

С. ДАНШИНА, С. АНДРЕЄВ, С. ГОРЕЛИК, А. НЕЧАУСОВ, А. ПРИЙМА

## ГЕОІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ДЛЯ ІНЖЕНЕРНО-ГЕОДЕЗИЧНИХ ВИШУКУВАНЬ У ПРОЦЕСІ МОДЕРНІЗАЦІЇ ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ УКРАЇНИ

**Предмет дослідження** – дистанційні методи інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації об'єктів залізничної інфраструктури України. **Метою роботи** є підвищення ефективності інженерно-геодезичних вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури України за допомогою впровадження сучасних технологій геоінформаційних систем. **Завдання:** проаналізувати загальний стан вітчизняної залізничної інфраструктури для визначення можливих напрямів її покращення; дослідити наявну нормативно-правову базу, що регламентує інженерно-геодезичні вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури в процесі їх модернізації; оцінити можливості сучасних ГІС-технологій у розв'язанні певних завдань вишукувань; формалізувати процеси польового та камерального етапів вишукувань; опрацювати розроблені функціональні моделі на практиці. **Результати.** Аналіз діяльності АТ "Українська залізниця" показує, що воно є лідером галузі, але попри високі перспективи розвитку модернізація та утримання залізничної інфраструктури вимагає значних коштів, що в умовах воєнного стану є значною проблемою. Це потребує залучення сучасних технологій та інновацій, зокрема під час проведення вишукувань об'єктів залізниці. Дослідження можливостей сучасних ГІС-технологій у процесі здійснення інженерно-геодезичних вишукувань на об'єктах залізничної інфраструктури та зв'язків між ними показало певні переваги та недоліки. У чинній нормативній базі з цього напрямку рекомендовано використовувати у вишукуваннях ГІС-технології, але воно не регламентовано. Розроблено DFD-діаграму, що узагальнює та формалізує процес інтеграції матеріалів, добутих під час вишукувань із застосуванням ГІС-технологій, до банку геоданих країни. Спираючись на неї, формалізовано роботи польового та камерального етапів. Експериментальним способом на прикладі проєкту дослідження залізничного полотна та прилеглої ситуації на місцевості у напрямку Ковель – Ягодин – кордон перевірено розроблені функціональні моделі. Показано, як їх використання прискорює планування подібних проєктів. **Висновки.** Опрацювання на практиці розроблених функціональних моделей підвищує ефективність виконання інженерно-геодезичних вишукувань на об'єктах залізничної інфраструктури. Зокрема систематизація та структуризація потоків даних, алгоритмізація діяльності під час виконання робіт польового та камерального етапів спрощують процеси планування проєктів виконання вишукувань, збільшують інформативність дослідних матеріалів з одночасним зменшенням часових витрат на проведення робіт, підвищують точність отримання геометричних і геодезичних параметрів місцевості.

**Ключові слова:** інформаційний процес; функціональне моделювання; потоки даних; лазерне сканування; етапи інженерно-геодезичних вишукувань; ГІС-інструменти *Leica*.

### Вступ

Здатність людства використовувати науку, технології та інновації (НТІ) для протистояння кризам та їх спроможності забезпечувати добробут суспільства є очевидними, але потенціал застосування НТІ для досягнення цілей сталого розвитку, на жаль, залишається незастосованим, адже існують певні бар'єри на шляху їх прогресу, які необхідно визначати та долати. Війна в Україні також додала певних викликів і загроз у реалізації цих цілей, серед яких недостатність фінансових ресурсів, нова демографічна реальність, брак кваліфікованих кадрів і робочої сили для відродження економіки. За цих обставин лише збільшення частки використання результатів науки, нових технологій та інновацій може сприяти досягненню визначених цілей розвитку [1].

Зростання рівня інноваційності національної економіки, збільшення кількості впроваджуваних розробок і підвищення економічної віддачі від них є основою Стратегії розвитку сфери інноваційної діяльності на період до 2030 р. [1]. Це потребує інтеграції результатів науки, нових технологій та інновацій до загальнонаціональних, галузевих норм і стандартів з метою досягнення синергії від їх використання для суспільства. Закон України "Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки", формуючи цілісну систему відповідно до Державної цільової програми прогнозування науково-технологічного та інноваційного розвитку України, визначає актуальні напрями розвитку науки, техніки та інноваційної діяльності, спрямовані на повоєнну відбудову України [2]. Серед цих напрямів виокремимо фундаментальні наукові

дослідження з найважливіших проблем розвитку науково-технічного, соціально-економічного та іншого потенціалу для забезпечення конкурентоспроможності України у світі завдяки широкому застосуванню та впровадженню новітніх інформаційних і комунікаційних технологій. Можливим способом реалізації цього напрямку стає створення стійкої транспортної інфраструктури.

За оцінками фахівців Всесвітнього економічного форуму, підвищення ефективності транспортної інфраструктури суттєво впливає на розвиток соціально-економічної діяльності країн і стійкість сучасних громад, позначається на розміщенні та ефективності виробництва, на формуванні місцевих і національних ринків, на розв'язанні соціально-економічних завдань. Визнання собівартості продукції, що є мірою економічної діяльності та її відтворенням, змушує бізнес узгоджувати розвиток своїх підприємств із планами її розвитку [3]. Так, наприклад, вантажообіг залізничного транспорту сягає 56,1%, він у середньому виконує 20% вантажних і 4% пасажирських перевезень у загальному вантажопасажирському потоці країни, що робить його однією з провідних транспортних галузей України. Тому підвищення ефективності залізничної інфраструктури стає основною метою державних програм і проєктів розвитку, а розуміння кількості та якості її доріг і всієї інфраструктури загалом виявляється необхідним для прийняття стратегічних рішень [4]. Наявність залізниці значно збільшує сукупне економічне зростання і темпи урбанізації вздовж маршруту, сприяє модернізації промислових структур, впливає на темпи економічного розвитку. З погляду просторової структури вона суттєво підвищує доступність регіону, міцність економічних зв'язків та економічний потенціал упродовж усього маршруту, забезпечує взаємозв'язок між різними галузями економіки, підприємствами та країнами, впливає на процеси виробництва, сприяючи промисловій агломерації та переміщенню факторів виробництва між міськими й сільськими районами та гарантуючи підвезення сировини й вивезення готової продукції [5–7]. Україна в цьому сенсі не є винятком. За інформацією Держстату [4], залізничний транспорт є провідною галуззю в дорожньо-транспортному комплексі країни (рис. 1): станом на 2021 р. вантажообіг залізничного транспорту сягнув 180,4 млрд т км (65,7% від загального

вантажобоігу за всіма видами транспорту), пасажирообіг – 15,7 млрд пас. км (25,04% від загального пасажирообігу за всіма видами транспорту). Перевезення вантажопасажиропотоку в Україні забезпечує залізнична інфраструктура шести регіональних філій: Донецької, Львівської, Одеської, Придніпровської, Південно-Західної та Південної. Картографічні моделі розподілу вантажопасажиропотоку за філіями станом на 2021 р. наведені на рис. 2.

Важливість залізничного транспорту в системі транспортних комунікацій України посилюється й тим, що крізь територію держави пролягають основні транспортні транс'європейські коридори: Схід – Захід, Балтика – Чорне море. Українська залізниця безпосередньо межує і взаємодіє із залізницями Молдови, Польщі, Румунії, Словаччини, Угорщини та забезпечує роботу із 40 міжнародними залізничними переходами, а також обслуговує 18 українських морських портів Чорноморсько-Азовського басейну [8]. З 2023 р. за сприянням Європейського Союзу розпочато проєкти розвитку євроінтеграційної залізничної інфраструктури Української залізниці, спрямовані на реконструкцію старих колій і будівництво залізничних пунктів пропуску з Польщею, Словаччиною, Угорщиною та Румунією. Також пропонується інтеграція Укрзалізниці до Транс'європейської транспортної мережі TEN-T для забезпечення єдиного залізничного сполучення в межах Середземноморського залізничного коридору, який починається від південного узбережжя Іспанії та закінчиться у Львові [8, 9].

Але, за інформацією Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України, пропускна спроможність окремих ділянок і напрямків залізниць перебуває на критичній межі. Це пов'язано з низкою різних факторів (наприклад, транспортне навантаження, природні умови та чинники, геопросторове положення колій і станцій, їх технічний стан тощо), які можуть суттєво скорочувати терміни служби інфраструктури та знижувати комфортність руху поїздів [5, 6]. З метою ліквідації "вузьких місць" залізничної мережі України та інтеграції залізничної інфраструктури в транспортну мережу ЄС, а також для покращення техніко-експлуатаційних можливостей об'єктів інфраструктури необхідно їх технічно переоснастити та модернізувати [8, 9].

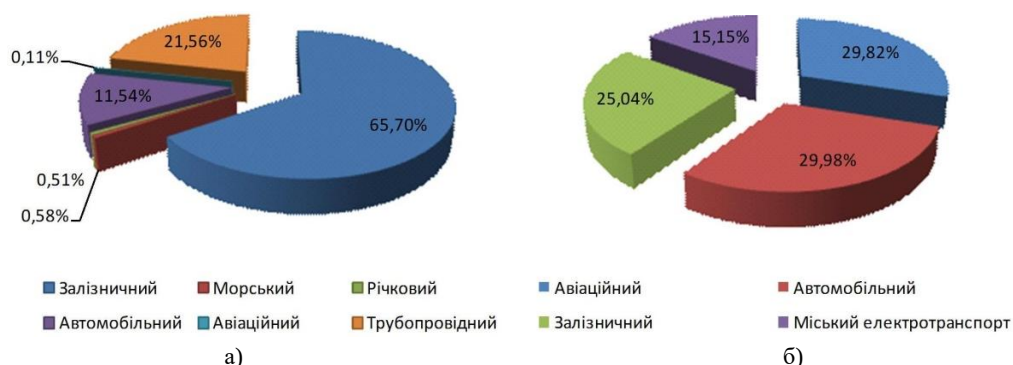


Рис. 1. Показники роботи транспортної галузі України станом на 2021 р. (у %): а – вантажообіг; б – пасажирообіг

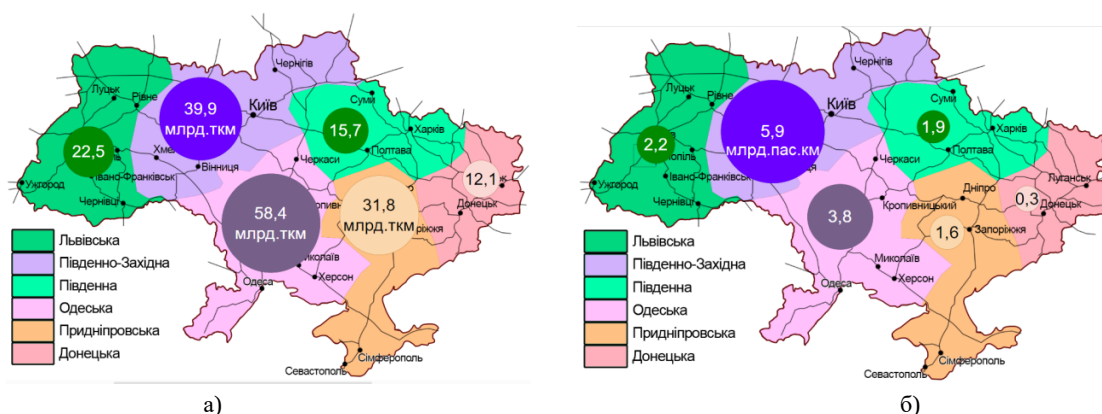


Рис. 2. Розподіл вантажопасажиропопотоку за філіями АТ "Українська залізниця" а – вантажообіг; б – пасажирообіг

Модернізація, розвиток, будівництво та утримання залізничної інфраструктури потребують значних коштів. Навіть у довоєнні часи можливості щодо реалізації інвестиційних проєктів цієї сфери в АТ "Укрзалізниця" були вкрай обмеженими [9]. З огляду на це перспективними стають підходи, ґрунтовані на використанні методів НТІ, зокрема під час геодезичних вишукувань, які ґрунтуються на високопродуктивних методах збору інформації про місцевість. Адже сучасні ГІС-технології відкривають нові перспективи для розв'язання завдань накопичення інформації про стан об'єктів залізничної інфраструктури, їх оцінювання, аналізу із фіксацією ситуації на прилеглий місцевості, з перевіркою на відповідність вимогам законодавства, дотримання будівельних норм тощо. Отримані показники надалі стають основою в розробленні проєктів модернізації та утримання об'єктів залізничної інфраструктури [3, 4].

