

АНАЛІЗ ДВОРІВНЕВИХ УРБОГЕОСИСТЕМ ЧЕРЕЗ ЗАСОБИ ГІС

В статті подається концептуальний підхід щодо моделювання, аналізу і візуалізації дворівневих урбогеосистем (УГС) в середовищі ГІС. Виокремлюються два рівня урбогеосистем: екстернальна УГС, як сукупність окремих міст, котрій притаманні емерджентні властивості, та інтернальна УГС – сукупність частин одного міста з їх усіма різноманітними зв'язками. Отримала подальший розвиток авторська концепція про те, що урбаністичну систему можна моделювати через три сутності: сукупність дискретних (точкових) об'єктів, що подають суспільно-географічні та економічні характеристики окремих населених пунктів; сукупність лінійних об'єктів, що визначають взаємодії між окремими населеними пунктами; та сукупність сфер, які описують території радіального впливу даного міста на прилеглі до цих територій ділянки іншого типу землекористування. Наводиться приклад регіональної імплементації відповідної ГІС-моделі екстернальної урбогеосистеми на підставі релевантних суспільно-географічних даних, що описують атрибутивні характеристики урбанізованих територій. Коротко розглядаються окремі складові поданого підходу, ГІС-інтерфейс та функціональність авторського спеціалізованого програмного забезпечення щодо аналізу інтернальних урбогеосистем на підставі LiDAR-технології дистанційного зондування.

Ключові слова: урбаністичні дослідження, два рівня урбогеосистем, екстернальна та інтернальна УГС, предметна «гравітаційна» модель, геоінформаційна система, інтерфейс та функціональність програмного забезпечення ГІС, LiDAR-технологія.

С.В. Костріков, А.С. Чуєв. АНАЛИЗ ДВУХУРОВНЕВЫХ УРБОГЕОСИСТЕМ С ПОМОЩЬЮ ИНСТРУМЕНТОВ ГИС. Стаття посвящена концептуальному підходу к моделированию, анализу и визуализации двухуровневых урбогеосистем (УГС) в среде ГИС. Выделяются два уровня урбогеосистем: экстернальная УГС, как совокупность отдельных городов, которой присущи эмерджентные свойства, и кроме того – интернальная УГС – совокупность отдельных частей одного города со всеми их разнообразными связями. Получила дальнейшее развитие авторская концепция о том, что урбогеосистему можно моделировать с помощью трех сущностей: совокупности дискретных (точечных) объектов, которые представляют социально-географические и экономические характеристики отдельных населенных пунктов; совокупности линейных объектов - они определяют взаимодействия между этими населенными пунктами; и совокупности сфер, которые описывают радиальное влияние города на близлежащие по отношению к урбанизированным территориям участки иного характера землепользования. Приводится пример региональной имплементации соответствующей ГИС-модели экстернальной УГС на основе релевантных социально-географических данных, которые описывают атрибутивные характеристики урбанизированных территорий. Коротко рассматриваются отдельные составляющие представленного подхода, ГИС-интерфейс и функциональность специализированного программного обеспечения для анализа интернальных урбогеосистем на основе LiDAR-технологии дистанционного зондирования.

Ключевые слова: урбаністичні дослідження, два рівня урбогеосистем, екстернальна та інтернальна УГС, предметна «гравітаційна» модель, геоінформаційна система, інтерфейс та функціональність програмного забезпечення ГІС, LiDAR-технологія.

Вступ до проблеми. Швидкий розвиток урбанізації в більшості країн світу обумовлює ту обставину, що процедури дослідження урбогеосистем відповідно стають все більш складними. Це обумовлюється тією обставиною, що, по-перше, кількість населених пунктів, що відповідають категорії «місто», і загальні площі урбанізованих територій збільшуються, зокрема в країнах «третього світу» майже по експоненті. По-друге, через швидкий розвиток

засобів міжміського транспортного сполучення, іншої міжміської інфраструктури та інформаційної комунікації значно ускладнюються різноманітні зв'язки між відповідними населеними пунктами.

Насправді, світова історія досліджень урбаністичних систем є значно довшою, аніж це загально вважається у вітчизняній науковій спіль-

ноті. Обґрунтовані результати щодо досліджень ієрархічної забудови, господарської спеціалізації і просторової сумісності окремих структурованих частин великих міст або окремих населених пунктів у сукупності регіонально зв'язаних міст були опубліковані німецькими економістами і французькими економіко-географами ще у дев'ятнадцятому – на початку двадцятого сторіччя (Й. Коль, 1841; Р. Ренауд, 1841; О. Реклюс, 1906; П. Левасер, 1909).

Револьюційним кроком в урбаністичних дослідженнях першої половини минулого сторіччя стала публікація у 1933 р. «теорії центральних місцезнаходжень» В. Кришталера [21]. Головна ідея останньої полягає в тому, що більш верифікована і ефективна економіка працює саме у великих містах через загальноекономічний закон зниження накладних витрат по мірі збільшення

масштабу виробництва / інфраструктури. Цей масштаб цілком визначає і просторову насиченість певної території унікальними товарами / сервісами, коли, наприклад, симфонічний оркестр або міжбанківська біржа можуть бути знайдені лише в межах великої урбосистеми, а торгові точки або автозаправки – в межах будь-якої. Відповідно, великі урбаністичні системи мають тренд до ринку з різноманітною товарною насиченістю, а малі – з обмеженою.

Зрозумілим чином, невеличкі населені пункти знаходяться у зоні ринкового впливу великих міст, і утворюється *стала системна урбаністична ієрархія*, якщо в межах великого міста виробляються / надаються всі товари / сервіси, які також виробляються в маленьких містах, а в додаток - і деякі інші. Крім того, зрозуміло, що внаслідок вказаного різні системні елементи насичують різні частини урбаністичного сегменту географічного простору. Це є один із ключових факторів утворення емергентних властивостей геосистеми, якщо таку визначати в межах окремого міста або відособленої сукупності міст.

Протягом декількох останніх десятиріч підходи, методології і методики аналізу урбаністичних систем отримали подальший розвиток. Однак, замість простого підрахунку кількості об'єктів, які складають урбосистему, з їх подальшим одновимірним статичним обчисленням дослідники зараз скоріше застосовують факторний або кластерний аналіз атрибутивних характеристик великого і малого міста. Замість застосування класичної «гравітаційної моделі» для визначення зв'язків та взаємодії одного та іншого міста зараз, скоріше за все, у залежності від предметної спрямованості такого дослідження буде застосовуватися відома «ентропійна модель». Характерною рисою урбаністичних досліджень останніх років є також надання уваги не тільки окремому місту або сукупності міст, які складають, урбосистему, але і системно утворюючим особливостям *регіону*, в якому ці населені пункти розташовані.

Вже майже три десятиріччя ГІС-технології та системи застосовуються для дослідження і аналізу урбогеосистем. Зокрема, в предметній галузі розгляду *урбогеосистем* і визначення морфології/динаміки архітектурних змін у забудові певного населеного пункту доцільно вважати ключовим визначення *патернів* просторового розповсюдження архітектури форм та міської інфраструктури. В цьому аспекті зрозуміло, що великі обсяги первинних і вторинних атрибутивних даних щодо урбосистем без застосування ГІС-засобів важко обробляти та майже неможливо предметно аналізувати.

Короткий огляд результатів попередніх досліджень. Різні публікації в рамках цієї предметної галузі робили наголос на різних її аспектах, що підкреслювали перевагу вивчення великих населених пунктів, як системних утворень. Загальноновизнаним вважається той методологічний аспект, в якому поєднуються всі підходи, що розглядають різноманітні просторові взаємозв'язки між окремими містами в їх відособленій сукупності або між структурними частинами окремого міста [19].

