

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Київський національний університет будівництва і архітектури

**ВИПУСК 62, 2015**

# **ІНЖЕНЕРНА ГЕОДЕЗІЯ**

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

*Заснований у 1965 році*

*Свідоцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації  
Серія КВ № 4185 від 10 травня 2000 р.*

У збірнику висвітлюються актуальні питання:

- теорії і практики геодезії
- інженерної геодезії
- фотограмметрії та дистанційного зондування
- геоінформаційних систем і технологій
- картографії
- землеустрою і кадастру
- містобудування і управління територіями
- прикладної математики

*Постановою президії ВАК України №1-05/3 від 10 квітня 2010 року збірник наукових праць «Інженерна геодезія» включено до «Переліку фахових видань України», в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук*

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор*

*Затверджено до друку вченою радою Київського національного університету  
будівництва і архітектури  
(протокол №40 від 25.12.15)*

**Адреса редакційної колегії:  
Україна, 03680, м. Київ,  
Повітрофлотський пр., 31  
Тел.: +38(044)249-72-51;  
+38(044)241-54-71;  
+38(044)241-55-69  
e-mail: eng\_geodesy@meta.ua**

© Київський національний університет будівництва і архітектури, 2015

УДК 528 I-62

**РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ**

Відповідальний редактор **Степан ВОЙТЕНКО**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерної геодезії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

Заступник відповідального редактора **Сергій МОГИЛЬНИЙ**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри геоінформатики і геодезії (Донецький національний технічний університет, Донецьк, **Україна**)

Відповідальний секретар **Володимир СТАРОВЄРОВ**, канд. техн. наук, професор, професор кафедри інженерної геодезії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Члени редколегії****Міжнародні члени редколегії**

**Чесловас АКСАМІТАУСКАС**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри геодезії і кадастру (Вільнюський державний технічний університет, Вільнюс, **Литва**)

**Михайло БРИНЬ**, канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри інженерної геодезії (Петербурзький державний університет шляхів сполучення, Санкт-Петербург, **Росія**)

**Святослав ЛЕБЕДЕВ** д-р техн. наук, професор, професор кафедри вищої геодезії (Московський державний університет геодезії і картографії, Москва, **Росія**)

**Томас ЛУМАНН**, д-р габілітований, професор, директор інституту (Університет прикладних наук, Інститут прикладної фотограмметрії і геоінформатики, Ольденбург, **Німеччина**)

**Мурат МУСТАФІН**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерної геодезії (Національний мінерально-сировинний університет «Горный», Санкт-Петербург, **Росія**)

**Володимир СЕРЕДОВИЧ** канд. техн. наук, професор, проректор з наукової роботи та інноваційної діяльності (Сибірська державна геодезична академія, Новосибірськ, **Росія**)

**Олександр ЧІБУНІЧЕВ** д-р техн. наук, професор, проректор (Московський державний університет геодезії і картографії, Москва, **Росія**)

**Василь ШЛАПАК**, канд. техн. наук, професор, професор кафедри геодезії (Московський державний університет геодезії і картографії, Москва, **Росія**)

**Андрій ШОЛОМИЦЬКИЙ**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри інженерної геодезії та маркшейдерської справи (Сибірська державна геодезична академія, Новосибірськ, **Росія**)

**Павел ВІСЛГОШ** д-р філософії, професор, заступник декана з досліджень та співробітництва (Вармінсько-Мазурський університет, Ольштин, **Польща**)

**Хуан ФАН** д-р філософії, доцент, департамент міського планування та навколишнього середовища, відділ геодезії (Шведський Королівський технологічний інститут, Стокгольм, **Швеція**)

**Члени редколегії з України**

**Ігор ГЛАДКИХ**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри гідрографії та морської геодезії (Одеська національна морська академія, **Одеса**)

**Іван ЗАЄЦЬ**, канд. техн. наук, начальник управління (Державне агенство земельних ресурсів України, **Київ**)

**Олег КУЧЕР**, канд. техн. наук, перший заступник директора з наукової роботи (Науково-дослідний інститут геодезії і картографії, **Київ**)

**Валентин ЛИПСЬКИЙ** канд. техн. наук, доцент, начальник відділу ([Державне підприємство] Центр Державного земельного кадастру, **Київ**)

**Сергій МОГИЛЬНИЙ**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри геоінформатики і геодезії (Донецький національний технічний університет, **Донецьк**)

**Ігор ТРЕВОГО**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри геодезії (Національний університет «Львівська політехніка», **Львів**)

**Корнелій ТРЕТЯК**, д-р техн. наук, професор, директор інституту геодезії (Національний університет «Львівська політехніка», **Львів**)

**Члени редколегії засновника**

**Степан ВОЙТЕНКО**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри інженерної геодезії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Юрій КАРПІНСЬКИЙ**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри геоінформатики і фотограмметрії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Володимир КАТУШКОВ**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри геоінформатики і фотограмметрії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Анатолій ЛЯЩЕНКО**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри геоінформатики і фотограмметрії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Ольга ПЕТРАКОВСЬКА**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри землеустрою і кадастру (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Віталій ПЛОСКИЙ** д-р техн. наук, професор, проректор з наукової роботи та міжнародних зв'язків (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Олександр САМОЙЛЕНКО**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри інженерної геодезії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Володимир СТАРОВЄРОВ**, канд. техн. наук, професор, професор кафедри інженерної геодезії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Валерій ЧИБІРЯКОВ**, д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри вищої математики (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

**Роман ШУЛЬЦ**, д-р техн. наук, професор, професор кафедри інженерної геодезії (Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, **Україна**)

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
Kyiv National University of Construction and Architecture

**ISSUE 62, 2015**

# **ENGINEERING GEODESY**

SCIENTIFIC AND TECHNICAL COLLECTION

*Founded in 1965*

*State Registration Certificate of print media  
KV series number 4185 from May 10, 2000*

**The book covers topical issues in**

- **theory and practice of surveying**
- **engineering geodesy**
- **photogrammetry and remote sensing**
- **geographic information systems and technology**
- **cartography**
- **land management and cadastre**
- **urban planning and management territories**
- **applied mathematics**

*Decisions of the Presidium of VAC of Ukraine  
№1 -05/3 from April 10, 2010 collection of scientific  
papers "Engineering geodesy" included in the "List  
of professional publications of Ukraine", in which  
can be published results of dissertations on  
competition doctor's degree and candidate of  
Science*