#### Аналіз останніх публікацій, постановка мети дослідження

За сутністю залізнична мережа – велика, складна система, яка містить взаємопов'язану інфраструктуру

залізничних колій, мостів, віадуків і тунелів та, на відміну від інших штучних споруд, працює в умовах накопичення поступових деформацій, структурних зсувів тощо, викликаних сезонними змінами температур і опадів, погіршенням кліматичних умов, транспортним навантаженням, суттєвим збільшенням швидкості руху потягів тощо, де окремі елементи, що не працюють на повну потужність, можуть вплинути на функціональність і продуктивність усієї залізничної системи.

Передбачувані фінансові витрати на технічне обслуговування таких систем дуже високі, навіть незважаючи на соціальні витрати, викликані зниженням стандартів безпеки. У зв'язку з цим стає зрозуміло, що обслуговування залізничних мереж, а також моніторинг їх статичних і динамічних навантажень – непросте багатокритеріальне завдання, що бере до уваги аспекти належного проєктування, використання інфраструктури, її обслуговування, часову деградацію конструкційних матеріалів тощо [10–12]. Це вимагає комплексного структурного підходу до оцінювання стану об'єктів мережі та, відповідно до ст. 11 Закону України "Про залізничний транспорт", упровадження низки заходів із забезпечення безаварійної

роботи для підтримання безпеки руху поїздів та утримання в справності інженерних споруд, колій, перегонів, рухомого складу, обладнання, механізмів і пристроїв тощо (далі – об'єктів залізничної інфраструктури) [10, 13]. Зазначені заходи потребують реконструкції, переоснащення, модернізації або будівництва об'єктів залізничної інфраструктури, тобто тих процесів, здійснення яких неможливе без проведення інженерних вишукувань [13].

**Метою роботи** є підвищення ефективності інженерно-геодезичних вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури України за допомогою впровадження сучасних технологій геоінформаційних систем (ГІС).

**Предмет дослідження** – дистанційні методи інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації об'єктів залізничної інфраструктури України.

Завдання дослідження:

- проаналізувати загальний стан залізничної інфраструктури України з метою визначення можливих напрямів її покращення;
- дослідити наявну нормативно-правову базу, що регламентує інженерно-геодезичні вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури в процесі їх модернізації;
- оцінити можливості сучасних ГІС-технологій у розв'язанні певних завдань вишукувань;
- формалізувати процеси польового та камерального етапів вишукувань;
- опрацювати розроблені функціональні моделі на практиці.

Аналізуючи ієрархічну структуру наявної нормативно-правової бази (рис. 3), що регулює порядок інженерних вишукувань у сфері залізничної інфраструктури, зазначимо, що її основною метою є отримання топографо-геодезичних матеріалів про ситуацію та рельєф місцевості, необхідних для комплексного оцінювання природних і техногенних умов території залізничної мережі. Також законодавством передбачено обов'язкове розроблення документів геодезичного супроводу, наприклад топографічних планів, креслеників об'єктів залізничної інфраструктури, поперечних профілів залізничної колії тощо, для техніко-економічного обґрунтування проєктів із будівництва, реконструкції або модернізації цих об'єктів [13, 14].

Методи й технічні засоби виконання вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури залежать від цілей робіт і складності умов їх

виконання та зазвичай відповідають принципу "прийди та подивися" з використанням традиційних геодезичних приладів [15, 16].

1. Закон України "Про залізничний транспорт" від 04.07.1996 р. № 273/96 ВР (зі змінами).
2. Закон України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" від 26.01.1999 р. № 353 – XIV (зі змінами).
3. Закон України "Про національну інфраструктуру геопросторових даних" від 13.04.2020 р. № 554-IX (зі змінами).

1. Постанова Кабінету Міністрів України "Впровадження на території України Світової геодезичної системи координат WGS-84" від 22.12.1999 р. № 2359 (зі змінами).
2. Постанова Кабінету Міністрів України "Порядок побудови Державної геодезичної мережі" від 07.08.2013 р. № 646 (зі змінами).
3. Постанова Кабінету Міністрів України "Порядок надходження, ведення обліку, зберігання та використання матеріалів Державного картографо-геодезичного фонду України, їх валідації" від 19.01.2024 р. № 67.

1. ДБН А.2.1-1-2008 "Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва".
2. ГНТА-2.04-04-98 "Інструкція з топографічного знімання у масштабі 1:500 – 1:5000".
3. ДБН В 2.3-19:2018 "Залізничні колії 1520 мм. Норми проєктування".
4. ДБН В 2.3-6:2009 "Мости та труби. Обстеження і випробування".

**Рис. 3.** Ієрархія нормативних документів, що регулюють порядок інженерних вишукувань у сфері залізничної інфраструктури

У цьому разі оцінювання стану певних об'єктів залізничної інфраструктури, наприклад, залізничного полотна, стає досить трудомістким, потребує чимало часу, надає лише точкову інформацію та багато в чому залежить від кваліфікації та особистого досвіду працівників. У деяких ситуаціях дотримання принципу повноти інформації потребує залучення спеціалізованих засобів комплексного обліку, наприклад засобів вимірювання геометрії колії. Це підвищує стандартизованість та об'єктивність процедури вишукувань, проте аналіз деяких результатів, як і раніше, вимагає чимало часу й залежить від досвіду аналітиків. Крім того, вартість придбання та експлуатації подібних засобів висока, що не сприяє їх широкому застосуванню [15]. У цьому разі ефективне здійснення вишукувальних робіт на об'єктах залізничної інфраструктури ускладнюється через великий розмір географічних територій, особливо в реалізації проєктів інтеграції Української залізниці до європейської транспортної мережі, через складність інженерно-геологічних умов країни, а також наявність обмежень на строки проведення робіт і на фінансові ресурси [15–17].

За цих обставин для підвищення ефективності та об'єктивності вишукувань дослідники та інженери-шляховики як у наукових колах, так і в практичній

діяльності наполегливо рекомендують використовувати методи дистанційного зондування, адже стрімкий розвиток технологій цього напрямку та їх поширення серед безпосередніх виконавців інженерних вишукувань пов'язують не лише зі значною фінансовою вигодою, а також з їх багатообіцяною цінністю в різних застосунках [17–19].

Тому останнім часом дистанційне зондування як потужний інструмент набуває вагомego значення серед множини наявних методів визначення характеристик об'єктів залізничної інфраструктури. Наприклад, у пасивному дистанційному зондуванні матеріали, зібрані у видимому спектрі (аерофотознімки / цифрові зображення) з різних наземних, повітряних та космічних платформ, стають найкращою інформацією для візуальної інтерпретації пошкоджень цих об'єктів за кольоровими знімками. Є значна кількість досліджень, що описують переваги використання результатів фотограмметрії за даними, отриманими з безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Формуючи 3D-моделі об'єктів залізничної інфраструктури, цифрова фотограмметрія на основі інформації БПЛА має неабиякий потенціал для швидкого й автоматичного визначення характеристик пошкоджень цих об'єктів, будучи основою проєктів реконструкції, переоснащення або модернізації. За умови активного дистанційного зондування впроваджують різні методи, але найпоширенішою стає технологія лазерного сканування з використанням наземних або мобільних сканерів. Ця технологія збору показників на основі хмари точок є найважливішим джерелом інформації для створення тривимірних моделей об'єктів залізничної інфраструктури. Вона постійно та швидко розвивається разом із зменшенням розмірів і ваги лазерних сканерів [19–21].

Мабуть, тому Закон України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" безпосередньо вказує, що інженерні вишукування необхідно здійснювати за допомогою впровадження прогресивних технологій дистанційного зондування Землі повітряними та наземними засобами [13], добуваючи інформацію про об'єкти залізничної інфраструктури з двовимірних зображень і тривимірних хмар точок. На жаль, наразі чинні правові документи, що здійснюють регулювання, контроль за якістю та дають рекомендації щодо методик проведення робіт цими засобами, відсутні [13, 14, 16].

### Дослідження можливостей сучасних ГІС у завданнях модернізації об'єктів залізничної інфраструктури

У проєктах модернізації залізничної інфраструктури відповідні системи інженерних споруд і комунікацій стають об'єктами топографо-геодезичних і картографічних робіт. У цьому разі отримані матеріали містять геопросторові відомості відповідного напрямку діяльності згідно з вимогами формування та ведення банків геодезичних і топографічних показників. Необхідно зауважити, що ст. 17 Закону України "Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність" передбачає, що як технічне й технологічне забезпечення застосовуються сучасні обчислювальні та інформаційні техніки й технічні засоби, інформаційні технології та системи створення геодезичних, топографічних і картографічних матеріалів, їх збору, ведення, контролю, накопичення, зберігання, поновлення, пошуку, перетворення, перероблення, відтворення, видачі та передачі [13]. Як найсучасніші з них розглядають дистанційне зондування Землі повітряними та наземними засобами й дистанційне зондування Землі з космосу [13, 22].

Узагальнюючи наявний досвід, зазначимо, що кожна з технологій дистанційного зондування Землі певною мірою може бути впроваджена під час проведення інженерно-геодезичних вишукувань в умовах модернізації об'єктів залізничної інфраструктури, а оброблення результатів кожної з них дає змогу актуалізувати інформацію банку геоданих. На рис. 4 наведено діаграму потоків даних (DFD-діаграму), що ілюструє, які матеріали, що стають елементом банку геоданих, отримують унаслідок використання певних ГІС-технологій у інженерно-геодезичних вишукуваннях.

Зазначимо, що на запропонований DFD-діаграмі увага зосереджена не лише на класичних і найбільш застосованих, а також на менш популярних, але перспективних технологіях здійснення інженерно-геодезичних вишукувань, які можна використовувати в модернізації об'єктів залізниці. Так, наприклад, на етапі планування інженерно-геодезичних вишукувань і визначення їх обсягів доцільно застосовувати супутникові та аерофотознімки ділянки обстеження.