Аналізуючи, на нашу думку, одну з найсуттєвіших в останні роки узагальнюючих монографій із урбаністичних досліджень [9], можна визначити наступні відмінності нещодавнього і сучасного періодів цих досліджень у порівнянні з періодом їх становлення, на який ми коротко посилаємося у попередній рубриці статті:

- Рамки системних досліджень у предметній галузі урбаністики значно розширилися за рахунок того, що розглядатися стали не тільки урбосистема, як сукупність міст, але і природно-антропогенне довкілля, в якому ця сукупність функціонує. Ключовим предметом сучасних досліджень в цій галузі стають різноманітні взаємозв'язки між *урбосистемою* і *регіоном* (або регіонами), в якому вона розташована. Зокрема, виокремлення таких зв'язків має стати головною метою сучасного регіонаознавства. Релевантним прикладом можна вважати відому концепцію «міста-ворот», відповідно якій певні населені пункти функціонують у якості деяких «точок трансляції», що поєднують даний регіон із зовнішнім світом [8]. Відповідно цій концепції, певні урбанізовані території можуть навіть виступати, як «національні міста-ворота», що поєднують економіку цієї країни з глобальною економічною системою світу.

- Нещодавній і сучасний періоди урбаністичних досліджень підкреслили привабливість вивчення саме *верхнього сегменту* ієрархії урбосистем - великого міста - у той час, коли період становлення урбаністики відрізнявся переважним вивченням *нижнього сегменту* – невеличких міст [14]. Феномен глобалізації останніх двох десятиліть, крім всього іншого, впровадив таку дефініцію як *глобальне місто* [18].

- Значна зміна відбулася в розумінні економічної ролі окремих елементів урбосистеми. Міста в рамках домінантної у минулому «теорії центральних місцеположень» розглядалися виключно як джерела товарів та сервісів, що грають ключову роль у територіальному розподілі *споживання*. Поступово елементи урбосистеми стали розглядатися як джерела *виробництва*, тобто місцеположення, що здатні виробляти товари та послуги. Достатнє число публікацій було

присвячене загальній економічній структурі урбосистем з наголосом на особливу функціональну роль певних урбанізованих територій [12].

• Кінець кінцем, головною відмінністю сучасного періоду урбаністичних досліджень на системній основі є та, що на відміну від минулого, розглядається скоріше *динамічна урбосистема*, аніж статична. Традиційні дослідницькі рамки «теорії центральних місцезнаходжень» формувалися на домінантному принципі *стабільності урбосистеми* в той час, коли зрозуміло, що елементи урбосистеми за суттю не можуть утворювати стабільну сукупність – вони поступово або раптово завжди змінюються у часі [11].

Інноваційним рішенням сучасного моделювання і аналізу урбаністичних систем також є застосування технології дистанційного лазерного зондування *LiDAR (Light Induced Detection and Ranging –англ.)*, через яку і отримують найбільші масиви первинних даних для забезпечення інформаційного наповнення вказаних моделювання і аналізу. Застосування *LiDAR-систем* є дуже складною предметною галуззю, що передбачає практичне впровадження саме через ГІС-засоби. Результатом застосування цієї технології є створення дуже точних цифрових моделей рельєфу (ЦМР, *DEM – англ.*) у вигляді матриць надвисокої роздільної здатності завдяки спеціальним засобам програмно-апаратного забезпечення [17, 20].

Головною метою нашої статті є подання *геоінформаційної моделі дворівневих урбогеосистем*, реалізованої як в модульних додатках повноформатної ГІС-платформи – *ArcGIS*, так і в авторському програмному забезпеченні ГІС. Останнє було спеціально розроблене для урбаністичного аналізу, передбачало обробку і аналіз первинних даних, одержаних через *LiDAR-технологію* дистанційного зондування [4, 5].

Виклад основного матеріалу. *Поняття урбогеосистеми.* Свого часу, оцінюючи спектр можливих ГІС-застосувань у суспільно-економічній географії, один із авторів цієї статті підкреслював, що ряд відповідних предметних рішень є дуже широким, а число таких різноманітних застосувань має зростати майже по експоненті [15]. Окремим предметним застосуванням треба вважати аналіз просторової структури і функціональності урбосистем. Таким чином, певна ГІС-платформа виявиться не тільки ефективним інструментом аналізу просторових особливостей розташування системних елементів структури окремого міста або зв'язаної сукупності міст, але і засобом дослідження і оновлення всього спектру суспільно-географічних атрибутів окремого міста [7].

Відповідно існуючому в західній суспільно-географічній літературі визначенню *урбосистема* є сукупністю населених пунктів певного рангу в даному регіоні, причому такою сукупністю об'єктів, яка демонструє виражені емерджентні властивості [10]. Останні обумовлюються зв'язками і відношеннями між складовими урбосистеми, а модель урбосистеми застосовується для аналізу та прогнозу просторових варіацій в розподілі її елементів. З другого боку, деякі російські дослідники переважно в останні два десятиліття використовують поняття *урбоєкосистеми* [1-3]. Урбоєкосистема розуміється як «...пространственно-ограниченная природно-техногенная система, сложный комплекс взаимосвязанных обменом вещества и энергии...» [3, с. 17]. З цього визначення випливає, що урбоєкосистема є штучно створеним і підтримуваним людиною середовищем, наприклад, різнорангові міста та інші урбанізовані території. Крім того, *урбоєкосистема* на відміну від *урбосистеми* робить наголос на розгляді не стільки системи декількох міст, скільки на вивченні окремого міста як системної сутності, розташованої у певному *екстенції географічного простору*.

На підставі цих двох дефініцій (понять «урбосистема» і «урбоєкосистема») доцільно зробити ще одну із ряду відповідного понятійного апарату – дефініцію *урбогеосистеми*. *Це така, що знаходиться у певному екстенції географічного простору, нестала природно-антропогенна система. Вона є взаємозв'язаною сукупністю архітектурно-будівельних об'єктів та різко порушених природничих екосистем, які колись існували на території певного міста.*

Концептуальна алгоритмічна послідовність дослідження урбогеосистем (УГС). У вступній рубриці до цієї статті ми вже підкреслювали, яким надважким завданням було б дослідження урбогеосистеми без застосування автоматизованих обчислювальних систем, зокрема, засобів ГІС. Уявимо, що необхідно проаналізувати всі системні зв'язки між, наприклад, сукупністю 150 різнорангових міст певної території. У такому разі треба побудувати *розрахункову матрицю перехресних сполучень 150 * 150* і обрахувати всі відповідні тренди та дев'яти.

Можна собі уявити, яку матрицю сполучень треба побудувати, щоб виокремити, так звані, *вузлові міста*, що утворюють функціональні урбогеосистеми лише в межах південного сходу США. Подібне питання ілюструється *ГІС-шарами міст і штатів*, завантаженими в середовище програмного забезпечення *ArcGIS* (рис. 1):

Раніше нами вже доводилося, що урбаністичну систему можна моделювати через три нас-