*Author is responsible for the reliability of facts, quotations and other information*

*Approved for publication by the Academic Council of the Kyiv National University of  
Construction and Architecture  
(Protocol №40 from 25.12.2015)*

**Editorial board address**  
**Ukraine, 03680, Kyiv,**  
**Povitroflotsky avenue, 31**  
**Tel.: +38(044)249-72-51;**  
**+38(044)241-54-71;**  
**+38(044)241-55-69**  
**e-mail: eng\_geodesy@meta.ua**

UDC 528

**EDITORIAL BOARD**

Editor-in-Chief **Stepan VOYTENKO**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Engineering Geodesy (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

Editor-in-Chief **Sergiy MOGIL'NIY**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Geoinformation and Geodesy (Donetsk national technical university, Donetsk, **Ukraine**)

Managing Editor **Volodymyr STAROVEROV**, Ph.D., Professor, Professor Department of Engineering Geodesy (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Editorial Members****Foreign Editorial Members**

**Cheslovas AKSAMITAUSKAS**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Geodesy and Cadastre (Vilnius Gediminas technical university, Vilnius, **Lithuania**)

**Michael BRYN'**, Ph.D, Professor, Head of Department of Engineering Geodesy (Petersburg state transport university, Saint Petersburg, **Russia**)

**Sviatoslav LEBEDEV** Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of High Geodesy (Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, **Russia**)

**Thomas LUMANN**, Dr. of Sciences, Professor, Head of the Institute (Jade University university of applied sciences, Institute for Applied Photogrammetry and Geoinformatics, Oldenburg, **Germany**)

**Murat MUSTAFIN**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Engineering Geodesy (National Mineral Resources University (University of Mines), Saint Petersburg, **Russia**)

**Vladimir SEREDOVICH**, Ph.D., Professor, Vice-rector (Siberian state geodesic academy, Novosibirsk, **Russia**)

**Alexander CHIBUNICHEV** Dr. of Sciences, Professor, Vice-rector (Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, **Russia**)

**Vasiliy SHLAPAK**, Ph.D, Professor, Professor Department of Geodesy (Moscow State University of Geodesy and Cartography, Moscow, **Russia**)

**Andriy SHOLOMICKIY**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Engineering Geodesy and mine surveying (Siberian state geodesic academy, Novosibirsk, **Russia**)

**Pawel WIELGOSZ**, Phd, Professor, Vice-Dean for research and cooperation (University of Warmia and Mazury, Olsztyn, **Poland**)

**Huaan FAN**, Ph.D, Senior lecturer, Department of Urban Planning and Environment, Geodesy division (KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, **Sweden**)

**Editorial Members from Ukraine**

**Igor GLADKIH**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Hydrography and Marine Geodesy (Odessa National Maritime Academy, **Odessa**)

**Ivan ZAEC'**, Ph.D, Director of Department (The State Agency for Land Resources of Ukraine, **Kiev**)

**Sergiy MOGIL'NIY**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Geoinformation and Geodesy (Donetsk national technical university, **Donetsk**)

**Oleg KUCHER**, Ph.D, Vice Director (Research institute of geodesy and cartography, **Kyiv**)

**Valentyn LIPSKIY**, Ph.D., Associate Professor, Director of Department (State enterprise «Center of the State land cadastr», **Kyiv**)

**Igor TREVOGO**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Geodesy (National university «Lviv Polytechnic», **Lviv**)

**Korniliy TRET'YAK**, Dr. of Sciences, Professor, Director Institute of Geodesy (National university «Lviv Polytechnic», **Lviv**)

**Editorial Members from Univesity**

**Stepan VOYTENKO**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Engineering Geodesy (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Volodymyr STAROVEROV**, Ph.D., Professor, Professor Department of Engineering Geodesy (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Yurij KARPINSKIY**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Geoinformation and Photogrammetry (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Volodymyr KATUSHKOV**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Geoinformation and Photogrammetry (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Anatoliy LYASCHENKO**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Geoinformation and Photogrammetry (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Olga PETRAKOVSKA**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Land Management and Cadastr (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Vitaliy PLOSKIY**, Dr. of Sciences, Professor, Vice-rector (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Olexander SAMOYLENKO**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Engineering geodesy (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Valeriy CHIBIRYAKOV**, Dr. of Sciences, Professor, Head of Department of Mathematics (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**Roman SCHULTZ**, Dr. of Sciences, Professor, Professor Department of Engineering Geodesy (Kyiv national university of construction and architecture, Kyiv, **Ukraine**)

**З М І С Т****ГЕОДЕЗІЯ**

1. *О.В. Кучер, В.С. Староверов, Г.С. Акчуріна* Сучасний підхід до вирівнювання нівелірної мережі України 7
2. *А.В. Островський* Критерій якості, точності і повноти цифрової моделі рельєфу 23
3. *К.Р. Третьяк, К.Б. Смолий, О.В. Серант* Дослідження ефективності урівноваження ГНСС-мереж 32
4. *В.М. Гладілін, П.О. Чуланов, Н.С. Шудра* Визначення моделі зміщення точок технологічного обладнання при деформаційних процесах 44
5. *Р.В. Шульц, М.В. Білоус, В.Я. Ковтун, Н.В. Куліченко, О.М. Гончерюк* Визначення кренів історичних споруд за методом наземного лазерного сканування 55

**КАДАСТР І МОНІТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ**

6. *В.К. Чибіряков, М.А. Малашевський, О.А. Бугаєнко* Вдосконалення методики розрахунку рівноцінних земельних ділянок сільськогосподарського призначення під час обміну 72
7. *Ю.М. Чобану* Структурна модель функціонування ринку житлової нерухомості 80

**ФОТОГРАММЕТРІЯ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

8. *О.Є. Куліковська, Ю.Ю. Атаманенко* Перспективи використання програм обробки даних лазерного сканування в картографуванні ДТП 91
9. *О.Л. Дорожнинский, Р.А. Абдаллах* Методика автоматического выделения дорог на спутниковых снимках 98
10. *В.И. Кортунов, А.А. Молчанов, И.А. Гергель* 3D-реконструкция объектов с помощью беспилотных систем 108
11. *Bezborodova K.* The use of UAVs for geospatial data collection 116
12. *Р.В. Шульц, П.Д. Крельштейн, І.А. Маліна, С.П. Войтенко* До питання розрахунку точності визначення координат точок під час аерофотознімання з безпілотних літальних апаратів 124