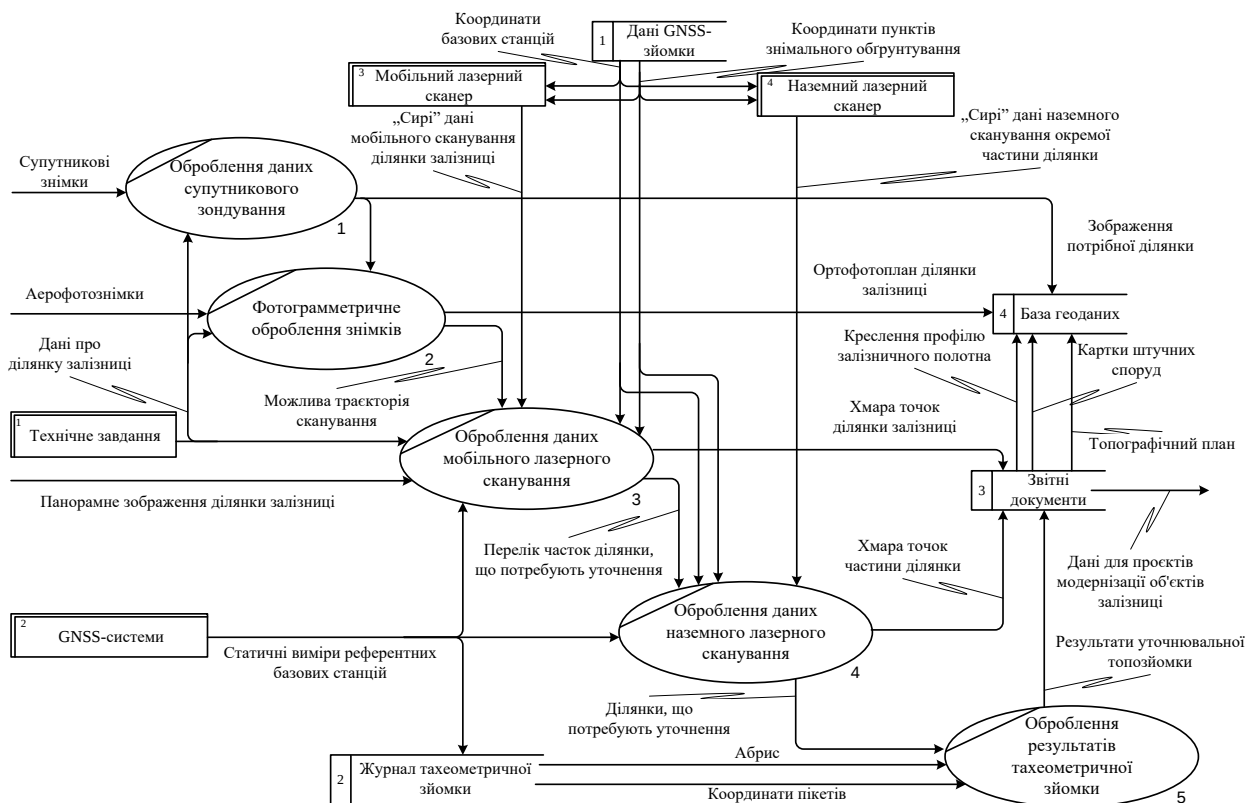


Рис. 4. DFD-діаграма формування банку геоданих із залученням сучасних ГІС-інструментів

Технології супутникового зондування та фотограмметричної аерофотозйомки є не досить поширеними інструментами в завданнях геодезичних вишукувань об'єктів залізниці, але відкривають значні можливості для отримання загальної інформації про ці об'єкти, їх стан, особливо для споруд, розташованих на великих площах або на складних ділянках місцевості [3, 16]. Не зменшуючи важливості базового, класичного й найбільш консервативного способу геодезичної зйомки – тахеометричної зйомки – на DFD-діаграмі показано її доповнювальну роль як інструменту, що застосовують у разі, коли за певних обставин є обмежений доступ до деяких ділянок вишукувань. Така сама допоміжна роль зазначена й для GNSS-зйомки. Маючи на увазі, що в інженерно-геодезичних вишукуваннях GNSS-зйомка, наприклад, у режимі RTK може використовуватися як ефективний інструмент у разі розвитку опорної геодезичної мережі або створення планово-знімального обґрунтування за відсутності в безпосередній близькості опорної мережі пунктів. Але в завданнях геодезичних вишукувань об'єктів залізниці GNSS-технології виконують більш значущу та фундаментальну роль, ніж лише як вид топографічної зйомки. Статистичні виміри базових станцій

проводять за пів години до та після проведення мобільного лазерного сканування для подальшого оброблення та коригування траєкторії руху мобільної сканувальної системи, а також для здійснення геоприв'язки отриманої хмари точок [23]. Як найпотужніший інструмент інженерно-геодезичних вишукувань, що покриває найбільші площі за умови великих масштабів зйомки, на DFD-діаграмі зазначено мобільне лазерне сканування, яке успішно застосовують під час розв'язання завдань інвентаризації та паспортизації інфраструктури залізниці, вивчення стану залізничного полотна, оцінювання його профілю, збору точної інформації та моніторингу інженерних споруд (електричного господарства, вантажного парку, службових приміщень тощо), зйомки тунелів, мостів, формування тривимірної цифрової моделі об'єктів залізниці тощо. Мобільне лазерне сканування вважають найбільш продуктивним сучасним інструментом у геодезичних вишукуваннях лінійних об'єктів, оскільки воно суттєво спрощує роботу польових бригад, надає надлишкові дані та забезпечує точність вимірів у 2–3 см [16, 21, 24]. Крім того, наземне лазерне сканування розглядають як самостійний інструмент геодезичних вишукувань, що також може бути

використаний як доповнення до мобільного лазерного сканування для отримання інформації з ділянок, що не вдалося дослідити за допомогою системи мобільного лазерного сканування.

Отже, найбільш результативним способом збирання даних про стан залізничної інфраструктури є комбінування сучасних надбань у сфері ГІС-технологій. У цьому контексті застосування інформації, добутої за допомогою різних технологій дистанційного зондування в межах підходу "об'єднання даних", може стати практичною методологією для подолання прогалів і обмежень у використанні окремих інструментів інженерно-геодезичних вишукувань, що в сукупності сприяє найповнішому оцінюванню залізничної інфраструктури для проєктів її модернізації [12, 16].

#### **Формалізація етапів інженерно-геодезичних вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури**

Під час модернізації об'єктів залізничної інфраструктури для отримання топографо-геодезичних матеріалів чинне законодавство передбачає поетапне проведення інженерних вишукувань [14], ефективність яких під час виконання суттєво підвищується завдяки комбінуванню сучасних надбань у сфері ГІС-технологій [16, 21]. Аналізуючи DFD-діаграму (рис. 3), надалі зосередимося на лазерному скануванні – технології, поширення якої пов'язують з технологічним проривом останнього десятиріччя, що сприяв перетворенню експериментальних установок зі сканування в прилади, які дають змогу виконувати польові геодезичні вишукування дуже швидко та детально [20, 21, 24]. Зокрема мобільне лазерне сканування більш ефективне для вимірювань лінійно-протяжних об'єктів і насамперед – транспортних шляхів, про які дає докладний (щільний) набір (хмару) тривимірних точок поверхні [21].

Згідно з ДБН А.2.1-1-2008 виокремлюють три етапи інженерно-геодезичних вишукувань [14]:

- підготовчий, на якому розробляють програму виконання вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури відповідно до технічного завдання з огляду на аналіз результатів вишукувань минулих років і рекогносцирувального обстеження території;

- польовий, на якому виконують комплекс польових вимірювань із подальшим попереднім обробленням показників для оцінювання якості, повноти й точності зібраних матеріалів;

- камеральний, де остаточно обробляють інформацію, добуту на польовому етапі, розробляють для замовника звітні матеріали за вимогами технічного завдання та відповідно до чинного законодавства [13, 22] формують матеріали для передачі до державних картографічно-геодезичних фондів.

У чинному законодавстві проведення інженерно-геодезичних вишукувань із використанням лазерного сканування досі не регламентовано [13, 14, 22]. І хоча з'являються деякі спроби формалізації їх певних етапів (наприклад, у роботі [16]), основна послідовність дій визначається особистим досвідом практичного застосування сучасних ГІС-інструментів. За цих обставин, дотримуючись основних положень ДБН А.2.1-1-2008 та узагальнюючи практичний досвід, сформуємо модель процесу виконання польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань. Як методологію формалізації використаємо підходи IDEF3, що дають змогу формалізувати послідовність операцій процесу та зафіксувати його основні об'єкти.

IDEF3-модель процесу виконання польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань наведена на рис. 5. Відповідно до розробленої моделі початковим кроком польового етапу вишукувань на об'єктах залізничної інфраструктури стає створення планово-висотної основи місцевості згідно із затвердженою програмою вишукувань. Для цього виконують рекогносцирування з визначенням вузлових точок об'єкта на місцевості та вибором точок монтування базових станцій. Кількість базових станцій визначається метою проведення інженерно-геодезичних вишукувань та параметрами об'єкта дослідження. Наприклад, максимальна точність потрібна в проєктуванні та виконавчій зйомці, що потребує застосування декількох базових станцій у ділянці робіт [25]. Далі закладають планово-висотну основу місцевості, "опорні точки якої вздовж ділянки мобільного лазерного сканування у вигляді Х-подібних знаків маркують світловідбивною фарбою, виконують їх нівелювання.

Для досягнення результату мобільного сканування розраховують траєкторію руху, необхідну для синхронізації траєкторії сканера й результатів сканування. Зазвичай цю траєкторію будують за допомогою внутрішніх і зовнішніх сенсорів сканера (вбудованої інерційної системи, GNSS-приймача, одометра або інших датчиків), а її якість впливає на результати, отримані в подальшому системою мобільного сканування.

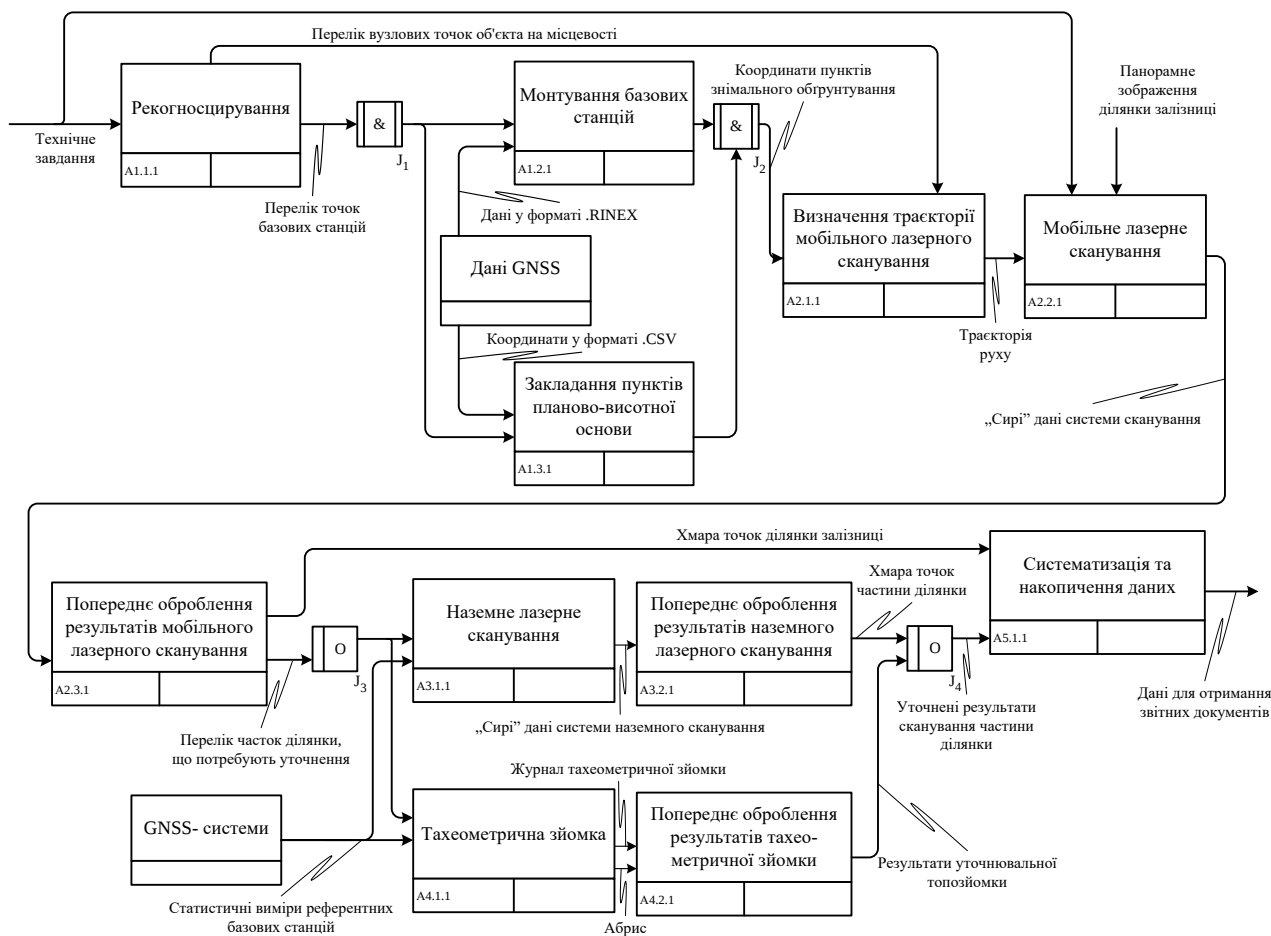


Рис. 5. IDEF3-модель процесу виконання польового етапу інженерно-геодезичних вишукувань

Далі за максимально можливою траєкторією виконують мобільне лазерне сканування. Тут ефективно поєднувати лазерне сканування з панорамною зйомкою (для камерального дешифрування об'єктів) [25].