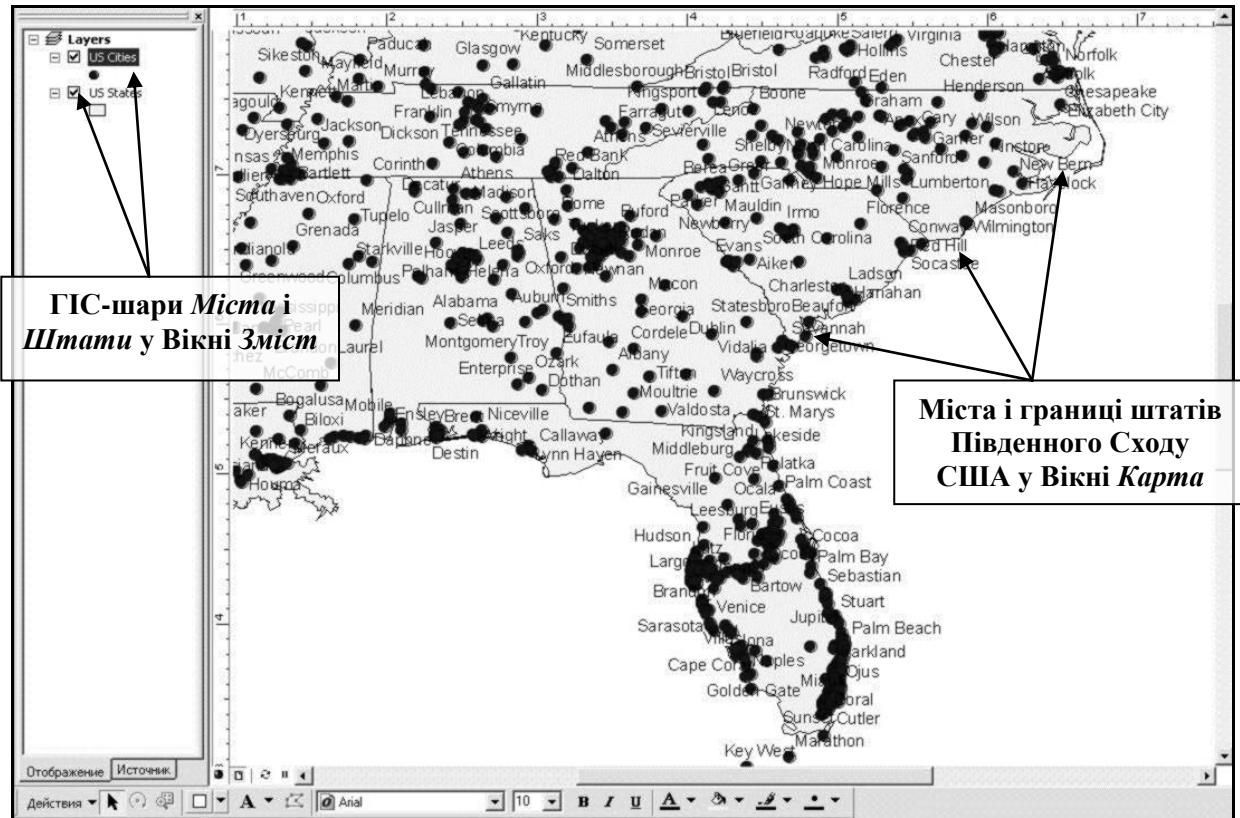


Рис. 1. Вузлові міста, що утворюють функціональні урбогеосистеми на Північному Сході США. Ілюстрація із інтерфейсу ArcGIS

тупні сутності:

- Сукупність дискретних (точкових) об'єктів, що подають суспільно-географічні та економічні властивості окремих населених пунктів;
- Сукупність лінійних об'єктів, що визначають взаємодії між окремими населеними пунктами;
- Сукупність сфер, які описують території радіального впливу даного міста на прилеглі до цих територій ділянки іншого типу землекористування [6].

Узагальнюючи, можна стверджувати, що при ГІС-аналізі кожне окреме місто можна подавати як точковий об'єкт, а парний зв'язок між двома містами – як лінію, що їх поєднує. Певна конфігурація таких точок і ліній складає предметний зміст урбогеосистеми, а точкові і лінійні об'єкти приймаються базовими просторовими елементами урбогеосистеми.

Приймаючи до уваги все, викладене вище, легко встановити, що сутності, які поєднують три класи об'єктів (точки, лінії, сферичні площі) повністю співпадають з *графічними примітивами*, які зазвичай складають основу векторного моделювання в середовищі ГІС. Н а нашу думку, саме ця обставина забезпечує різноманітні можливості для подальших аналізу і моделювання, і

має вважатися ключовою умовою дослідження урбогеосистем через засоби ГІС.

Однак, подібне дослідження можливе лише за умови наявності відповідних первинних даних. Саме ця початкова інформація, як предмет подальшої обробки, дозволяє встановити вказану вище «сукупність лінійних об'єктів» - прямих і зворотних зв'язків між системними елементами, які, власне, і дозволяють встановити емерджентні властивості УГС. Відповідно, при впровадженні ГІС-аналізу первинні дані приймаються *атрибутами урбогеосистеми*.

Вважається, що існує два загальних способи ідентифікації вказаних лінійних об'єктів [13].

Це, *по-перше*, такий відомий тип даних, як *O-D дані (origin – destination data –англ.)*, що можна визначити «даними, які характеризують парний зв'язок між містами в їхній сукупності». Вони є загальним стандартом даних, що накопичуються, про міжмуніципальні зв'язки між окремими містами щодо взаємного руху людей, товарів, послуг, грошей і так далі. Зрозуміло, що саме на підставі *O-D* даних відносно легко сформулювати атрибутивні дані щодо певного населеного пункту. Вони в стандартних форматах баз даних будуть зберігатися в муніципальних БД, і при необхідності можуть бути отримані на комерційній основі. Однак, головною тут є принципова можливість прямого відтворення ліній-

них зв'язків між містами безпосередньо на підставі *O-D* даних без додаткового моделювання.

По-друге, це існуючі відкриті дані щодо певних характеристик міста, такі, які мають існувати у відкритому доступі. Це можуть бути дані обласних державних управлінь статистики, значну кількість яких можна отримати безкоштовно. Такі дані стосуються переважно загальних суспільно-географічних показників певного населеного пункту. Вони дають уявлення про просторові взаємозв'язки між окремими містами (випадок *екстернальної урбогеосистеми*) або між окремими частинами одного міста (випадок *інтернальної урбогеосистеми*) у вигляді вже зазначеного вище руху людей, товарів, фінансів і т.д. Існуючі відкриті дані, які вдається отримати, ГІС-фахівець, як правило, приписує до певних *точкових об'єктів*. Останніми будуть окремі міста у випадку *екстернальної УГС* або частини (наприклад, окремі адміністративні райони) одного населеного пункту. Через такі атрибутивні характеристики вказаних точкових об'єктів і мо-

делюються лінійні зв'язки при проведенні аналізу УГС.

В рамках викладеного концептуального підходу одним із авторів цієї статті була запропонована повна алгоритмічна послідовність дослідження УГС через ГІС-засоби (рис. 2). Така алгоритмічна послідовність переводить концепцію дослідження і аналізу УГС через ГІС-засоби в практичну площину і подає відповідну ГІС-модель *дворівневих УГС – екстернальних та інтернальних*.

Геоінформаційна модель дворівневих урбогеосистем. Методика побудови такої ГІС-моделі поєднує етапи та стадії необхідних процедур. Ці процедури починаються із введення атрибутивних характеристик, якими можуть бути дані двох згаданих вище типів: або *O-D* дані (перший тип), або дані, зібрані під час міського моніторингу, в тому числі, наприклад – за допомогою технології лазерного дистанційного зондування *LiDAR*. Побудова ГІС-моделі продовжується впровадженням певної предметної моделі щодо урбаністичних досліджень.