**ДО ВІДОМА АВТОРІВ**

137

---

**C O N T E N T S**

---

**GEODESY**

1. *O. Kucher, V. Staroverov, H. Akchurina* The modern approach to equalization leveling network of Ukraine 7
2. *A. Ostrovsky* Criteria of quality, accuracy and completeness digital elevation models 23
3. *K. Tretyak, K. Smoliy, O. Serant* Research efficiency adjustment for GNSS-networks 32
4. *V. Gladilin, P. Chulanov, N. Shudra* Determination of displacement of points is the result of the deformation of process equipment 44
5. *R. Schultz, N. Belous, V. Kovtun, N. Kulichenko, O. Honcheryuk* Determination of historic buildings rolls by terrestrial laser scanning 55

**CADASTRE AND MONITORING OF LANDS**

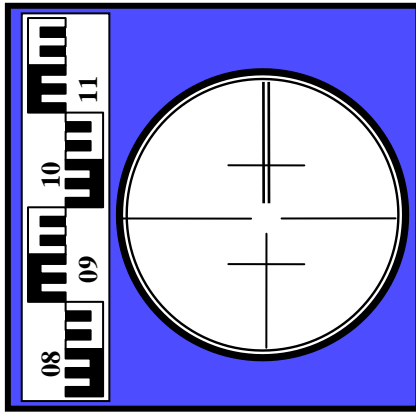
6. *V. Chibiriakov, M. Malashevskyi, O. Bugaienko* The development of peer agricultural land plots calculation methodology at the exchange process 72
7. *Yu. Ciobanu* The structural model of functioning of the residential real estate market 80

**PHOTOGRAMETRY AND EARTH REMOTE SENSING**

8. *O. Kulikovska, Yu. Atamanenko* Perspectives of data processing programs of laser scanning in mapping of road traffic accidents 91
9. *O. Dorozhynskyy, R. Abdallah* Method of automatic selection of roads on the satellite images 98
10. *V. Kortunov, A. Molchanov, I. Gergel* 3D-reconstruction of objects using unmanned systems 108
11. *Х.О. Безбородова* Використання безпілотних літальних апаратів для збору геопросторових даних 116
12. *R. Schultz, P. Krelshteinn, I. Malina, S. Voytenko* The issue of calculating points positioning accuracy for aerial photographs from unmanned aerial vehicles 124

**NOTED AUTHORS**

137



**ГЕОДЕЗІЯ**

УДК 528.36.23

**О.В.Кучер**, канд.техн.наук,

*Науково-дослідний інститут геодезії і картографії (НДІГК),*

**В.С. Старовєров**, канд.техн.наук, професор кафедри інженерної геодезії,

**Г.С. Акчуріна**, студент,

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **СУЧАСНИЙ ПІДХІД ДО ВИРІВНЮВАННЯ НІВЕЛІРНОЇ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ**

*Зазначено, що неоднорідність дійсного гравітаційного поля призводить до неоднозначності у визначенні висот. Нормальні висоти, які використовують в Україні, належать до геопотенціальних систем висот, що потребує використання геопотенціальних чисел.*

*Наведено методику вирівнювання нівелірних мереж, зважаючи на гравітаційне поле Землі.*

*Розглянуто особливості вирівнювання нівелювання в геопотенціальних числах.*

*Наведено загальні рекомендації щодо процесу вирівнювання та способи розв'язання проблем, які при цьому виникають.*

*Запропоновано схеми обов'язкових робіт з вирівнювання нівелірної мережі в геопотенціальних числах.*

*Наведено приклад вирівнювання нівелювання в геопотенціальних числах.*

**Ключові слова:** *нормальні висоти, гравітаційне поле, геопотенціальні числа, вирівнювання нівелювання.*

**Постановка проблеми.** Висотна основа країни є невід'ємною частиною загальнодержавної системи геодезичного забезпечення, тому концепцію її розвитку потрібно розглядати в контексті сучасного розвитку геодезичної референцної системи УСК-2000. В цих умовах під час виконання основних геодезичних робіт слід забезпечити, з одного боку, максимальну ефективність застосування сучасних супутникових технологій, а з другого – зберегти і реалізувати весь потенціал системи висотного забезпечення, створеної на основі традиційних методів геодезичних вимірювань.

З цією метою слід розробити методику, за якої висоти будуть визначені однозначно. Однозначність визначення висот полягає в обґрунтуванні польових

вимірювань, вибору методів вирівнювання, визначенні основної відлікової поверхні, встановлення системи відліку висот відносно середнього багаторічного рівня моря в одному вихідному пункті.

Методика і точність польових вимірювань під час нівелювання регламентовано інструкцією. Вибір і визначення відлікової поверхні залежить від змісту розв'язуваної задачі. Наприклад, зображуючи рельєф на топографічних картах, використовують нормальні висоти, які відлічують від поверхні квазігеоїда. Останнім часом за супутниковими геодезичними спостереженнями визначають геодезичну висоту, що дає можливість будувати квазігеоїд у різних системах.

Відомі нині принципи встановлення системи відліку висот відносно середнього багаторічного рівня моря в одному вихідному пункті створюють ряд суперечностей, які не можуть бути розв'язані традиційними методами геодезичних вимірювань. Ці протиріччя полягають у тому, що різниці середніх рівнів морів у різних рівневимірних постах можуть сягати метра і більше, а складові геодезичної висоти відносно поверхні прийнятого відлікового еліпсоїда (нормальна висота і висоти квазігеоїда) були визначені із незіставленими точностями і належали до різних систем відліку, тому виміряти безпосередньо геодезичну висоту відносно загального земного еліпсоїда було неможливо. Якщо у розв'язанні більшості задач традиційної геодезії такі невизначеності не викликали особливих проблем, то за точності сучасних супутникових технологій такі суперечності не можуть бути проігноровані, особливо коли йдеться про розв'язання фундаментальних задач сучасної геодезії чи використання методу GPS-нівелювання.