Основною проблемою лазерного сканування є аномалії хмари точок у вигляді шумів або перевідбиття променя лазерного сканера від мокрих або блискучих поверхонь [20, 23, 25]. Тому ділянки, що в повному обсязі не вдалося дослідити з використанням мобільного лазерного сканера, досліджують за допомогою наземного лазерного сканера або тахеометричної зйомки чи поєднуючи ці методи для більш точного оцінювання стану об'єкта залізничної інфраструктури.

На камеральному етапі інженерно-геодезичних вишукувань після зйомки всі результати обробляють у спеціалізованому програмному забезпеченні для отримання звітних документів, зазначених у технічному завданні. Перелік, послідовність робіт та особливості їх виконання суттєво залежать від програмного забезпечення, яке використовують

вишукувальні організації на цьому етапі [14, 16]. Після аналізу інструкцій користувачів, методичних вказівок [26–28] і загальноприйнятих алгоритмів розроблено функціональну схему камерального оброблення даних (рис. 6), отриманих на польовому етапі вишукувань об'єктів залізничної інфраструктури, проведеного із застосуванням ГІС-інструментів від компанії *Leica*.

Відповідно до рис. 6 вхідною інформацією камерального етапу є результати сканування об'єктів залізничної інфраструктури, на виході формуються звітні документи для передачі замовнику. Отже, схема пояснює, як здійснюється перетворення "сирих" показників, отриманих на польовому етапі, у топографічні плани, картки штучних споруд і креслення профілю залізничного полотна. Узагальнюючи схему, зазначимо, що камеральне оброблення передбачає такі основні підпроцеси:

– обчислення координат польових базових станцій, що були встановлені та використані в процесі роботи;

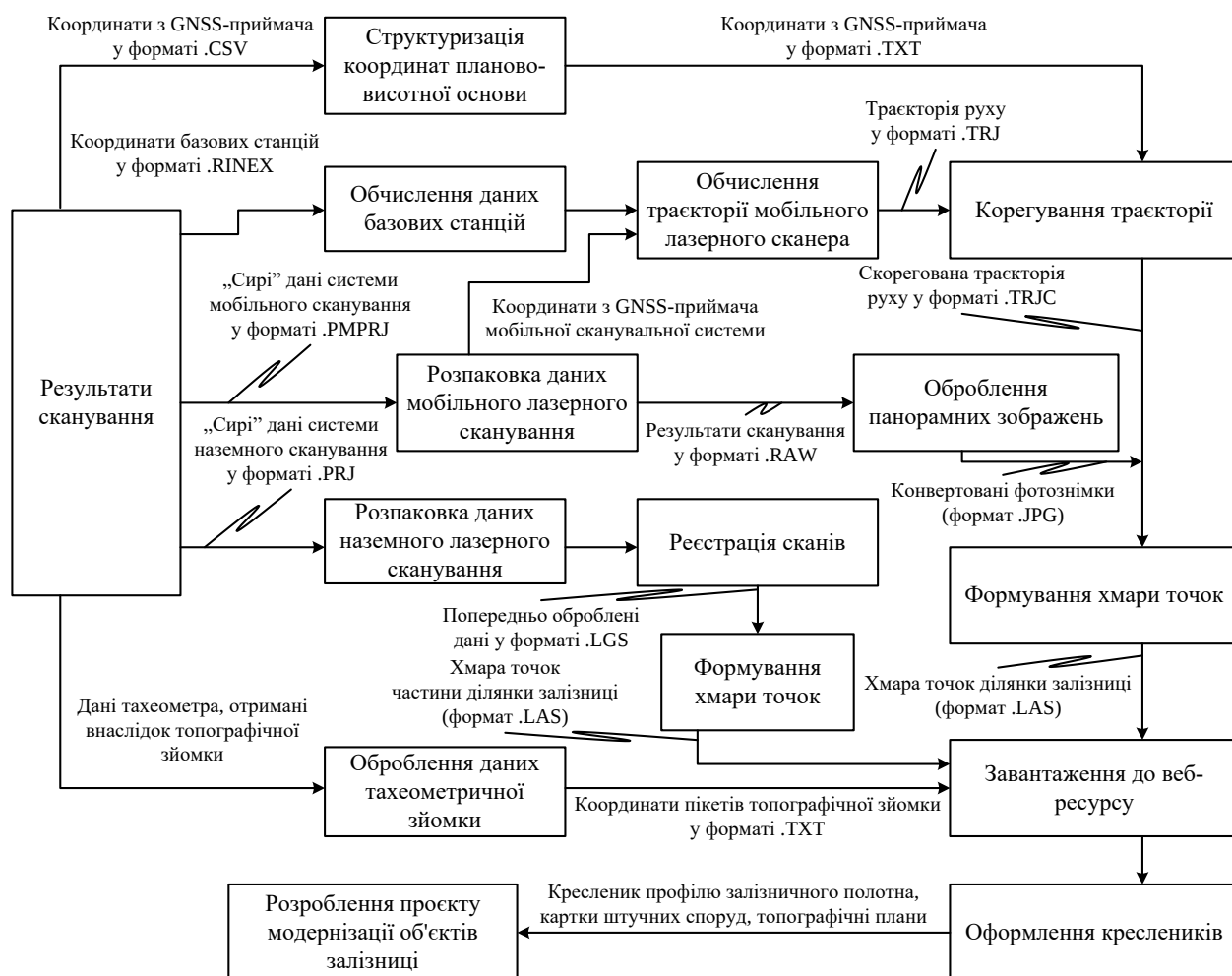


Рис. 6. Функціональна схема камерального оброблення даних

– оброблення результатів сканування та їх "зшивання" (накладання інформації з інших джерел на дані мобільного лазерного сканування) із застосуванням програмного забезпечення *Leica Cyclone* для досягнення повного і високоточного результату дослідження;

– завантаження оброблених даних разом із панорамними зображеннями до вебсервісу для зберігання та подальшого оброблення;

– оформлення креслеників на основі добутих результатів інженерно-геодезичних вишукувань із застосуванням *Autodesk AutoCAD*, що найчастіше астосовується у створенні інженерних креслень за чинними в Україні нормами та правилами.

#### Проект інженерно-геодезичних вишукувань залізничної інфраструктури на ділянці Ковель – Ягодин – кордон

Як приклад застосування в практичній діяльності запропонованих формалізованих підходів

розглянемо проект інженерно-геодезичних вишукувань ділянки залізниці в західній частині Волинської області: необхідно дослідити залізничне полотно та прилеглу місцевість (максимально можливої ширини) у напрямку Ковель – Ягодин – кордон. Межі цієї ділянки показано на картографічній схемі (рис. 7).

Відповідно до IDEF3-моделі (рис. 5) на початку польових робіт проведено рекогностування з метою визначення можливих проблемних ділянок на об'єкті дослідження, за результатами якого прийнято рішення закладати пункти планово-висотної основи з інтервалом 500 м уздовж усієї ділянки. Загалом закладено 214 пунктів тимчасової планово-висотної мережі, координати пунктів якої визначено за допомогою GNSS-приймача *Stonex S700A* у режимі RTK з отриманням поправок від постійно діючої мережі референтних станцій *System.net* у місцевій системі координат МСК-07.

Для коректного й точного формування траєкторії визначено координати польових базових

станцій від *System.net* у системі координат WGS-84 для подальшого опрацювання траєкторії в програмному забезпеченні *Leica Pegasus Manager* [26]. Далі за максимально можливою траєкторією проведено мобільне лазерне сканування, фрагменти результатів якого наведені на рис. 8, 9. На жаль, під час

сканування система стикалася з перешкодами, наприклад тіньовими ділянками від вантажних вагонів (рис. 9), що потребувало уточнення інформації з цих ділянок альтернативними методами – наземним лазерним скануванням або тахеометричною зйомкою.