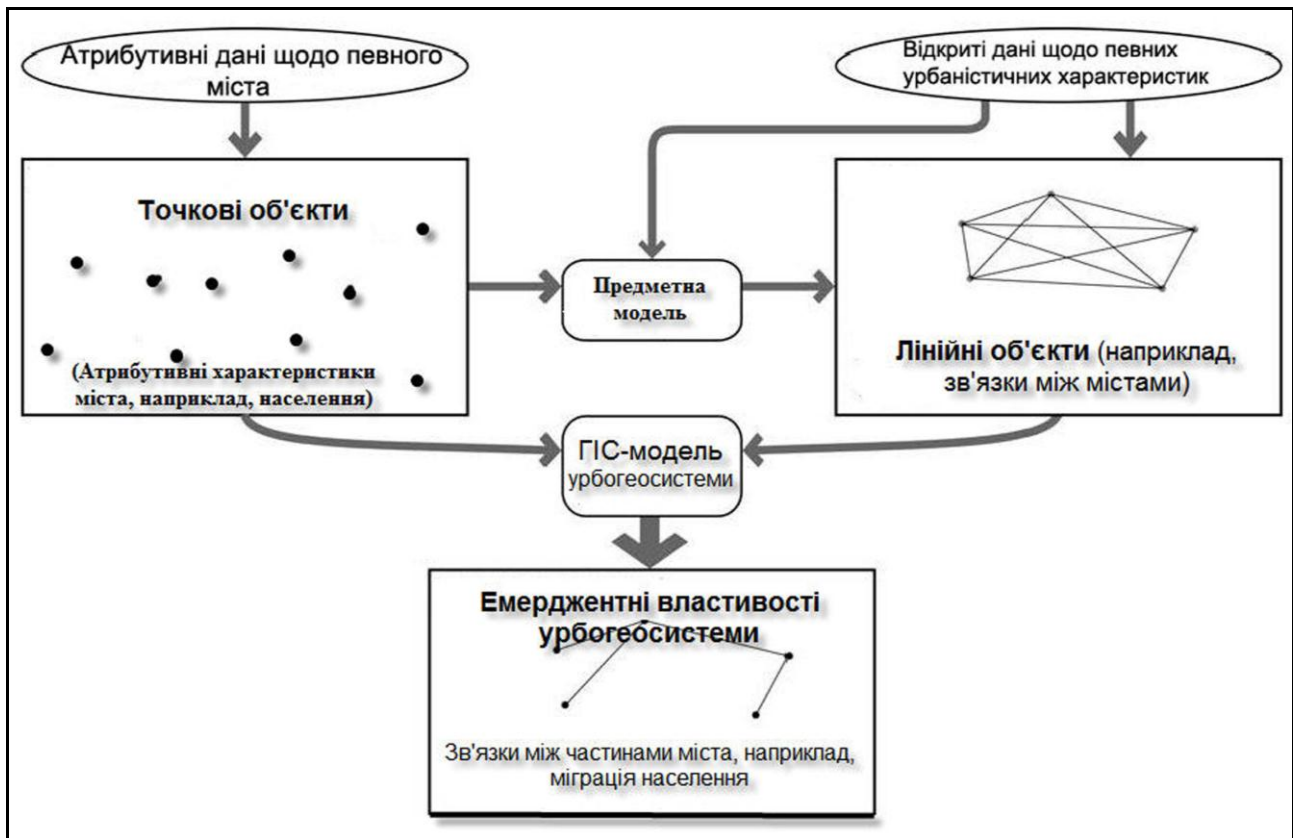


Рис. 2. Складові алгоритмічної послідовності дослідження УГС через засоби ГІС [5, с. 47]

В якості предметної моделі для урбаністичних досліджень доцільно обрати відому в географії і в економіці так звану «*гравітаційну модель*» (*gravity model* – англ.) [16], яка успішно використовувалася для аналізу ефективності зв'язків між кожною парою міст в їх окремій сукупності [13].

Застосування предметної (гравітаційної) моделі є ключовим кроком в побудові остаточної моделі УГС, яка визначить емерджентні властивості свого реального аналогу через відтворення як екстернальних, так і інтернальних зв'язків системних елементів. Таким зв'язкам і відношенням відповідає два рівня масштабування.

Саме останні обумовлюють необхідність побудови *дворівневої ГІС-моделі*.

Першому рівню цієї моделі відповідає блок *Лінійні об'єкти – Зв'язки між різними містами*. Другому рівню – блок *Емерджентні властивості окремої урбогеосистеми* - зв'язки між частинами одного міста, наприклад – міграція населення (див. рис. 2).

Блок лінійних об'єктів грає принципово важливу роль у всій алгоритмічній послідовності, оскільки саме в ньому має бути побудована інтерактивна структура **LINES**, що у подальшому буде візуалізувати результати ГІС-моделювання щодо екстернальної УГС. Наприклад, при наявності N міст (або N частин одного міста у випадку інтернальної УГС) приймається до уваги кількість просторових зв'язків, яка дорівнює $N * N$, і саме це число буде визначати кількість лінійних ГІС-об'єктів у вказаній інтерактивній структурі **LINES**.

Обрана предметна модель певним чином вирішує проблему нестачі інформації про інтерактивні зв'язки між містами в разі неповноти (або навіть повної відсутності) *O-D* даних, що, наприклад, для більшої частини території України. Суспільно-географічний інформаційний контент інтернет-ресурсів обласних управлінь статистики є вкрай неповним.

Таким чином, інформаційною основою реалізації на обох рівнях УГС поданої вище алгоритмічної послідовності є вказана «гравітаційна модель», для реалізації якої в нашому авторському програмному забезпеченні ГІС був обраний досить складний її варіант, первинно запропонований Г. Ду [13]. Ми спростили похідний модельний вираз до такого загального виду:

$$I_{m,n} = S_m P_{m,n} A_{m,n}, \quad (1)$$

з відношеннями

$$m \neq n, I_{m,m} = 0, m = 1, 2, \dots, N; n = 1, 2, \dots, N$$

де $I_{m,n}$ - формалізований показник інтерактивного *екстернального* зв'язку між населеними пунктами m та n (або характеристика *інтернального* зв'язку між двома частинами одного населеного пункту); S – масштабне значення даного міста (його ранг), що обумовлюється як розміром міста m , так і іншими показниками, наприклад, його промисловим потенціалом (або частини одного міста при дослідженні інтернального зв'язку); місто m апіорі приймається домінуючим в парному інтерактивному зв'язку в якості *міста-джерела* в протилежність другому місту цього парного зв'язку – *місту-приймачу*;

$P_{m,n}$ - показник повної імовірності факту наявності парних зв'язків від міста m до міста n по

всій даній сукупності міст (від одної частини міста до іншої в його межах); $A_{m,n}$ - агрегована характеристика соціально-економічних і природних умов, що сприяють або заважають ефективним зв'язкам між населеним пунктом m та населеним пунктом n ; N – загальне число населених пунктів в *екстернальній* урбогеосистемі або число частин (районів) одного населеного пункту – в *інтернальній*.

У випадку, коли ми будемо прикладну ГІС-модель УГС виключно на підставі лінійного рівняння (1) треба приймати до уваги її об'єктивні недоліки та обмеження і намагатися їх ліквідувати. В цьому аспекті треба мати на увазі, що із трьох модельних складових вказаного рівняння дві є достатньо проблемними.

По-перше, щодо ключової складової виразу (1) – характеристики масштабу міста S . Ми вважаємо, що найбільш об'єктивно його відбиває загальний показник чисельності населення, яке не зайняте в сільськогосподарській праці. Така характеристика є репрезентативною у випадку будь-якої спеціалізації даної урбанізованої території, незалежно від того на що зорієнтована економіка цього міста у першу чергу – на промислове виробництво або, наприклад, на надання різноманітних послуг. Причому, оцінювання макроекономічної значущості міста на підставі саме його трудового потенціалу, включаючи м'ягкую трудову міграцію, взагалі вважається одним із надійніших методів урбаністичних досліджень [23].

Інша складова - характеристика агрегованої імовірності інтерактивних зв'язків $P_{m,n}$ виявляється навіть ще більш проблемною модельною складовою. Цей параметр враховує патерни просторового розповсюдження тих факторів, які або сприяють, або запобігають екстернальним чи інтернальним зв'язкам в УГС. Ці фактори також корегують вказані зв'язки, наприклад, усуваючи зв'язок m, n на користь зв'язку m, o (m, n і o – окремі міста, *міста-джерела* і *міста-приймачі* - системні елементи, що утворюють екстернальну урбогеосистему). Якщо припустити, що такий патерн буде формуватися від кожного міста-джерела в напрямку кожного з його парних зв'язків до міста-приймача і буде враховувати фактори, що сприяють або запобігають зв'язкам між парою міст, то для модельного показника $P_{m,n}$ отримаємо наступний вираз, всі символи якого вже описані вище:

$$P_{m,n} = \sum_{o=n}^N \frac{P_n}{\sum_{m=1}^o P_m} \quad (m \neq n, o \geq n). \quad (2)$$

Таким чином, через рівняння (1)-(2) описується частина предметного змісту запропонованої нами ГІС-моделі дворівневих урбогеосистем. Однак, не випадково ми робимо наголос на тому, що через (1)-(2) описується лише *частина* такого модельного змісту, і нам необхідно подати додатковий формалізований опис ГІС-моделі.