Сучасний підхід до встановлення єдиної загальноземної чи континентальної системи висотного забезпечення полягає в тому, що вихідні дати у конкретному пункті, який можна було б вважати за початковий для відліку висот, не встановлюють, а рівневимірні дані на футштоках для задачі безпосередньо не використовують. Відліковою поверхнею є екіпотенціальна поверхня з потенціалом, що дорівнює нормальному  $W_0=U_0$  на поверхні загальноземного еліпсоїда. Вихідними даними, які реалізують приведення висот до загальноземної системи, є такі: нормальні висоти  $H^N$  з нівелювання, висоти квазігеоїда  $\zeta$ , визначувані на основі комбінації наземних гравіметричних та супутникових даних (планетарних моделей гравітаційного поля), геодезичні висоти з ГНСС (Глобальних навігаційних супутникових систем). Тоді систему висот зумовлює сукупність пунктів, в яких дотримано рівності геодезичної висоти  $H^G$ , визначуваної із супутникових спостережень, та геодезичної висоти  $H^G = H^N + \zeta$ , отриманої як сума нормальної висоти  $H^N$  та висоти квазігеоїда  $\zeta$ . Такий принцип встановлення висотної системи є оптимальним для всієї загальної системи геодезичного забезпечення, що базується на сучасних супутникових технологіях.

За такого підходу вихідні нівелірні пункти, як, наприклад, Кронштадтський футшок, в принципі відсутні, як немає і пункту у загальноземній референційній системі ITRS. Нормальна висота в цьому випадку буде дорівнювати нулю ( $H^N=0$ ) в тій  $i$ -й точці земної поверхні, в якій реальний потенціал  $W_i$  дорівнює нормальному  $U_0$  на поверхні еліпсоїда GRS-80, який нині вважають за нормальний.

Вирівнювання результатів геометричного нівелювання призводить до неоднозначності визначення висоти, суть якої полягає в такому. Якщо виконують



вимірювання в замкнутому нівелірному полігоні, тобто повертаються до вихідного пункту, то алгебраїчна сума всіх вимірних перевищень не буде строго дорівнювати нулю, як можна було б сподіватися, навіть якби була можливість виконувати спостереження абсолютно точно. Ця нев'язка свідчить про те, що нівелювання являє собою більш складну процедуру, ніж може здатися на перший погляд.

Як відомо, геопотенціальні висоти (ортометричні, нормальні) визначають з різниці потенціалів дійсної сили ваги двох рівневих поверхонь, одну з них беруть за основну, іншу – за визначувану, тобто ту, на котрій лежить точка, висоту якої треба визначити. При цьому слід виконати гравіметричні вимірювання. Нівелювання в сукупності з гравіметричними вимірюваннями визначає різницю потенціалів, тобто фізичну величину. Отже, розглядаючи процес вирівнювання, потрібно виходити з того, що вирівнюються не геометричні величини у вигляді перевищень, а вирівнюванню підлягають фізичні величини у вигляді різниці потенціалів.

**Постановка завдання.** Мета статті – розглянути послідовність застосування методики вирівнювання нівелірних мереж за різницею потенціалів реального гравітаційного поля.

**Виклад основного матеріалу.** Основні уявлення визначення висоти в реальному гравітаційному полі. У реальному гравітаційному полі Землі висоти відраховують від основної рівневої поверхні. У такому разі висота набуває певного фізичного змісту і визначається роботою, виконуваною в полі сили ваги. Вперше поняття про основну рівневу поверхню Землі було сформульоване Гаусом ще у 1828 р. і тільки у 1872 р. визначення геоїда як математичної поверхні Землі введено Лістінгом. Розглянемо рівневі поверхні, що проходять через дві близькі точки  $O_1$  та  $O_2$  на поверхні Землі (рис.1).

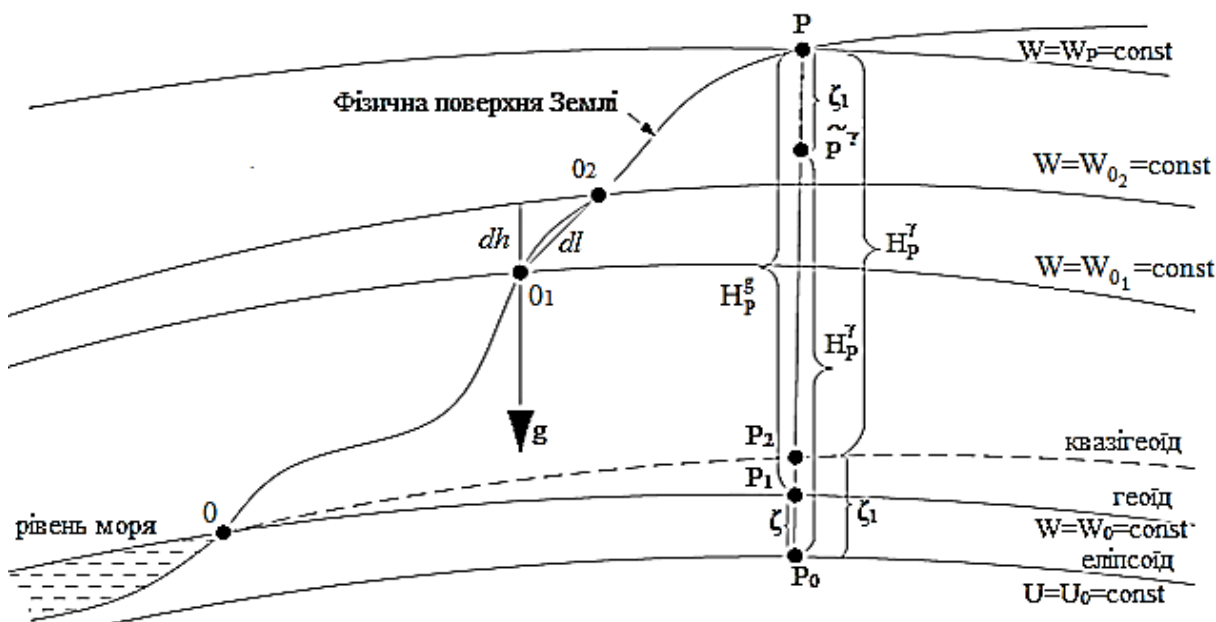


Рис.1. До визначення висоти в реальному гравітаційному полі:  
 $PP_1 = H^s$  – ортометрична висота;  $PP_2 = H^r$  – нормальна висота;  
 $PP_0 = H^G$  – геодезична висота;  $\zeta$  – висота геоїда над поверхнею еліпсоїда (аномалія висоти);  $\zeta_1$  – висота квазігеоїда над поверхнею еліпсоїда (аномалія висоти)

Нехай відстань між цими точками дорівнює  $dl$ . Сила ваги  $g$  спрямована по нормалі до цих поверхонь, за переміщення уздовж них робота дорівнює нулю. Позначимо як  $dW$  роботу, яку потрібно виконати для переходу з однієї рівневої поверхні на іншу.