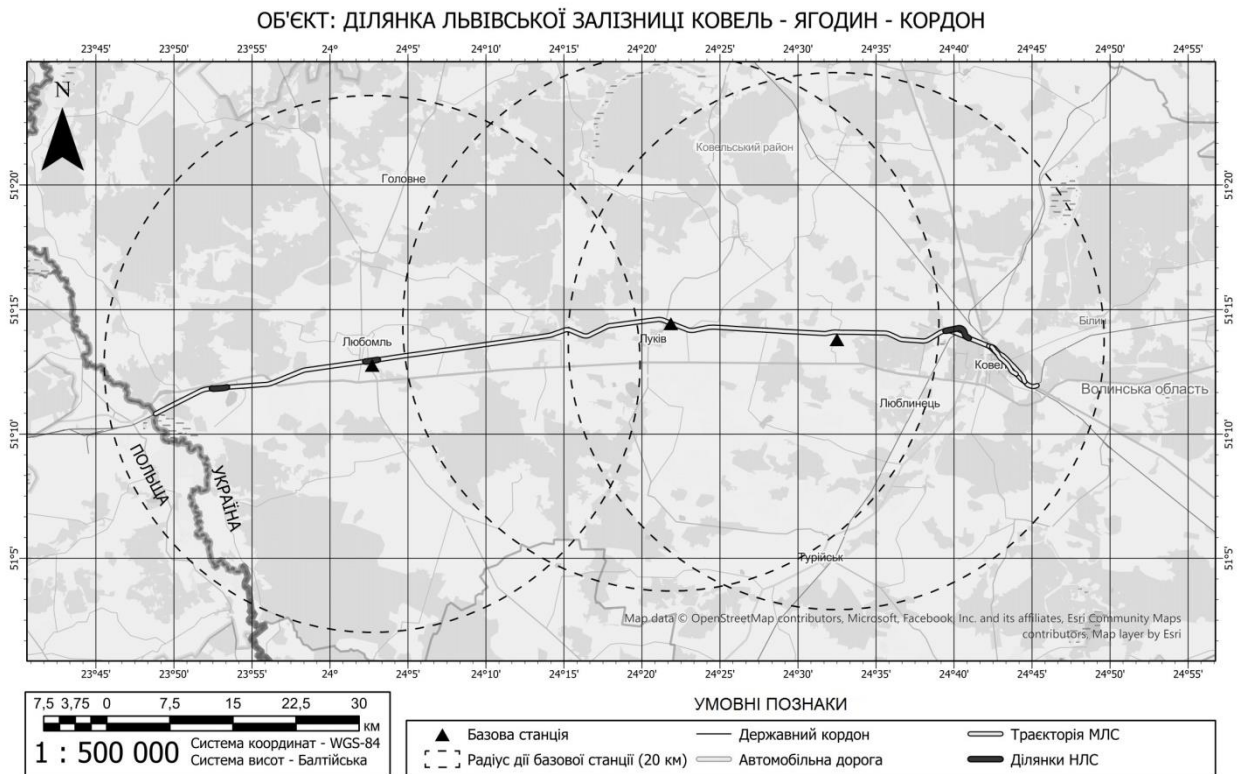


Рис. 7. Картографічна схема інженерно-геодезичних вишукувань

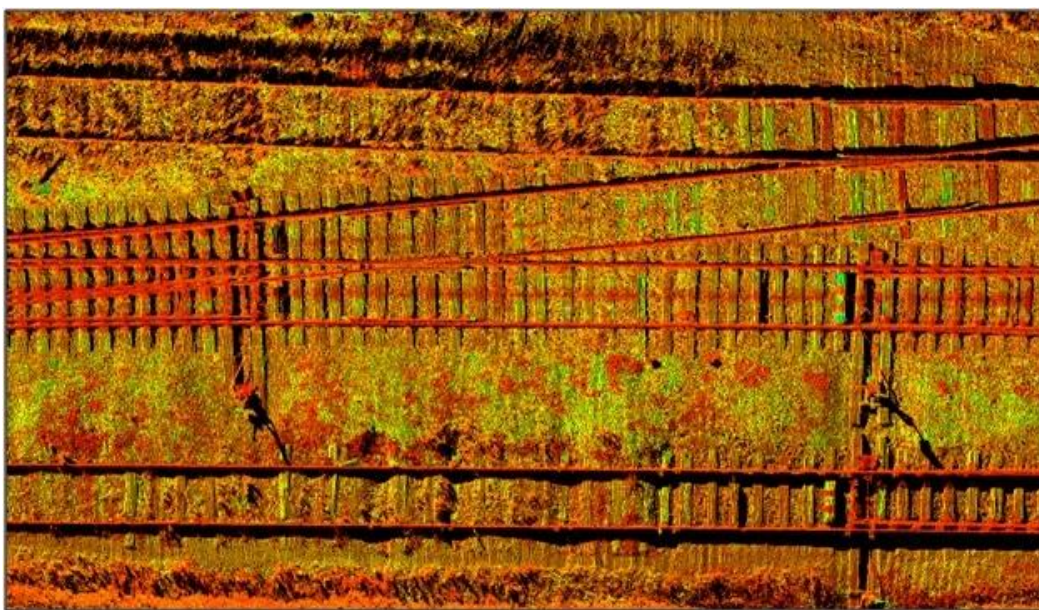


Рис. 8. Мережа стрілочних переходів, отримана від системи мобільного лазерного сканування

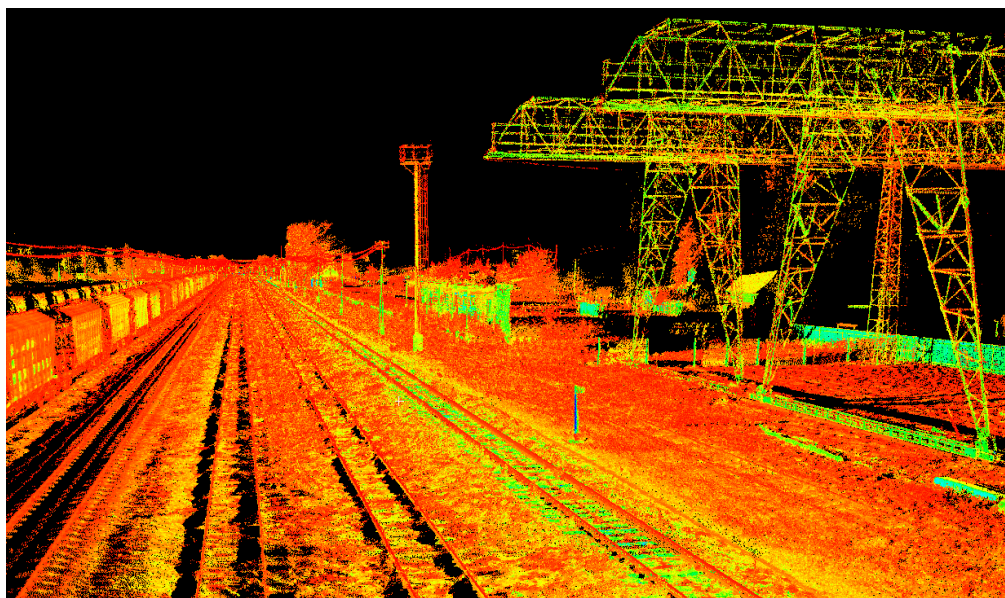


Рис. 9. Залізничний вантажний парк, отриманий від системи мобільного лазерного сканування

Після аналізу результатів роботи системи мобільного лазерного сканування можна переконатися в їх інформативності – основні елементи залізничного полотна легко ідентифікуються серед інших, а проблемні ділянки можна уточнити за панорамними

зображеннями від мобільної сканувальної системи, фотознімки якою зроблено з інтервалом через кожні 5 м (рис. 10). Усе це дає змогу безпомилково дешифрувати об'єкти залізничної інфраструктури.



а)



б)

Рис. 10. Фрагменти зображення залізничного полотна: а – панорамне зображення; б – результати лазерного сканування

Наземне лазерне сканування виконувалось пристроєм *Leica RTC 360*. Загалом було проведено сканування трьох проблемних ділянок:

- уздовж ділянки залізничної станції Ягодин, на якій були розміщені товарні вагони завдовжки 500 м;
- уздовж ділянки залізничної станції Любомль, на якій були розміщені товарні вагони завдовжки 1000 м;

– ділянки залізничної європейської колії протяжністю 2 км, проїзд нею неможливий через технічні характеристики транспортного засобу, на якому встановлено систему мобільного лазерного сканування.

У процесі проведення інженерно-геодезичних вишукувань залізничної інфраструктури на ділянці Ковель – Ягодин – кордон досліджено 201 штучну

споруду. У випадку надземної штучної споруди (шляхопровід, естакада) інформацію мобільного лазерного сканування можна використовувати для створення звітнього документа. Для повноти даних і заповнення картки штучної споруди інженеру залишалося визначати на місці характеристики, які не вдалося встановити методом мобільного лазерного сканування.

На жаль, здебільшого штучні споруди залізничної інфраструктури розташовані в нижній частині земляного полотна, що затрудняло автоматичне отримання інформації методом мобільного лазерного сканування. У цьому разі спроби використання даних мобільного лазерного сканування з метою

оформлення звітних матеріалів щодо стану штучних споруд показали, що такі дані та панорамні зображення, отримані з мобільної сканувальної системи, є гарним доповненням у створенні карток штучних споруд (рис. 11, а), а в деяких ситуаціях і основним джерелом інформації. Наприклад, на рис. 11, б показана картка штучної споруди № 61 – залізобетонної труби на залізничній станції Любомль, яка створена за результатами фізичного обстеження і мобільного лазерного сканування. Вона містить фотознімки штучної споруди, кресленик з розмірами, коротку характеристику, історичну довідку, номер пікету (геопозиції) та опис стану елементів штучної споруди.

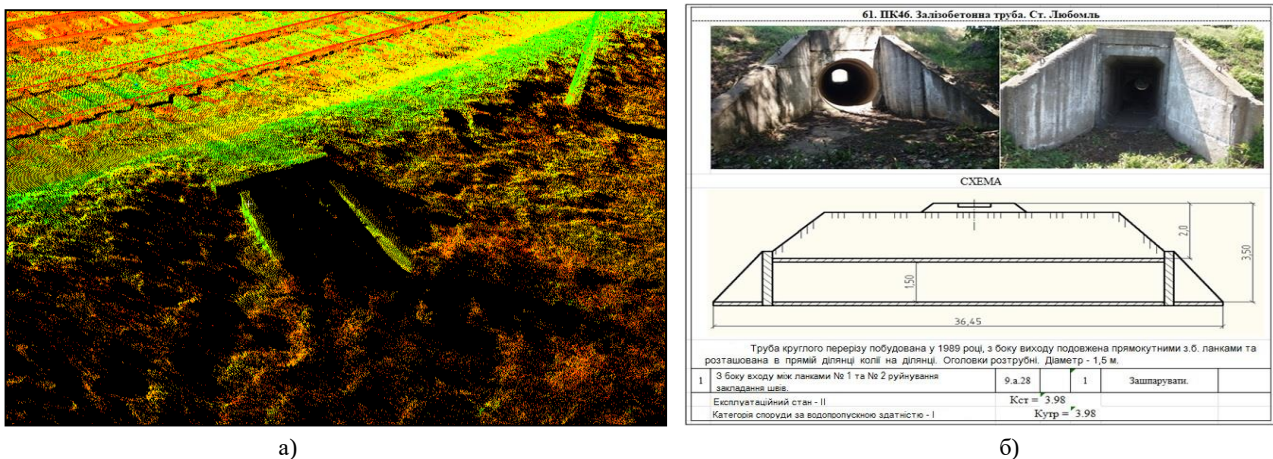


Рис. 11. Формування картки штучних споруд: а – зображення залізобетонної труби, отримане з мобільного лазерного сканера; б – фінальна картка залізобетонної труби

Отже, основною перевагою лазерного сканування є візуальний складник: інженер має доступ до тривимірного цифрового двійника штучної споруди, його реальних розмірів і фотознімка. Основним недоліком дослідження штучних споруд на основі інформації мобільного лазерного сканування є неповнота метричних показників, пов'язана з особливостями розташування штучних споруд та їх конфігурацією.

Наступним етапом є оброблення результатів наземного лазерного сканування. Під час попереднього зшивання даних на польовому планшеті в процесі їх імпорту створено певні зв'язки між матеріалами сканування, які можна оптимізувати. Аналогічно створюють нові зв'язки для підвищення точності та достовірності інформації. Зазначимо, що точність зшивки даних наземного лазерного не перевищувала 25 мм, але внаслідок накладання цієї інформації на дані, отримані від мобільного

лазерного сканера, точність підсумкових результатів суттєво підвищена, що забезпечило розбіжність не більше ніж 3 мм.

Згідно із функціональною схемою (рис. 6) оброблені результати мобільного та наземного лазерного сканування разом із панорамними зображеннями завантажено на вебсервіс *Bentley Orbit 3D Mapping Cloud*. До ресурсу хмарного зберігання завантажено 16402 панорамних фотознімків і "зшити" хмару точок від мобільного та наземного лазерного сканування завдовжки близько 90 км.

Особливе значення в разі камерального оброблення даних належить створенню звітних матеріалів за результатами інженерно-геодезичних вишукувань, що, як зазначалося раніше, суттєво спрощується завдяки застосуванню матеріалів лазерного сканування. На рис. 11 вже наведено приклад формування картки штучної споруди, розглянемо як формуються інші звітні документи.

Важливим видом робіт із дослідження об'єктів залізничної інфраструктури є вивчення стану залізничного полотна зі створенням реального поперечного профілю та порівняння його з проєктними даними [12, 15]. Поперечний профіль залізничного полотна – кресленик, що ілюструє результат поперечного перерізу вертикальною площиною, перпендикулярною до осі рейкових колій. Роботу над створенням цього кресленика здійснено із застосуванням двох систем автоматизованого проєктування – *Leica Cyclone* і *Autodesk AutoCAD*: перше використано для оброблення хмари точок (очищення від шумів, створення перерізів, зшивання станцій), а друге – для створення інженерних креслеників за чинними нормами та правилами.

