant colony optimization algorithms is analyzed in solving optimization tasks. Modern stare of investigation is also checked. Earlier ants were used for graphs and the results of such discoveries demonstrated optimal solutions.

The existing requirements for planning the passing of the future route of the road network are determined. The sources of information for agents, the form of their representation for the mathematical model are substantiated. For practical verification of the hypothesis about the possibility of using the method of geoinformation multi-agent optimization in the planning of road networks, an appropriate software product has been developed.

The road transport network of Chernivtsi Region is a topical research object. Differentiation of terrain conditions from plain to mountain, presence of dense river network, considerable forest cover, high level of economic development of the territory require special approaches to optimization and planning of development of the road transport network. However, the obtained results can be interpreted for any other territory of Ukraine.

The directions of the future development of road transport networks have been clarified. The sources of information for the agents, the form of their representation for the mathematical model, are grounded. The practical test of the hypothesis regarding the possibility of using the method of geoinformation multiagent optimization in planning the development of road transport networks was carried out by the method of mathematical modeling.

The parameters and peculiarities of the behavior of the indicated method under the various conditions and volumes of the input data are experimentally determined. The mechanism of processing the results of simulation and visualization of them in the traditional way is explained. On the example of the recommendations schemes the optimal ways of development of the road network of Chernivtsi region for the future are proposed and the possibilities of application of this method in the sphere of road planning are outlined.

The result of the dissertation was a modification of the Max-Min method of multiagent optimization of the ant system for tracing the main and competitive variants of road transport networks, which is able to formulate various variants of passing optimal alternative paths between specified settlements.

Keywords: agent, geoinformation system, road planning, route, ant colony, optimization, transport network.

Підписано до друку 28.02.2020. Папір офсетний. Формат 60x84/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Зам. № 21. Тираж 100 прим.
Виготівник: Яворський С. Н.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ЧЦ №18 від 17.03.2009 р.
58000, м. Чернівці, вул. І. Франка, 20, оф.18, тел. 099 73 22 544