Відомо, що робота дорівнює добутку переміщення  $dl$  на проекцію  $g \cdot \cos(g^\wedge l)$  сили ваги  $g$  на напрямок переміщення:

$$dW = g \cos(g^\wedge l) dl. \quad (1)$$

Але згідно з рис.1, добуток  $\cos(g^\wedge l) dl$  є проекцією відрізка  $dl$  на напрямок сили, тобто дорівнює відстані  $dh$  між рівневими поверхнями.

Відстань між близькими рівневими поверхнями називають ще перевищенням. Перевищення є додатним, якщо воно спрямоване протилежно напрямку сили ваги, тобто рівнева поверхня, що проходить через кінцеву точку  $O_2$  відрізка  $dl$ , лежить вище від рівневої поверхні, що проходить через його початкову точку  $O_1$ . Тому

$$dh = -\cos(g^\wedge l) dl \quad (2)$$

і

$$dW = -g dh. \quad (3)$$

Знайдемо роботу, виконану силою ваги під час переміщення вздовж рівневої поверхні. У розгляданому випадку в рівності (1)  $\cos(g^\wedge l) = 0$ , тому

$$dW = 0,$$

отже,

$$W = \text{const}. \quad (4)$$

Функцію  $W$  називають потенціалом сили ваги, а вираз (4) є рівнянням рівневої поверхні. Оскільки потенціал на рівневій поверхні постійний, цю поверхню називають також екіпотенціальною.

Підсумовуючи елементарні різниці (3) від деякої початкової точки  $O$  до точки  $P$  на поверхні Землі, отримаємо

$$W_0 - W_P = C_P = \int_0^P g dh. \quad (5)$$

Точку  $O$  вибирають зазвичай на рівні моря. У такому разі різницю  $W_0 - W_P = C_P$  називають геопотенціальною величиною, або геопотенціальним числом. Фактично геопотенціальне число – це робота, виконувана під час переміщення від рівня моря до точки  $P$  на поверхні Землі. Через те що і силу ваги  $g$ , і перевищення  $dh$  можна виміряти на поверхні Землі, геопотенціальне число  $C_P$  вважають вимірюваною величиною і розглядають як одну з природних, або натуральних, координат.

Для перетворення геопотенціального числа  $C_P$  в лінійну міру потрібно виконати таке. Через точку  $P$  (рис.1) проводять нормаль  $PP_0$  до поверхні еліпсоїда і знаходять на цій нормалі таку точку  $\tilde{p}^y$ , для якої робота з переміщення від точки  $P_0$  еліпсоїда тотожно дорівнює геопотенціальному числу. Висота цієї точки  $\tilde{p}^y$  над еліпсоїдом називається нормальною висотою точки  $P$  поверхні Землі. Множина точок  $\tilde{p}^y$  відповідна поверхні, що називається телуроїдом.

Поняття «нормальні висоти» введено М.С. Молоденським. За відлікову поверхню в системі нормальних висот беруть поверхню квазігеоїда. Термін «квазігеоїд» вжито в роботі Молоденського 1948 року.

Згідно з рис.1, щоб перейти від нормальної висоти  $H_P^N$  (відрізок  $P_0\tilde{p}^N$ ) до геодезичної висоти  $H_P^G$  (відрізок нормалі  $PP_0$ ), потрібно додати до нормальної висоти відрізок  $\tilde{p}^N P = \zeta_1$ , який називають аномалією висоти:

$$H_P^G = H_P^N + \zeta_1. \quad (6)$$

Це просте співвідношення відіграє нині важливу роль у сучасній геодезії.

Зауважимо, що нормальна висота  $H_P^N$  визначається різницею потенціалів точок земної поверхні, обчислюється за вимірами на поверхні Землі і має для даної точки єдине значення за незмінного положення точки  $O$  початку відліку геопотенціального числа. Нормальну висоту визначають за формулою:

$$H_P^N = \frac{W_0 - W_P}{\gamma_m^P} = \frac{\int_0^P g dh}{\gamma_m^P}, \quad (7)$$

де  $\gamma_m^P$  – середнє значення нормальної сили ваги на відрізку  $PP_1$  силової лінії нормального поля.

У геодезії нормальну висоту називають ще абсолютною, а різницю нормальних висот – відносною висотою точки. Чисельне значення абсолютної висоти звичайно називають позначкою. Якщо йдеться про нормальні висоти, то за відлікову поверхню беруть квазігеоїд.

Значення висот зазвичай отримують з нівелювань, проте отримані висоти редуковано не до еліпсоїда, а до деякої іншої поверхні – рівневої, за яку беруть середній рівень моря, тобто поверхню геоїда. Якщо припустити, що нівелірні висоти відраховують від поверхні, яка визначається рівнянням  $W_0 = const$  і збігається з рівнем моря, то виникає задача з визначення потенціалу сили ваги  $W_0$  в точці  $O$ , яку вважають початком відліку висот.

*Методика визначення потенціалу сили ваги  $W_0$  на рівневій поверхні геоїда для висотної референцної системи.* Розглянемо випадок, коли для кожного геодезичного пункту відомими є два значення нормальної висоти в різних вертикальних референцних системах. Для переходу від нормальної висоти  $H^N$  до геодезичної потрібно додати до нормальної висоти аномалію висоти  $\zeta_1$ , що чисельно дорівнює так званій висоті квазігеоїда

$$H^G = H^N + \zeta_1. \quad (8)$$

Таким чином, нормальні висоти  $H^N$  допоміжної поверхні або телуроїда можуть бути знайдені відносно прийнятого еліпсоїда через геопотенціальне число  $C_P = W_0 - W_P$  за допомогою умови Молоденського:

$$W_0 - W_P = U_0 - U_{\tilde{p}}, \quad (9)$$

де, крім вже зазначених величин,  $U_0$  – нормальний потенціал на поверхні прийнятого еліпсоїда  $U_0 = W_0$ ;  $U_{\tilde{p}}$  – нормальний потенціал у деякій точці  $\tilde{p}$  телуроїда; точки  $P$  та  $\tilde{p}$ , розміщені на одній нормалі до еліпсоїда; відстань  $P\tilde{p}$  являє собою аномалію висоти  $\zeta_1$  у формулі (8). При цьому вертикальний датум висотної системи є зафіксованим як мінімум однією точкою із значенням  $W_0$ .