На рис. 12 наведено приклад дешифрування об'єктів поперечного профілю залізничного полотна на поперечному перерізі хмари точок, у цьому разі панорамні фотознімки значно пришвидшили процес дешифрування об'єктів як на загальній хмарі точок, так і на її поперечному перерізі. Також порівняно створені кресленики на вказаних пікетах із проєктними поперечними профілями залізничного полотна, що були надані замовником. Фрагмент одного із креслеників поперечного профілю залізничного полотна зображений на рис. 13, де червоною лінією позначено проєктні дані, а чорною – фактичний поперечний профіль залізничного полотна на ділянці дослідження.

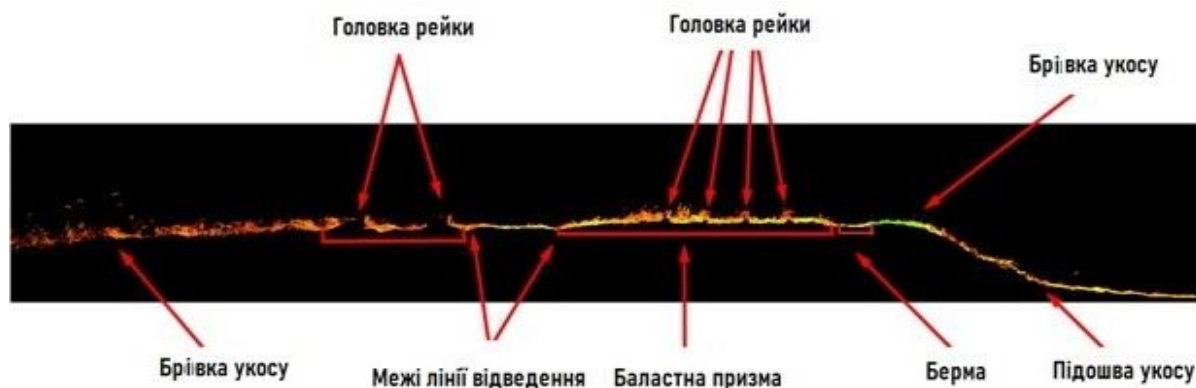


Рис. 12. Процес дешифрування елементів поперечного перерізу залізничного полотна

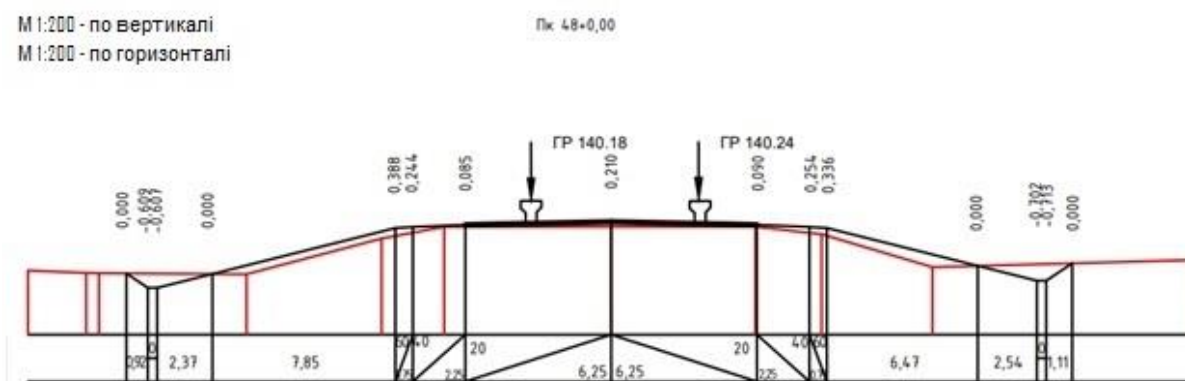


Рис. 13. Фрагмент кресленика поперечного перерізу залізничного полотна

Особливим видом робіт у геодезичних вишукуваннях є розроблення топографічних планів, що суттєво спрощується за умови використання результатів сканування [20, 21]. У цьому разі на основі хмари точок застосовують палітру інтенсивності відбиття, що з огляду на індивідуальний показник відбиття лазерного променя від певного матеріалу полегшує дешифрування об'єктів і зменшує кількість

похибок за умови векторизації даних. Векторизацію елементів залізничної інфраструктури здійснено в програмному забезпеченні *Leica Cyclone*, після чого експортовано до *Autodesk AutoCAD* для оформлення топографічного плану. Зазначимо, що для створення окремих висотних позначок плану використано ручну розстановку точок висотних позначок на хмарі точок. Далі результатам векторизації призначено умовні

позначки відповідно до обраного класифікатора, нанесено координатні перехрестя, контури ізоліній і розташовано кресленики на аркушах різних форматів

для подання моделі поверхні залізничного полотна у вигляді топографічного плану. Фрагмент топографічного плану проекту зображено на рис. 14.

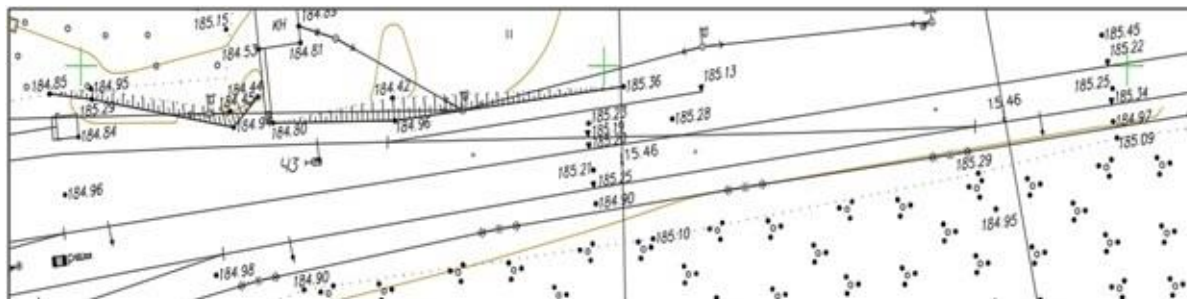


Рис. 14. Фрагмент кресленика топографічного плану

### Планування розкладу проекту інженерно-геодезичних вишукувань залізничної інфраструктури

Особливе значення в інженерно-геодезичних вишукуваннях належить підготовчому етапу, спрямованому на формування програми вишукувань [14, 16]. Застосування розроблених функціональних моделей та схем (рис. 5, 6) прискорює планування проекту, оцінювання його тривалості, створення розкладу, виокремлення "критичних" робіт тощо, адже вони не лише визначають операції польового та камерального етапів, а, спираючись на логіку їх виконання, формалізують послідовність їх проведення.

На підготовчому етапі під час планування проекту особливу увагу приділяють оцінюванню його часових характеристик. Тут початковим кроком

є планування обсягів робіт із застосуванням моделі та схеми виконання етапів проекту.

Для отримання відповідей на запитання щодо термінів завершення проекту, календарних строків проведення окремих робіт, часового розподілу ресурсів у процесі їх виконанні тощо розробляють моделі розкладу, наприклад, за допомогою методів сіткового планування – аналізу термінів початку та завершення частин проекту, що поєднують виконання в часі різних операцій та етапів для формування прогнозу щодо загальної тривалості реалізації всього проекту [29].

Спираючись на розроблені функціональні модель та схему (рис. 5, 6), сформуємо перелік робіт. Пам'ятаючи, що плануємо польовий і камеральний етапи інженерно-геодезичних вишукувань, цей перелік передбачає (табл. 1):

Таблиця 1. Перелік робіт та зв'язків між ними

| Перелік робіт проекту |                                                                  | Попередні роботи | Тривалість роботи, дні |
|-----------------------|------------------------------------------------------------------|------------------|------------------------|
| Код роботи            | Назва роботи                                                     |                  |                        |
| A                     | Рекогносрування                                                  | –                | 1                      |
| B                     | Закладання пунктів планово-висотної основи                       | A                | 3                      |
| C                     | Монтування базових станцій                                       | –                | 1                      |
| D                     | Визначення траєкторії та мобільне лазерне сканування             | B, C             | 3                      |
| E                     | Попереднє оброблення результатів мобільного лазерного сканування | D                | 1                      |
| F                     | Наземне лазерне сканування                                       | E                | 5                      |
| G                     | Тахеометрична зйомка                                             | E                | 4                      |
| H                     | Попереднє оброблення результатів наземного лазерного сканування  | F                | 1                      |
| I                     | Попереднє оброблення результатів тахеометричної зйомки           | G                | 1                      |
| J                     | Систематизація накопичених даних                                 | E, H, I          | 2                      |
| K                     | Опрацювання даних наземного лазерного сканування                 | J                | 3                      |
| L                     | Обробка панорамних зображень                                     | J                | 1                      |
| M                     | Опрацювання даних тахеометричної зйомки                          | J                | 1                      |
| N                     | Опрацювання даних мобільного лазерного сканування                | L                | 2                      |
| O                     | Поєднання даних                                                  | K, N, M          | 2                      |
| P                     | Завантаження даних до вебсервісу                                 | O                | 3                      |
| Q                     | Векторизація даних                                               | P                | 30                     |
| R                     | Оформлення звітних матеріалів                                    | Q                | 5                      |

– на польовому етапі: рекогностування, закладання пунктів планово-висотної основи, монтування базових станцій, визначення траєкторії, мобільне лазерне сканування, попереднє оброблення результатів мобільного лазерного сканування, наземне лазерне сканування, тахеометрична зйомка, попереднє оброблення результатів наземного лазерного сканування, попереднє оброблення результатів тахеометричної зйомки, систематизація накопичених даних;

– на камеральному етапі: опрацювання інформації наземного лазерного сканування, оброблення панорамних зображень, опрацювання даних мобільного лазерного сканування, опрацювання матеріалів тахеометричної зйомки, поєднання результатів, завантаження їх до вебсервісу, векторизація даних та оформлення звітних матеріалів.

Зважаючи на логіку виконання етапів, додатково створимо перелік попередніх робіт (що забезпечують подальші роботи, без яких їх виконання є неможливим), які, зрештою, розкривають причинно-наслідкові зв'язки виконання проєкту (табл. 1).

Індивідуально для наведеного прикладу встановлюємо тривалість робіт. Це значення може визначитися з огляду на наявний досвід здійснення подібних проєктів або експертним способом [29]. Також необхідно взяти до уваги, що реалізація певних робіт суттєво залежить від технічних засобів і можливостей. На тривалість завантаження

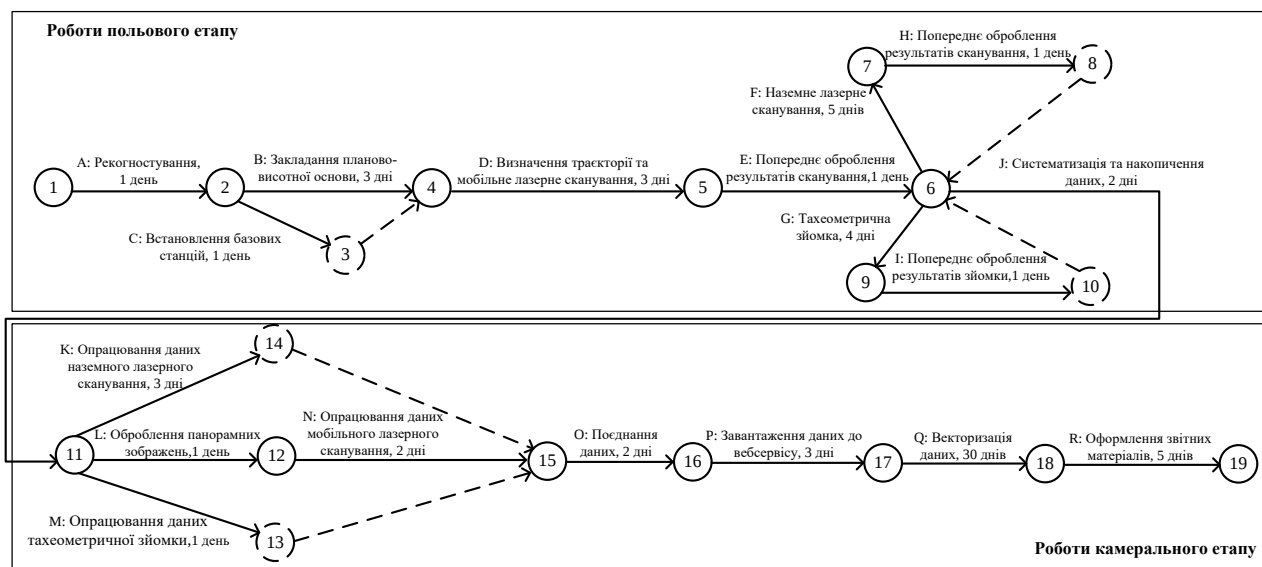
інформації до вебсервісу насамперед впливає швидкість інтернет-під'єднання та його надійність. Наприклад, для проєкту, що розглядається, завантаження його даних до вебсервісу обсягом близько 500 ГБ тривало повну добу (24 год), а підготовка даних до завантаження становила приблизно три робочих дні. Також зазначимо, що визначення тривалості робіт проєкту відбувається з огляду на кількість співробітників, що беруть участь у інженерно-геодезичних вишукуваннях. Наприклад, для здійснення досліджуваного проєкту виходили з припущення, що до нього можна залучити польову бригаду з п'яти інженерів-геодезистів, а також камеральний відділ з 10 картографів.