Ми можемо далі формалізувати опис цілісності урбогеосистеми, якщо спробуємо описати всі зв'язки *від і до* між парами міст, і встановити тісноту залежності між двома містами $D_{m,n}$ через показник $I_{m,n}$, де m – домінуюче місто-джерело, а n – місто-приймач, через наступний вираз:

$$D_{m,n} = I_{m,n} + I_{n,m} \quad (m \neq n, D_{m,n} = 0) \quad (3)$$

У такому разі формалізованого апарату (1)-(3) вже вистачає для того, щоб встановити наступний індикативний показник певної «системної потужності» M (від дефініції *magnitude* – англ.) окремих міст, як системних елементів, в рамках екстернальної урбогеосистеми:

$$M_m = \sum_{n=1}^N D_{m,n} \quad (m \neq n). \quad (4)$$

Таким чином, розвинути методичну послідовність побудови ГІС-моделі екстернальних УГС можна подавати наступним чином:

По-перше, через (1)-(3), перебравши по черзі всі пари зв'язків у виокремленій УГС встановлюється найтісніший парний зв'язок для даного міста, де воно виступає містом-джерелом, тобто домінуючим містом у цій парі.

По-друге, всі міста із цієї УГС, які є домінуючими у своїх парах, проходять ранжування їх системної потужності через (4), як елементи даної виокремленої УГС.

По-третьє, через (1)-(4) встановлюються всі найтісніші зв'язки в рамках цієї УГС *від* міст меншої «системної потужності» *до* міст більшої «системної потужності». На цьому третьому кроці моделювання домінуючим в парі міст завжди приймається те, показник M якого є вищим.

По-четверте, серед всіх домінуючих міст, які встановлюються на кроках 1-3 і які на підставі загальних міркувань вважаються значущими для даної УГС, обираються, так звані, *вузлові міста* (див. рис. 1) через повторне застосування

виразу (4) вже тільки по сукупності домінуючих міст цієї УГС.

Імплементация регіональної моделі екстернальної урбогеосистеми. В розпорядженні авторів статті були унікальні *O-D* дані щодо екстернальної УГС, яка поєднує сукупність міст штату Флоріда (США). Цей інформаційний контент поєднував різні складові суспільно-географічної та економічної інформації щодо різноманітних зв'язків між переважною більшістю міст цього штату – від особливостей товарообігу і маятникової трудової міграції до показників навантаження міжміського телефонного зв'язку і загальної кількості дзвінків абонентів мобільних операторів.

ГІС-модель екстернальної урбогеосистеми штату Флоріда реалізовувалася авторами статті через програмні засоби *ArcGIS Developer Kit*, що підтримують такий предмет розробки, як *MS Component Object Model*, та через написання *VBA*-макросів. При створенні відповідних *шаблонів візуалізації* ми спиралися на близькі приклади, які існують у предметній галузі аналізу урбогеосистем [22].

Таким чином, створювалася програмна бібліотека, що візуалізувала в косметичному шарі середовища *ArcGIS* через різнокольорові лінійні елементи (які вимушено наводяться на монохромній ілюстрації нижче через додаткову символіку – рис. 3) результати просторового аналізу взаємозв'язків векторних точкових об'єктів – елементів урбогеосистеми.

Оскільки, як підкреслювалося вище, були наявні *O-D* дані саме по території штату Флоріда, в середовищі ГІС моделювалися найбільш значні інтерактивні зв'язки між містами саме цього штату. Так було встановлено, що вузловими або *нодальними* містами, які утворюють *модальний елемент УГС*, є м. Джексонвіль (*населення > 700 тис.*), міста Маямі і Тампа (*обидва з нас. > 300 тис*) і м. Орlando (*нас. > 200 тис*). Всі міста, до яких спрямовані вектори відповідної символіки є *підпорядкованими* цим чотирьом містам, які водночас є і домінуючими і модальними. Наприклад, різниця у населенні між містами Орlando і Тампа – майже 100 тис., однак, м. Тампа є містом підпорядкованим м. Орlando. Характерно, що столиця цього штату – м. Таллахасі (*нас. > 100 тис*) нодальним містом не визначається.

Намагаючись довести об'єктивність моделі, що формалізується виразами (1)-(4), ми підраховували лінійні коефіцієнти кореляції (*КК*) між загальним числом зв'язків, встановленим через нашу модель і таким об'єктивним показником як автомобільний вантажний трафік між обраною парою міст. Була побудована кореляційна мат-