Нехай у локальній референцній системі координат (LRS) відомі геодезичні координати  $B_{LRS}$ ,  $L_{LRS}$  і нормальні висоти  $H_{Балт77}^N$ , задані у Балтійській системі висот 1977 року. У випадку глобальної геодезичної референцної системи ITRF2000/ETRS89 відомі широти  $B_{GRS}$ ,  $L_{GRS}$  і, через формулу Молоденського,

$H'_g = H^G - \zeta_g$ . Нормальну висоту  $H'_g$  вважатимемо віднесеною до іншого нуля-пункту (іншої висотної референцної системи).

Тоді, порівнявши  $(B_{GRS}, L_{GRS}, H'_g)$  та  $(B_{LRS}, L_{LRS}, H'_{Балм77})$ , можна отримати сім параметрів трансформування координат [8]:

$$B_{GRS}, L_{GRS}, H'_g \Leftrightarrow B_{LRS}, L_{LRS}, H'_{Балм77}$$

відносно гіпсометричної поверхні, використовуючи замість традиційної геодезичної висоти її частину – нормальну висоту.

Це можна зробити, використовуючи вектор  $p^{H'}$  параметрів трансформування Гельмерта до нормальних висот

$$p^{H'} = [D_x^{H'}, D_y^{H'}, D_z^{H'}, \mu^{H'}, \varepsilon_x^{H'}, \varepsilon_y^{H'}, \varepsilon_z^{H'}]^T = [p_1^{H'}, p_2^{H'}, p_3^{H'}, p_4^{H'}, p_5^{H'}, p_6^{H'}, p_7^{H'}]^T, \quad (10)$$

та розв'язавши обернену задачу їх знаходження на основі різниць

$$\Delta H' = H'_g - H'_{Балм77}$$

Обчислення параметрів  $p^{H'}$  дає можливість розв'язати пряму задачу у такому вигляді:

$$H'_{Балм77} = H'_g + \sum_{i=1}^7 (d_{H'} \cdot D_i^{H'}) \cdot p_i^{H'} + \Delta H \quad (11)$$

$$H'_g = H'_{Балм77} + \sum_{i=1}^7 (d_{H'} \cdot D_i^{H'}) \cdot p_i^{H'} - \Delta H. \quad (12)$$

Або, беручи до уваги формулу (8), отримаємо:

$$H'_g + \sum_{i=1}^7 (d_{H'} \cdot D_i^{H'}) \cdot p_i^{H'} + \Delta H + \zeta_{LRS} = H'_g + \zeta_{GRS} + \sum_{i=1}^7 (d_H \cdot D_i) \cdot p_i + \Delta H \quad (13)$$

$$H'_g + \zeta_{GRS} = H'_g + \sum_{i=1}^7 (d_{H'} \cdot D_i^{H'}) \cdot p_i^{H'} + \Delta H + \zeta_{LRS} - \sum_{i=1}^7 (d_H \cdot D_i) \cdot p_i - \Delta H. \quad (14)$$

Визначивши для території України множину значень різниць  $\Delta H' = H'_g - H'_{Балм77}$ , знаходимо усереднену величину потенціалу  $W_0^{Балм.}$  на підставі рівняння  $(\Delta H')_{сер} = - \frac{(W_0 - W_0^{Балм.})}{\gamma}$ .

У формулах (13) та (14) скалярні добутки записують у вигляді:

$$(d_H \cdot D_1) = \cos B (\cos L + \sin L \cdot \varepsilon_z) - \sin B \varepsilon_y$$

$$(d_H \cdot D_2) = \cos B (\sin L - \cos L \cdot \varepsilon_z) + \sin B \varepsilon_x$$

$$(d_H \cdot D_3) = \cos B (\cos L \cdot \varepsilon_y - \sin L \cdot \varepsilon_x) + \sin B$$

$$(d_H \cdot D_4) = H + N \cdot W^2$$

$$(d_H \cdot D_5) = N \cdot e^2 \sin B \cos B \sin L$$

$$(d_H \cdot D_6) = - N \cdot e^2 \sin B \cos B \cos L$$

$$(d_H \cdot D_7) = N \cdot e^2 \sin B \cos B (\sin L \cdot \varepsilon_y + \cos L \cdot \varepsilon_x).$$

Тут  $W = \frac{a}{N}$ ,  $N = \frac{a}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}$ ,  $a$ ,  $e^2$  – параметри еліпсоїда.

Останнім часом набула поширення так звана супутникова альтиметрія, яку використовують для визначення поверхні Світового океану у вигляді висот поверхні моря (SSH) з точністю 2÷3 см. Крім того, визначення топографії Світового океану за допомогою сучасних методів дає змогу не тільки знаходити значення  $W_0$ , а й достатньо надійно його оцінювати, а також визначати його вікові та сезонні варіації в часі, що може бути використане для з'ясування зв'язків між відомими регіональними системами висот. Значення  $W_0$  в Балтійській системі висот 1977 р., отримане за результатами супутникової альтиметрії, дорівнює  $W_0^{Балм.} = 62636855,77 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ .

Вихідні дані для вирівнювання нівелювання в геопотенціальних числах. Вирівнювання даних нівелювання I і II класів, а також III класу, виконаного у гірських районах, починається лише після введення у перевищення поправки за непаралельність рівневих поверхонь, або поправки за перехід до нормальних висот. Саме перевищення з поправкою за непаралельність рівневих поверхонь вважають безпосередньо виміряною величиною. Отже, для двох реперів  $i$  та  $k$  потрібно обчислити

$$H_k^\gamma - H_i^\gamma = h_{ik} + f, \quad (15)$$

де  $H_i^\gamma, H_k^\gamma$  – нормальні висоти реперів  $i, k$ ;  $h_{ik}$  – виміряне перевищення репера  $k$  над репером  $i$ ;  $f$  – поправка за перехід до нормальних висот (поправка за непаралельність рівневих поверхонь);

$$f = -\frac{1}{\gamma_m} (\gamma_{0k} - \gamma_{0i}) H_m + \frac{1}{\gamma_m} (g - \gamma)_m \cdot h_{ik}, \quad (16)$$

де  $\gamma_m = 980000 \text{ Мгал}$ ;  $\gamma_{0k}, \gamma_{0i}$  – нормальна сила ваги на поверхні рівневого еліпсоїда в точках  $k$  та  $i$ ;  $H_m$  – середня виміряна висота реперів  $i$  та  $k$ ;  $g$  і  $\gamma$  – виміряна і нормальна сила ваги;  $(g - \gamma)_m$  – середнє значення аномалії сили ваги в точках  $i$  та  $k$ .