Для подальшого планування, прогнозування термінів виконання проєкту, знаходження його критичних робіт (шляху) за табл. 1 методом *Arrow Diagramming* [29] будемо сіткову модель (рис. 15). Ця модель поєднує роботи польового та камерального етапів, перелік і послідовність виконання яких подано в табл. 1, а значення тривалості робіт, встановлене для конкретного проєкту та загалом, може змінюватися.

За сітковою моделлю проєкту бачимо, що максимальний за тривалістю шлях – критичний – визначається такою послідовністю робіт:

*A-B-D-E-F-H-J-L-N-O-P-Q-R*,

де вказано найбільш тривалі роботи, що впливають на загальну тривалість проєкту. Для проєкту, що розглядається, ця тривалість сягає 59 днів.



**Рис. 15.** Сіткова модель проєкту інженерно-геодезичних вишукувань ділянки залізниці в західній частині Волинської області, складена за розробленими функціональними моделлю та схемою

### Висновки й перспективи подальшого розвитку

Результати діяльності АТ "Українська залізниця" підтверджують, що це транспортне підприємство є лідером галузі, але попри високі перспективи розвитку модернізація та утримання транспортної інфраструктури вимагає значних коштів, що в умовах воєнного стану стає значною проблемою. Це спонукає до необхідності впровадження сучасних технологій та інновацій, зокрема під час проведення вишукувань об'єктів залізниці, основаних на передових методах збирання інформації про місцевість.

Результати бібліографічного пошуку підтверджують підвищення ефективності виконання геодезичних вишукувань за допомогою застосування сучасних ГІС-технологій, але аналіз чинної нормативної бази з цього напрямку показав, що їх упровадження у вишукуваннях рекомендовано, але не регламентовано. Це потребує створення документів для здійснення контролю за методиками реалізації та якістю інженерно-геодезичних вишукувань із використанням сучасних ГІС-технологій.

Розроблено DFD-діаграму, що узагальнює та формалізує процес інтеграції матеріалів, отриманих під час вишукування з упровадженням ГІС-технологій, до банку геоданих країни. Спираючись на неї, формалізовано роботи польового та камерального етапів. Зокрема з використанням нотації методології IDEF3, що формалізує інформаційні процеси за допомогою фіксації їх основних об'єктів і логічно-часових зв'язків між ними, структуровано перелік

робіт польового етапу та визначено їх логічно-часову послідовність, а також систематизовано інформаційні потоки між роботами, які виникають у процесі модернізації об'єктів залізничної інфраструктури під час отримання топографо-геодезичних матеріалів. Також створено функціональну схему камерального оброблення матеріалів інженерно-геодезичних вишукувань, яка звертає увагу на потоках даних, їх типах і джерелах отримання. З огляду на те, що перелік операції цього етапу, їх послідовність та особливості залежать від застосованих ГІС-інструментів і відповідного програмного забезпечення, схему складено за умови використання обладнання від компанії *Leica*.

Експериментальним способом перевірено розроблені функціональні моделі на прикладі проєкту дослідження залізничного полотна та прилеглої місцевості в напрямку Ковель – Ягодин – кордон. Ефективність запропонованого підходу та розробленого науково-методичного забезпечення інформаційної підтримки проєктів модернізації об'єктів залізничної інфраструктури підтверджено за сприянням НВП "Навігаційно-геодезичний центр" (<https://ngc.com.ua/>). Зокрема систематизація та структуризація потоків даних, алгоритмізація діяльності на польовому та камеральному етапах спрощує планування проєктів виконання вишукувань, збільшує інформативність отриманих матеріалів дослідження за умови одночасного зменшення часових витрат на проведення робіт, підвищує точність геометричних і геодезичних параметрів місцевості.

Роботу виконано за підтримки Міністерства освіти і науки України (державний реєстраційний номер проєкту 0122U002298), а також Регіонального центру космічного моніторингу Землі "Слобожанщина".

**Внесок авторів.** Аналіз загального стану залізничної інфраструктури України та результатів діяльності АТ "Українська залізниця" – **А.С. Нечаусов, А.С. Прийма**; огляд та аналіз нормативно-правової бази, що регламентує геодезичні вишукування на об'єктах залізничної інфраструктури, та сучасних досягнень цієї сфери – **С.Ю. Даншина, С.М. Андрєєв**; розроблення концептуальних положень дослідження – **С.Ю. Даншина, С.І. Горелик**; практична апробація результатів статті – **А.С. Прийма**; аналіз результатів дослідження – **С.І. Горелик, А.С. Нечаусов**; адміністрування проєкту – **С.М. Андрєєв**.

Усі автори прочитали та погодились з опублікованою версією рукопису.

### Список літератури

1. Дорожня карта використання науки, технологій та інновацій для досягнення цілей Сталого розвитку [Online]. URL: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2024/01/03/Dorozhnya.karta.vykoryst.nauky.tekhnolohiy.ta.innovatsiy-03.01.2024-1.1.pdf> – 5.01.2024.
2. Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки: Закон України від 11 липня 2001 р., № 2623-IX. *Відомості Верховної Ради України*. 2001. № 48. Ст. 253 (зі змінами).

3. Danshyna S., Nechausov A., Andrieiev S. Information technology of transport infrastructure monitoring based on remote sensing data. *Radio Electronics, Computer Science, Control*. №. 4 (63). 2022. P. 86 – 97. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-7>
4. Транспорт України / за ред. І. Петренко. Київ: Державна служба статистики, 2022. 114 с.
5. Impact of high-speed railway construction on spatial patterns of regional economic development along the route: A case study of the Shanghai–Kunming high-speed railway / Ch. Wang [at el.]. *Socio-Economic Planning Sciences*. 2023. Vol. 87, Part B. Article 101583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101583>
6. Ren Y., Tian Yu., Xiao X. Spatial effects of transportation infrastructure on the development of urban agglomeration integration: Evidence from the Yangtze River Economic Belt. *Journal of Transport Geography*. 2022. Vol. 104, Part B. Article 103431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103431>
7. Zhao J., Guo Yu. Study on the Influence of Chengdu-Chongqing High Speed Railway on the Economic Development of Neijiang City. *Procedia Computer Science*. 2022. Vol. 199. P. 858 – 865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.107>
8. Інформація про Українські залізниці [Online]. URL: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zaliznici.html> (дата звернення 25.12.2023).
9. Даценко В., Гречуха Д. Відбудова залізничного транспорту повоєнної України. Київ: Transparency International Ukraine, 2023. 27 с.
10. Innovative Trends in Railway Condition Monitoring / I. Bondarenko, V. Lukoševičius, R. Keršys, L. Neduzha. *Transportation Research Procedia*. 2024. Vol. 77. P. 10 – 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002>
11. An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies / A.M. Alani [at el.]. *NDT & E International*. 2020. Vol. 115. Article 102288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288>
12. Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges / F. D'Amico, V. Gagliardi, L. B. Ciampoli, F. Tosti. *NDT & E International*. 2020. Vol. 115. Article 102291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102291>
13. Про топографо-геодезичну та картографічну діяльність: Закон України від 26 січня 1999 р., № 353-XIV. *Офіційний вісник України*. 1999. № 3. Ст. 91. С. 2.
14. ДБН А.2.1-1-2008. Вишукування. Інженерні вишукування для будівництва [На заміну СНиП 1.02.07-87; чинний від 2008-07-01]. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. 76 с.
15. Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots / G. Jing, X. Qin, H. Wang, Ch. Deng. *Automation in Construction*. 2022. Vol. 138. Article 104242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104242>
16. Даншина С.Ю., Андрєєв С.М. Дистанційне зондування як ефективний інструмент проектування доріг. *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. 2023. № 2. С. 75 – 84. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.2.08>
17. GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights / M. Rasol [at el.]. *Construction and Building Materials*. 2022. Vol. 324. Article 126686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>
18. Butenko O., Horelik S., Zynyuk O. Geospatial data processing characteristics for environmental monitoring tasks. *Architecture civil engineering environment*. 2020. Vol. 13, Issue1. P. 103 – 114. DOI: <https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-008>
19. Road extraction in remote sensing data: A survey / Z. Chen [at el.]. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2022. Vol. 112. Article no. 102833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102833>
20. Eker R. Comparative use of PPK-integrated close-range terrestrial photogrammetry and a handheld mobile laser scanner in the measurement of forest road surface deformation. *Measurement*. 2023. Vol. 206. Article no. 112322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112322>
21. An Automatic Road Surface Segmentation in Non-Urban Environments: A 3D Point Cloud Approach with Grid Structure and Shallow Neural Networks / M. Dowajy, Á. J. Somogyi, Á. Barsi, T. Lovas. *IEEE Access*. 2024. Article no. 3372431. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3372431>
22. Про національну інфраструктуру геопросторових даних: Закон України від 13 квітня 2020 р., № 554-IX. *Відомості Верховної Ради*. 2020. № 37. Ст. 277.
23. GNSS, IMU, camera and LIDAR technology characterization for railway ground truth and digital map generation / O.G. Crespillo [at el.]. *Transportation Research Procedia*. 2023. Vol. 72. P. 1029 – 1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.532>
24. Kampczyk A., Dybel K. Integrating surveying railway special grid pins with terrestrial laser scanning targets for monitoring rail transport infrastructure. *Measurement*. 2021. Vol. 170. Article 108729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108729>
25. Handbook of Optical and Laser Scanning [Online] / edited by G. F. Marshall, G. E. Stutz. CRC Press, 2018. 778 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315218243>
26. Leica-PegasusTwoUltimate-DataSheet-0620 [Online]. URL: [https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/mobilni-mapovani/backpack/leica\\_pegasusbackpack\\_ds.pdf](https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/mobilni-mapovani/backpack/leica_pegasusbackpack_ds.pdf) (дата звернення 15.02.2024).
27. Leica Cyclone Basic User Manual-01 [Online]. URL: <https://www.sdm.co.th/pdf/Cyclone%20Basic%20Tutorial> (дата звернення 15.02.2024).