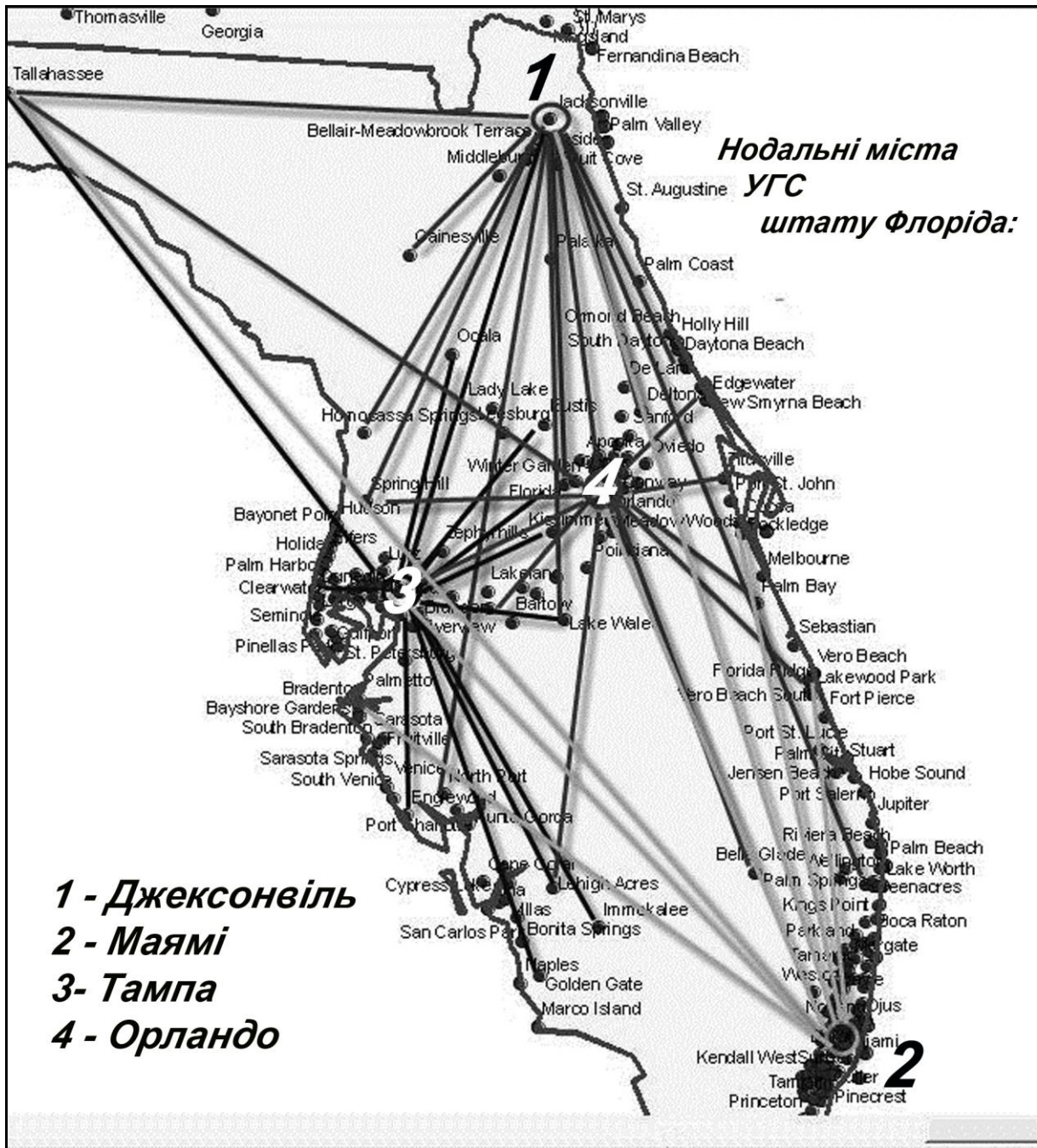
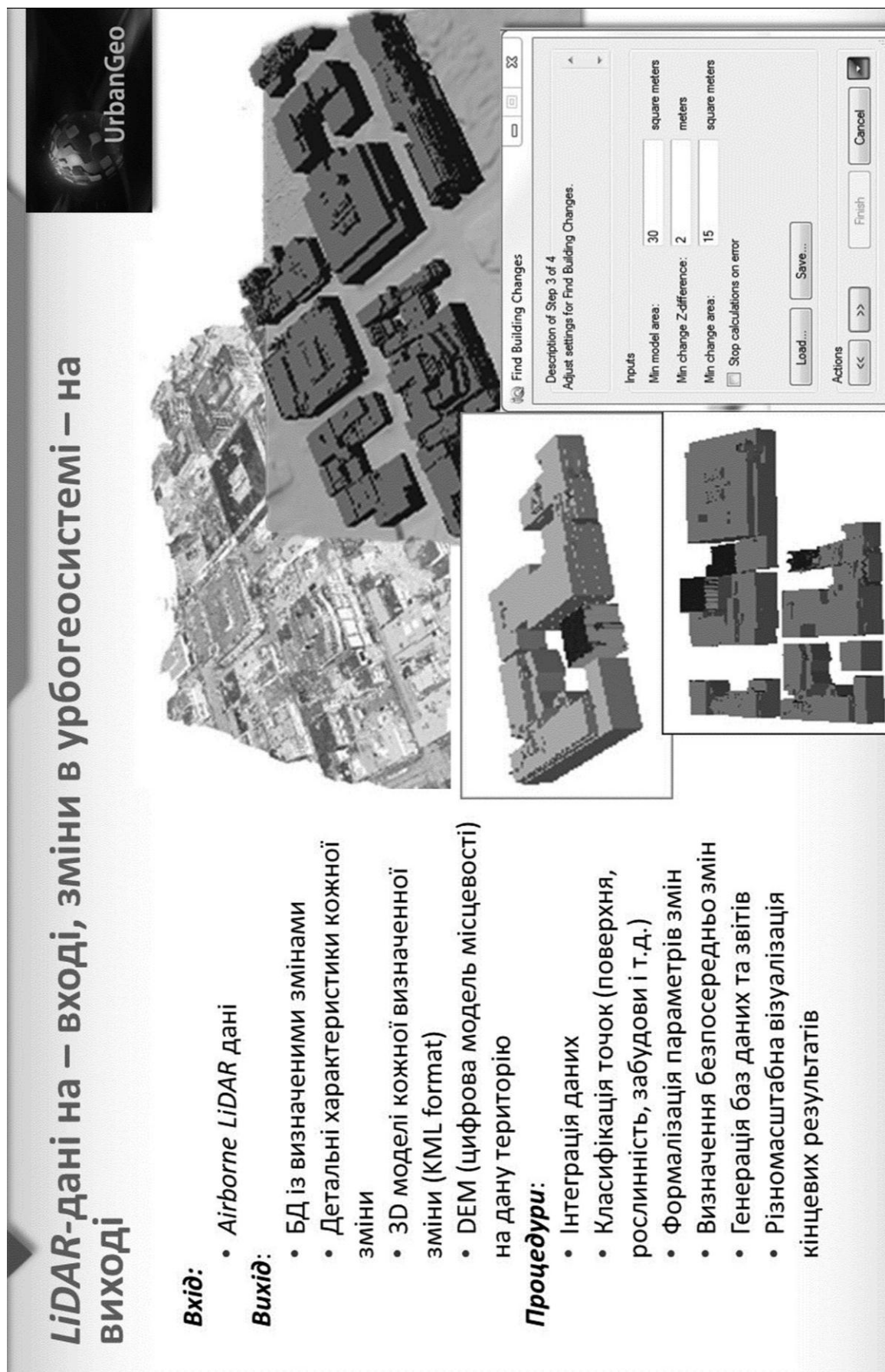


Рис. 3. Структура *LINES* вузлових міст екстернальної урбогеосистеми штату Флоріда, що візуалізована в косметичному шарі ГІС *ArcGIS*, складається із наступних нодальних елементів «домінантне місто – підпорядковане місто»: 1 – 4; 2 – 1; 2 – 3; 2 – 4; 3 – 1; 4 – 3

риця, і з'ясовано, що для статистичної сукупності факторної і результативної ознак вказаних чотирьох модальних міст *KK* дорівнює 0,872 із статистичним рівнем значущості в 1%. Така статистична перевірка є доказом того, що двофункціональна сукупність «предметна модель + ГІС-модель урбогеосистеми» (див. рис. 2) є достатньо надійним засобом дослідження екстернальної урбогеосистеми штату Флоріда. Наприклад, за цією модельною сукупністю головним нодальним містом штату визначається Маямі, а не значно більший за це місто по чисельності населення Джексонвіль.

Авторське програмне забезпечення для моделювання та аналізу інтернальних урбогеосистем. Автори цієї статті в рамках співробітництва з компанією FE GeoCloud (ПІ «Геоклауд») приймали безпосередню участь в розробці програмного забезпечення ГІС для урбаністичних досліджень. Через жорсткі нормативні рамки статті ми лише коротко охарактеризуємо функціональність та інтерфейс програмного забезпечення *TMUrbanGeo*, не розглядаючи більш-менш детально прикладів його практичного застосування (рис. 4).



LiDAR-дані на – вході, зміни в урбогеосистемі – на виході

Вхід:

- Airborne LiDAR дані

Вихід:

- БД із визначеними змінами
- Детальні характеристики кожної зміни
- 3D моделі кожної визначеної зміни (KML format)
- DEM (цифрова модель місцевості) на дану територію

Процедури:

- Інтеграція даних
- Класифікація точок (поверхня, рослини, забудова і т.д.)
- Формалізація параметрів змін
- Визначення безпосередньо змін
- Генерація баз даних та звітів
- Різномасштабна візуалізація кінцевих результатів

Рис. 4. Інтерфейс і функціональність авторського програмного забезпечення Urban Geo

Існуючий ринковий попит на відповідний програмний продукт і виклики, що цей попит супроводжують, обумовлюються:

- Великою кількістю швидко зростаючих населених пунктів, що функціонують як все більш і більш ускладнені урбогеосистеми;
- Необхідністю отримання високоточних цифрових моделей місцевості щодо менеджменту територій міст;
- Потребою в автоматизованих засобах огляду, аналізу та візуалізації повної інфраструктури міста, і особливо – необхідністю отримання кількісних та якісних характеристик, наприклад, архітектурних змін в морфології міста, що відбулися за певний проміжок часу.

Безпосередньо процедура урбаністичного аналізу через авторське програмне забезпечення, призначене для аналізу *інтернальних* урбогеосистем, починається із процедури класифікації на підставі «хмар точок» *LiDAR-даних* – виконання алгоритмів об'єднання точкових об'єктів з подібними змістовними значеннями та віднесення їх до певного класу (рис. 5):

- Програмне забезпечення приписує точки до певного класу елементів *інтернальної* УГС (наприклад, клас *ground (поверхня)*, клас *vegetation (рослинність)*, клас *buildings (забудови)*);
- Наступним кроком впроваджується тематичне картографування для наочної візуалізації результатів класифікації;
- Будь-який певний клас *LiDAR-точок* розміщується в окремий шар даних для наступного аналізу через роботу з пошаровою побудовою ГІС-карт.