Тільки після обчислення поправки за непаралельність рівневих поверхонь (16) рекомендовано застосування кількох схем вирівнювання нівелірної мережі, які фактично базуються або на корелатній, або на параметричній версії методу найменших квадратів – залежно від жорсткості мережі.

Беручи за основу визначення геопотенціальних чисел формулу

$$C_P = W_0 - W_P = \sum_{i=1}^m g_i \cdot h_i, \quad (17)$$

можна дійти висновку, що вихідними даними для вирівнювання в розгляданому випадку будуть такі:

- насамперед виникає потреба в числовому значенні  $W_0$  у вихідному пункті нівелювання, який часто поєднується з одним з відомих футштоків, що зумовлює вертикальні дати класичної нівелірної мережі за допомогою відомої інформації про рівень моря. Слід зауважити, що за наявності кількох футштоків такі дані рекомендовано для додаткового визначення варіацій рівня моря і значення  $W_0$  з метою їх зведення на фіксовану епоху. Методику визначення потенціалу сили ваги  $W_0$  на рівневій поверхні геоїда розглянуто у попередньому розділі статті;
- у визначенні нормальних висот окремих GPS-пунктів вимоги до точності нівелювання повинні бути відповідні вимогам нівелювання першого класу, або менше 1 мм на 1 км ходу;
- різниця геопотенціальних чисел  $\Delta C$  вздовж лінії нівелювання обчислюється за формулою  $\Delta C = \sum_{i=1}^n g_i \cdot h_i$ , де  $h_i$  – перевищення між проміжними точками. При цьому величина  $g_i$  являє собою середню силу ваги  $g_i = (g_P + g_B) / 2$  в системі IGSN71, яка визначається на основі значень сили ваги в околі проміжних пунктів.  $P$  та  $B$  – суміжні пункти нівелювання, для яких визначено перевищення  $h_{PB}$  (рис.2);

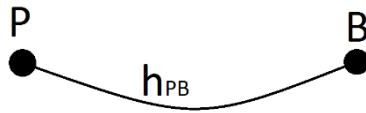


Рис.2. Нівелірна секція

- значення сили ваги для трансформації даних нівелювання в геопотенціальні числа повинні бути відомими в проміжних пунктах на відстані близько 1км з точністю  $\cong 1\text{мГал}$ . Для відстаней менше 0,5 км достатньо використовувати значення сили ваги лише в одній з цих точок, наприклад, в точці  $P$  або  $B$ .

Обчислення різниць геопотенціальних чисел нівелірної секції. Послідовність обчислень є такою:

1. Якщо  $P$  і  $B$  є кінцевими реперами нівелірної секції, то різниця геопотенціальних чисел обчислюється за формулою

$$\Delta C_{PB} = C_P - C_B = g_{PB} h_{PB},$$

де  $C_P$  і  $C_B$  – геопотенціальні числа реперів  $P$  і  $B$ ;  $h_{PB}$  – перевищення по секції;  $g_{PB}$  – середнє значення сили ваги між реперами  $P$  і  $B$ .

2. Обчислення середнього значення сили ваги  $g_{PB}$ :

$$g_{PB} = \frac{(g_P + g_B)}{2},$$

де  $g_P$  – сила ваги в точці  $P$ ;  $g_B$  – сила ваги в точці  $B$ .

3. Обчислення значення дійсної сили ваги в точках  $P$  і  $B$  за аномаліями Буге:

$$\begin{aligned} g &= \Delta g_{Buge} + \delta_{Buge} + \gamma_Q; \\ \delta_{faa} &= 0; \\ \delta_{Buge} &= 2\pi G \rho H^n; \\ \gamma_Q &= \gamma_0^{Helmert} - k_1 H^n + k_2 (H^n)^2; \\ \gamma_0^{Helmert} &= \gamma_a (1 + 0.005302 \sin^2 B - 0.000007 \sin^2 2B); \\ \gamma_a &= 9.78030; \\ k_1 &= 0.30855 (1 + 0.00071 \cos 2B); \\ k_2 &= 0.0723 \cdot 10^{-6}, \end{aligned}$$

де  $\Delta g_{Buge}$  – аномалія Буге (беруть з бази даних);

$\delta_{faa}$  – поправка у вільному повітрі, яку традиційно вводять в аномалію Буге;

$\delta_{Buge}$  – редукція Буге, або поправка за проміжний шар;

$\gamma_Q$  – нормальна сили ваги в точці  $Q$  на поверхні телуроїда;

$H^n$  – нормальна висота (беруть з бази даних);

$G$  – гравітаційна стала ( $G = (6,673 \pm 0,003) \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$ );

$\rho$  – величина середньої густини в одиницях  $\text{г/см}^3$  (для регіону України традиційне значення  $\rho = 2,3 \text{ г/см}^3$ );

$\gamma_0^{Helmert}$  – нормальна сила ваги на еліпсоїді Красовського в точці  $Q'$  (розмірність мГал);

$\gamma_a$  – нормальна сили ваги на екваторі ( $\text{м/с}^2$ );

$B$  – геодезична широта на еліпсоїді Красовського.

Значення сили ваги для редуції даних нівелювання в геопотенціальні числа повинні бути відомі в проміжних точках на відстані близько 1 км з точністю на рівні 1 мГал.

*Особливості вирівнювання нівелювання в геопотенціальних числах. Загальні рекомендації.* Вирівнювання геопотенціальних чисел та їх різниць є подібним до опрацювання розглянутих типів висот або їх різниць. Можна стверджувати, що будь-який метод вирівнювання, який застосовують у практиці опрацювання нівелірних мереж, може бути використаний і для вирівнювання нівелірної мережі України в геопотенціальних числах.

Головна проблема вирівнювання нівелірних мереж при цьому не зникає: детермінант матриці нормальних рівнянь дорівнює нулю, що свідчить про некоректність або сингулярність розв'язуваної задачі.

Як відомо, така проблема може бути розв'язана кількома шляхами:

- найбільш проста версія розв'язання – фіксація одного геопотенціального числа (кількох) в деякій наближеній системі (що буде відповідним фіксації однієї висоти (кількох) в наближеній системі) та виконання загального вирівнювання мережі нівелювання;
- другий можливий підхід – використання прикордонних зв'язків нівелювання між такими країнами, як Польща, Словаччина, Угорщина, Румунія, в тих місцях, де геопотенціальні числа вже обчислено в системі UELN (United European Levelling Network – Об'єднана Європейська мережа нівелювання) і віднесено до Амстердамського футштоку;
- третя можливість обґрунтована з математичного погляду розв'язання некоректних задач – це застосування методу регуляризації за Тихоновим без фіксації одного або кількох геопотенціальних чисел. Однією з найбільш поширених версій регуляризації для розв'язання некоректних задач є так званий метод SVD (Singular Value Decomposition);
- четвертим можна вважати комбінований перехід, тобто загальне вирівнювання нівелювання I, II, III класів з фіксацією кількох найбільш надійно визначених геопотенціальних чисел та застосування методу SVD для отримання надійного розв'язку.