28. Autodesk AutoCAD Basic User Manual-014 [Online]. URL: <https://images.autodesk.com/adsk/files/> (дата звернення 15.02.2024).
29. Application of Relationship Diagramming Method (RDM) for Resource-constrained Scheduling of Linear Construction Projects / J.U. Maheswari, V. P. Charlesraj, A. Goyal, P. Mujumdar. *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 123. P. 308 – 315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.095>

## References

1. *Dorozhnia karta vykorystannia nauky, tekhnolohii ta innovatsii dlia dosiahnennia tsilei Staloho rozvytku* [A roadmap for the use of science, technology and innovation to achieve the goals of Sustainable Development] available at: <https://mon.gov.ua/storage/app/media/news/2024/01/03/Dorozhnya.karta.vykoryst.nauky.tekhnolohiy.ta.innovatsiy-03.01.2024-1.1.pdf> (accessed 05.01.2024).
2. *On Priority Branches of Science and Technology Development*: Law of Ukraine of 11 July 2001, no. 2623-IX, Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy, 2001, no. 48, art. 253 (In Ukrainian).
3. Danshyna, S., Nechausov, A., Andrieiev, S. (2022), "Information technology of transport infrastructure monitoring based on remote sensing data", *Radio Electronics, Computer Science, Control*, no. 4 (63), P. 86 – 97. DOI: <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2022-4-7>
4. *Transport Ukrainy*: [Transport of Ukraine] (2022) / edited by I. Petrenko. Kyev : State Statistics Service of Ukraine. (In Ukrainian).
5. Wang, Ch., Chen, J., Li, B., Chen, N., Wang, W. (2023), "Impact of high-speed railway construction on spatial patterns of regional economic development along the route: A case study of the Shanghai–Kunming high-speed railway", *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 87, part b, article 101583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seps.2023.101583>
6. Ren Y., Tian, Yu., Xiao, X. (2022), "Spatial effects of transportation infrastructure on the development of urban agglomeration integration: Evidence from the Yangtze River Economic Belt", *Journal of Transport Geography*, vol. 104, part b, article 103431. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2022.103431>
7. Zhao, J., Guo, Yu. (2022), "Study on the Influence of Chengdu-Chongqing High Speed Railway on the Economic Development of Neijiang City", *Procedia Computer Science*, Vol. 199, P. 858 – 865. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2022.01.107>
8. Informatsiia pro Ukrainski zaliznytsi [Restoration of railway transport in post-war Ukraine]. available at: <https://mtu.gov.ua/content/informaciya-pro-ukrainski-zalznici.html>. (accessed 25.12.2023)
9. Datsenko, V., Hrechukha, D. (2023), *Vidbudova zaliznychnoho transportu povoiennoi Ukrainy*: [Restoration of railway transport in post-war Ukraine]. Kyev : Transparency International Ukraine, (In Ukrainian)
10. Bondarenko, I., Lukoševičius, V., Keršys, R., Neduzha, L. (2024), "Innovative Trends in Railway Condition Monitoring", *Transportation Research Procedia*, vol. 77, pp. 10 – 17. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2024.01.002>
11. Alani, A. M., Tosti, F., Ciampoli, L. B., Gagliardi, V., Benedetto, A. (2020). "An integrated investigative approach in health monitoring of masonry arch bridges using GPR and InSAR technologies", *NDT & E International*, Vol. 115, article 102288. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102288>
12. D'Amico, F., Gagliardi, V., Ciampoli, L. B., Tosti F. (2020), "Integration of InSAR and GPR techniques for monitoring transition areas in railway bridges", *NDT & E International*, vol. 115, article 102291. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ndteint.2020.102291>
13. *On Topographic, Geodesic and Cartographic Activity*: Law of Ukraine of 26 January 1999, no. 353-XIV. Ofitsiinyi visnyk Ukrainy, 1999, no. 3, art. 91, 2 p. (In Ukrainian).
14. *Building Code A.2.1-1-2008. Survey. Engineering survey is in building*. Kyiv, Ministry of Regional Construction of Ukraine, 2008. 76 p. (In Ukrainian).
15. Jing, G., Qin, X., Wang, H., Deng, Ch. (2022), "Developments, challenges, and perspectives of railway inspection robots", *Automation in Construction*, Vol. 138, article 104242. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104242>
16. Danshina, S., Andreev, S. (2023), "Remote sensing as an effective tool for road design", *Aviation and space technology and technology*, Mo. 2, P. 75 – 84. DOI: <https://doi.org/10.32620/aktt.2023.2.08>
17. Rasol, M., Pais, J. C., Pérez-Gracia, V., Solla, M., Fernandes, F. M., Fontul, S. (2022), "GPR monitoring for road transport infrastructure: A systematic review and machine learning insights", *Construction and Building Materials*, Vol. 324, article 126686. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126686>
18. Butenko, O., Horelik, S., Zynyuk, O. (2020), "Geospatial data processing characteristics for environmental monitoring tasks", *Architecture civil engineering environment*, vol. 13, issue1, P. 103 – 114. DOI: <https://doi.org/10.21307/ACEE-2020-008>

19. Chen, Z., Deng, L., Luo, Yu., Li, D., Junior, J.M., Goncalves, W.N., Nurunnabi, A.A., Li, J., Wang, Ch. (2022), "Road extraction in remote sensing data: A survey", *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 112, article No. 102833. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102833>
20. Eker, R. (2023). "Comparative use of PPK-integrated close-range terrestrial photogrammetry and a handheld mobile laser scanner in the measurement of forest road surface deformation", *Measurement*, Vol. 206, article No. 112322. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112322>
21. Dowajy, M., Somogyi, Á. J., Barsi, Á., Lovas, T. (2024), "An Automatic Road Surface Segmentation in Non-Urban Environments: A 3D Point Cloud Approach with Grid Structure and Shallow Neural Networks", *IEEE Access*, article no. 3372431. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2024.3372431>
22. *On National Geospatial Data Infrastructure: Law of Ukraine of 13 April 2020*, no. 554-IX. Vidomosti Verkhovnoi Rady, 2020, No. 37, art. 227. (In Ukrainian).
23. Crespillo, O. G., Kliman, A., Neri, A., Vennarini, A., Ruggeri, A., Marais, J., Sabina, S. (2023), "GNSS, IMU, camera and LIDAR technology characterization for railway ground truth and digital map generation", *Transportation Research Procedia*, 2023, Vol. 72, P. 1029 – 1036. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2023.11.532>
24. Kampczyk, A., Dybeł, K. "Integrating surveying railway special grid pins with terrestrial laser scanning targets for monitoring rail transport infrastructure", *Measurement*, 2021, Vol. 170, article 108729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108729>
25. *Handbook of Optical and Laser Scanning* (2018) / edited by G.F. Marshall, G.E. Stutz, CRC Press. DOI: <https://doi.org/10.1201/9781315218243>
26. *Leica-PegasusTwoUltimate-DataSheet-0620*. available at: [https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/mobilni-mapovani/backpack/leica\\_pegasusbackpack\\_ds.pdf](https://www.gefos-leica.cz/data/original/skenery/mobilni-mapovani/backpack/leica_pegasusbackpack_ds.pdf) (Accessed 15 February 2024).
27. *Leica Cyclone Basic User Manual-01*. available at: <https://www.sdm.co.th/pdf/Cyclone%20Basic%20Tutorial> (Accessed 15 February 2024).
28. *Autodesk AutoCAD Basic User Manual-014*. available at: <https://images.autodesk.com/adsk/files/> (Accessed 15 February 2024).
29. Maheswari, J.U., Charlesraj, V.P., Goyal, A., Mujumdar P. (2015), "Application of Relationship Diagramming Method (RDM) for Resource-constrained Scheduling of Linear Construction Projects", *Procedia Engineering*, Vol. 123, P. 308 – 315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2015.10.095>

Надійшла (Received) 14.10.24

#### *Відомості про авторів / About the Authors*

**Даншина Світлана Юрійвна** – доктор технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", професор кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: [s.danshyna@khai.edu](mailto:s.danshyna@khai.edu); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7354-4146>

**Андрєєв Сергій Михайлович** – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: [s.andreev@khai.edu](mailto:s.andreev@khai.edu); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-4256-2637>

**Горелик Станіслав Ігорович** – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: [s.horelik@khai.edu](mailto:s.horelik@khai.edu); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3640-2787>

**Нечаусов Артем Сергійович** – кандидат технічних наук, Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", доцент кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: [a.nechausov@khai.edu](mailto:a.nechausov@khai.edu); ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7216-5566>

**Прийма Андрій Сергійович** – Національний аерокосмічний університет "Харківський авіаційний інститут", магістр кафедри геоінформаційних технологій та космічного моніторингу Землі, Харків, Україна; e-mail: [priimandrei@gmail.com](mailto:priimandrei@gmail.com)

**Danshyna Svitlana** – Doctor of Sciences (Engineering), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

**Andriev Sergey** – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

**Horelyk Stanislav** – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

**Nechausov Artem** – PhD (Engineering Sciences), National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Associate Professor at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

**Pryima Andrii** – National Aerospace University "Kharkiv aviation institute", Master at the Department of Geo-information Technologies and Space Monitoring of the Earth, Kharkiv, Ukraine.

## GEOINFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENGINEERING AND GEODETIC SURVEYS IN THE MODERNISATION OF RAILWAY INFRASTRUCTURE IN UKRAINE

The **subject** of the study is remote methods of engineering and geodetic surveys in the modernisation of railway infrastructure in Ukraine. The **purpose** of the study is to increase the efficiency of engineering and geodetic surveys of railway infrastructure facilities in Ukraine through the use of modern geographic information system technologies. **Objectives:** To analyse the general state of the railway infrastructure of Ukraine in order to identify possible areas for its improvement; to study the existing regulatory framework governing engineering and geodetic surveys at railway infrastructure facilities during their modernisation; to evaluate the capabilities of modern GIS technologies in solving certain survey tasks; to formalize the processes of field and desk-based surveys; to work out the developed functional models in practice. **Results.** The results of the activities of JSC "Ukrainian Railways" show that it is the industry leader, but, despite its high development prospects, the modernisation and maintenance of railway infrastructure requires significant funds, which is a significant problem in the context of martial law. This requires the involvement of modern technologies and innovations, in particular, when conducting surveys of railway facilities. The article investigates the possibilities of modern GIS technologies in carrying out engineering and geodetic surveys at railway infrastructure facilities, the links between them, as well as their disadvantages and advantages. The analysis of the current regulatory framework in this area has shown that the use of GIS technologies in surveys is recommended, but not regulated. A DFD diagram has been developed that summarises and formalises the process of integrating materials obtained during surveys using GIS technologies into the country's geodatabase. Based on this diagram, the work of the field and cameral workstages was formalised. The developed functional models were tested empirically, using the example of a project to study the railway track and the surrounding situation on the ground in the direction of Kovel-Yahodyn-Border. It is shown how the proposed models accelerate the planning of such projects. **Conclusions:** The practical application of the developed functional models increases the efficiency of engineering and geodetic surveys at railway infrastructure facilities. In particular, the systematisation and structuring of data flows, algorithmisation of activities during the field and desk-based stages simplifies the planning of survey projects, increases the information content of the survey materials obtained while reducing the time spent on the work, and improves the accuracy of obtaining geometric and geodetic parameters of the area.

**Keywords:** information process; functional modeling; data flows; laser scanning; stages of engineering and geodetic surveys; Leica GIS tools.

### *Бібліографічні описи / Bibliographic descriptions*

Даншина С. Ю., Андрєєв С. М., Горелик С. І., Нечаусов А. С., Прийма А.С. Геоінформаційні технології для інженерно-геодезичних вишукувань у процесі модернізації залізничної інфраструктури України. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2024. № 4 (30). С. 39–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.039>

Danshyna, S., Andrieiev, S., Horelyk, S., Nechausov, A., Pryima, A. (2024), "Geoinformation technologies for engineering and geodetic surveys in the modernisation of railway infrastructure in Ukraine", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 4 (30), P. 39–58. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2024.4.039>

---