Коли на вході програмного забезпечення *LiDAR-дані*, отримати зміни в урбогеосистемі можна через наступні процедури, що вказуються на попередній ілюстрації (див. рис. 4). Після впровадження вказаних процедур можна:

- Візуалізувати два рівня урбогеосистем у формі, яка обирається відповідно до цілей дослідження і завдань муніципального менеджменту, наприклад, розрахувати векторну інтерактивну структуру *LINES* для екстернальної УГС (див. рис. 3) і змодельовати динаміку морфологічних змін в архітектурній забудові міста для *інтернальної* УГС (рис. 6);
- Забезпечити наочну візуалізацію і ефективне подання похідних результатів аналізу даних, а також створення семантичних і топологічних моделей різноманітних даних щодо значних міст аж до великої агломерації;
- Інтегрувати в Єдиний Проект та у відповідну Базу Геоданих розподілені просторові дані

та іншу наявну інформацію щодо *інтернальних* УГС.

Якщо *O-D* дані, є ключовою вхідною інформацією щодо моделювання і аналізу екстернальних УГС (що і доводиться в попередній рубриці статті), то «хмари» *LiDAR-точок* грають саме таку роль в дослідженні *інтернальних* УГС.

Ми вважаємо, що задачі такого застосування *LiDAR-даних* і відповідні переваги, які можуть бути отримані, можна узагальнити наступним чином:

Задачі: безперервний моніторинг змін в *інтернальній* урбогеосистемі для інфраструктурного менеджменту територій великих міст; забезпечення місцевого самоврядування відповідною цифровою інформацією, зокрема ефективними тривимірними моделями, створеними на підставі *LiDAR-даних* (див. рис. 5);

автоматизована генерація і регулярне оновлення високоточних цифрових моделей місцевості для генеральних планів розвитку різноманітних міст;

Переваги: впроваджується виключно автоматизована процедура повної побудови цифрових моделей рельєфу, які можуть бути застосовані для різних муніципальних потреб; обробка надвеликих обсягів даних із наступною тривимірною візуалізацією: високі точність та роздільна здатність забезпечуються *LiDAR-даними*; геообробка виконується в режимі реального часу (години); застосовуються додаткові засоби просторового аналізу; результатом є високоточна локалізація змін в *інтернальній* УГС; забезпечується можливість відновлення процедур аналізу та моделювання.

Прикладом, на який ми вже посилалися вище, вирішення однієї із вказаних задач через застосування деяких із цих переваг є результат моделювання динаміки архітектурних змін в центральній частині м. Отава (*Downtown* – англ.) по високоточній цифровій моделі (рис. 6):

Висновки:

На першому рівні відповідної ГІС-моделі (екстернальна урбогеосистема) доцільно моделювати для подальшого аналізу векторну інтерактивну структуру *LINES* просторових зв'язків між елементами цієї УГС. Для цього необхідно застосовувати таку повноформатну ГІС-платформу, що підтримує можливість користувацької розробки модулів моделювання, через які вказана структура зв'язків тільки і може бути побудована.

- На другому модельному рівні (*інтернальна* УГС) можливо як аналізувати просторові зв'язки між виокремленими частинами одного міста, так і моделювати динаміку змін в архітектурній забудові цього населеного пункту. В ос-

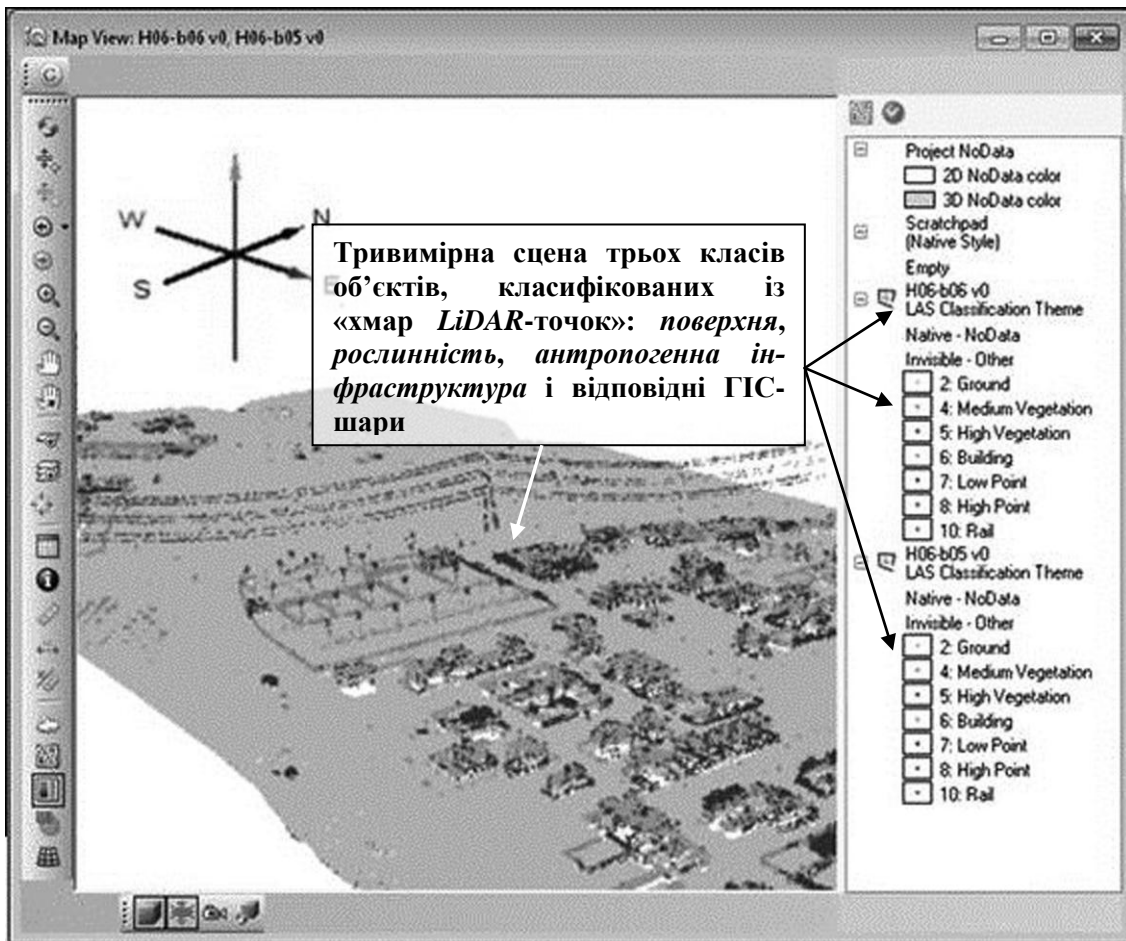


Рис. 5. Вікно карти програмного забезпечення *UrbanGeo*, в якому візуалізуються результати класифікації елементів інтернальної УГС

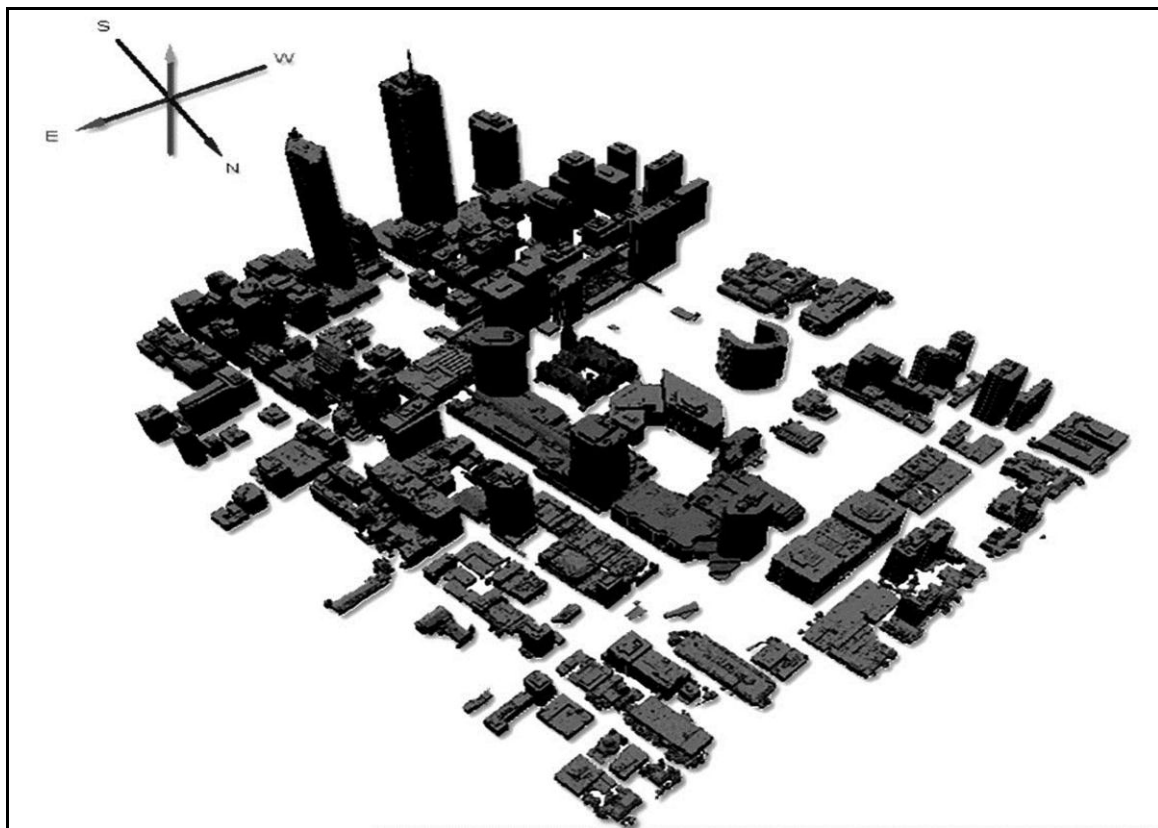


Рис. 6. Тривимірна візуалізація в програмному забезпеченні *UrbanGeo* динаміки архітектурних змін по частині інтернальної урбогеосистеми м. Отава (Канада)

танньому випадку доцільно застосовувати авторське програмне забезпечення TMUrbanGeo, яке підтримує достатньо ефективні аналітичні можливості ГІС щодо аналізу саме інтернальних урбогеосистем.

- Після виконання необхідних процедур геообробки, моделювання аналізу та візуалізації

результатів на обох рівнях доцільно організувати розрахований на багато користувачів доступ до видаленої просторової інформації великого обсягу, яка буде стосуватися просторових зв'язків, емерджентних властивостей і структурованих змін в урбогеосистемах.

Література

1. Битюкова В.Р. Социально-экологические проблемы развития городов России / В.Р. Битюкова. – М.: Едиториал УРСС, 2004. – 448 с.
2. Исаченко А.Г. Экологическая география России / А.Г. Исаченко. СПб: Изд-во С.-Пб. ун-та., 2001. – 328 с.
3. Город – экосистема / Э.А.Лихачева, Д.А.Тимофеев, М.П. Жидков и др. – М.: ИГРАН, 1996. – 336 с.
4. Костріков С.В. Геоінформаційне моделювання природно-антропогенного довкілля. Наукова монографія / С.В. Костріков // Харків: Вид-во ХНУ ім. В.Н. Каразіна. – 2014. – 484 с.
5. Костріков С.В. Програмне забезпечення ГІС для LiDAR-технології дистанційного зондування в цілях аналізу урбогеосистем / С.В. Костріков, Д.Л. Кулаков, К.Ю. Сегіда // Проблеми безперервної географічної освіти і картографії. – 2014. – Вип. 19. – С. 45–52.
6. Костріков С.В. Дворівнева ГІС-модель для аналізу урбогеосистем / С.В. Костріков, О.С. Чуєв // Регіон – 2015: Стратегія оптимального розвитку: Матеріали міжнародної науково-практичної конференції. – Харків, 2015. – С. 20–22.
7. Чуєв О.С. Оцінка через ГІС-заоби просторової диференціації благоустрою міста як функції урбогеосистеми (на прикладі м. Харків) / О.С. Чуєв, С.В. Костріков // Часопис соціально-економічної географії. – Вип. 18 (1) – Харків: Видавництво ХНУ, 2015. – С. 52–62.
8. Berkowitz A.R. Understanding Urban Ecosystems: A New Frontier for Science and Education / A.R. Berkowitz, C.H. Nilon, K.S. Hollweg (Editors). – New York: Springer-Verlag, 2005. – 523 p.
9. Boyce D. Forecasting Urban Travel: Past, Present and Future / D. Boyce, H. Williams. – Cheltenham – Northampton: EE Publishing, 2015. – 639 p.
10. Bourne L.S. Systems of Cities: Readings on Structure, Growth, and Policy / L.S. Bourne, J.W. Simmons (Editors). – Oxford: Oxford University Press, 1978. – 565 p.
11. Bourne L.S. Polarities of Structure and Change in Urban Systems: A Canadian Example / L.S. Bourne // Geojournal. – 1997. – Vol. 43. – P. 339–349.
12. Coffey W.J. Factors and Correlates of Employment Growth in the Canadian Urban System, 1971–1991 / W.J. Coffey, R.G. Shearmur // Growth and Change. – 1998. – Vol. 29. – P. 44–66.
13. Du G.Q. A Study on the relationship of regional urbanization and socio-economic structure in China / G.Q. Du // Annals of Japanese Association of Economical Geographers – 1997. – Vol. 43. P. 151–164 (in Japanese with English abstract).
14. Friedmann J. The world city hypothesis / J. Friedmann // Development and Change. – 1996. –Vol. 27. – No. 1. – P. 69–83.
15. Kostrikov S. Human geography with geographical information systems / С.В. Костріков, К.Ю. Сегіда // Часопис соціально-економічної географії. – Вип. 15 (2) – Харків: Видавництво ХНУ, 2013. – С. 39–47.
16. Olivero M. Dynamic gravity: endogenous country size and asset accumulation / M. Olivero, Y. Yotov // Canadian Journal of Economics. – 2012. – Vol. 45. – No. 1. – P. 64–92.
17. Romano M.E. Innovation in LiDAR processing technology / M. E. Romano // Photogrammetric Engineering Remote Sensing – 2004. – Vol. 70. – P. 1202–1206.
18. Sassen S. The Global City: New York, London, Tokyo / S. Sassen. – Princeton: Princeton University Press, 2001. – 480 p.
19. Simmons J.W. The organization of the urban system / J.W. Simmons, L.S. Bourne, J.W. Simmons (eds) // Systems of Cities: Readings on Structure, Growth, and Policy – Oxford: Oxford University Press, 1978. – P. 61–69.
20. Taylor G. Modelling and prediction of GPS availability with digital photogrammetry and LiDAR / G. Taylor, D. Kidner, K. Brundsdon // International Journal of Geographical Information Science. – 2007. Vol. 21. – No. 1 – P. 1–20.
21. Werlen B. Society, Action and Space / B. Werlen. – NY–London: Psychology Press, 2003. – 279 p.
22. Wong C Mapping policies and programmes: The use of GIS to communicate spatial relationships in England / C. Wong, M. Baker, B. Webb, S. Hincks, A. Schulze-Baing // Environment and Planning B: Planning & Design. – 2015. – Vol. 42, No.6. P. 1020–1039.
23. Zax J. When is a move a Migration? / J. Zax // Regional Science and Urban Economics – 1994. – Vol. 24. – P. 341–360.