Зважаючи на простоту запису різниці геопотенціальних чисел  $\Delta C$  вздовж лінії нівелювання

$$\Delta C = \sum_{i=1}^n g_i h_i,$$

основним методом вирівнювання нівелірної мережі як вільної системи можна вважати параметричний спосіб найменших квадратів з розв'язуванням системи нормальних рівнянь за методом SVD.

Висловлені зауваження стосовно вихідних даних та методу вирівнювання дають можливість перейти до схеми обов'язкових робіт з вирівнювання нівелірної мережі в геопотенціальних числах.

На наш погляд, процес вирівнювання нівелірної мережі I, II, III класів в геопотенціальних числах для створення висотної основи України потребує:

- перевірки вихідних даних нівелювання для виділення помилок перед обчисленням геопотенціальних чисел;

- створення на район України в цифровому вигляді ґриду  $1' \times 1.5'$  аномалій Буге у системі IGSN71 з точністю  $\leq 1$  мГал;
- створення ґриду  $1' \times 1'$  нормальних висот на регіон України в цифровому вигляді з точністю не гірше ніж 5 м;
- побудови моделі аномалій сили ваги в регіоні України з точністю 0.5 мГал для оцінювання сили ваги на станціях нівелювання без виконання гравіметричних робіт;
- обчислення геопотенціальних чисел на пунктах нівелювання I, II, III класів;
- побудови бази даних вертикальної основи за рекомендаціями IAG/EUREF з обов'язковим залученням значень геопотенціальних чисел на пунктах нівелювання;
- сумісного вирівнювання нівелювання I і II класів в геопотенціальних числах;
- фіксації вирівняних пунктів I і II класів та виконання сумісного вирівнювання нівелювання III класу в геопотенціальних числах;
- встановлення зв'язку отриманої реалізації висотної основи з іншими системами висот.

Названі обов'язкові роботи не можна розглядати як остаточні, оскільки їх практична реалізація гарантує побудову лише статичної вертикальної основи.

Використання сучасного світового досвіду приводить до необхідності побудови кінематичної вертикальної основи, фіксованої на певну епоху. У разі створення саме кінематичної вертикальної мережі додатковою обов'язковою роботою є об'єднання такої мережі з мережею перманентних GPS-станцій для визначення швидкості руху вертикальної основи саме за GPS-спостереженнями, зважаючи на можливість такого комбінованого підходу і його більшу надійність.

*Приклад вирівнювання нівелірної мережі (ходу) в геопотенціальних числах.* Для вирівнювання нівелювання I класу використано програмний продукт GeoLab, основне призначення якого – виконання тривимірного вирівнювання різних типів спостережень та їх комбінацій за методом найменших квадратів з детальною оцінкою точності елементів мережі.

Основні функції програмного продукту GeoLab:

- вирівнювання вертикальних, горизонтальних, тривимірних спостережень та їх комбінацій за методом найменших квадратів, при цьому кількість пунктів в мережі є необмеженою;
- апріорна оцінка мережі;
- інтерполяція моделі геоїда та сумісне вирівнювання гравіметричних та традиційних даних;
- перетворення систем координат та картографічних проекцій;
- підтримання різноманітних картографічних проекцій у процесі вирівнювання;
- формування схем геодезичних мереж.

За допомогою цього програмного продукту вирівнюють систему ходів нівелювання I класу. Вихідними пунктами є ґрунтові репери 21 (Словаччина) та 6859 (Польща) (рис.3).

Процес вирівнювання складається з кількох етапів:

1. Складання списку вихідних даних



Вихідними даними для вирівнювання слугують значення геопотенціальних чисел для вихідних пунктів та значення різниць геопотенціальних чисел між пунктами ходу. Значення геопотенціальних чисел отримано за формулою:

$$C_P = H^p \cdot \bar{\gamma} = \sum g \cdot dh,$$

де

$$\bar{\gamma} = \bar{\gamma}_P^{Helmert} = \gamma_0^{Helmert} - 0,30855(1 + 0,00071 \cos^2 B) H^p + 0,0723 (H^p)^2 10^{-6};$$

$$\gamma_0^{Helmert} = 978030(1 + 0,005302 \sin^2 B - 0,000007 \sin^2 2B).$$

Методику обчислення різниць геопотенціальних чисел висвітлено в статті. Вихідні дані для вирівнювання наведено в табл. 1.

Таблиця 1

**Вихідні пункти**

Назва пункту	Нормальна висота, $H^p$ , м	Значення $C_{Pi}$ , $m^2 \cdot c^{-2}$
21	101,796	986,3151
6859	204,884	2005,1600



Рис.3. Схема ходів

2. Визначення ваг нівелірних секцій.

Вагу вимірних нівелірних секцій ділянок (ходів) в межах одного класу нівелювання визначають за формулою

$$P = \frac{c}{L},$$

де  $c$  – постійний коефіцієнт, який дорівнює 10, застосований з розрахунком, щоб вага для секції була в межах від 1 до 10;  $L$  – довжина секції, км.

3. Формування даних для вирівнювання. Дані наведені в табл. 2 – 9.

Таблиця 2

**Хід X10683**

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $m^2c^{-2}$
6859	5731	900	900	0.8799
5731	6849	1900	1900	-6.096
6849	8849	2200	2200	-14.3102
8849	140	1100	1100	1.8715
140	BN2	1800	1800	-1.5779
BN2	BN1	1100	1100	-3.9372
BN1	26	900	900	7.6783
26	19	3300	3300	-15.1539
19	93	1600	1600	-10.9896
93	98	3700	3700	-5.8619
98	165	1200	1200	0.879
165	2557	3500	3500	6.7372

Таблиця 3

**Хід X10016\_1**

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $m^2c^{-2}$
2557	27	-10.3413	1800	-10.1384
27	1578	-4.6215	4700	-4.529
1578	3504	-22.7269	12700	-22.2929
3504	BN/On	1.4459	2300	1.4151
BN/On	33	-2.5076	1600	-2.4544
33	169	-4.1171	4800	-4.0372
169	304	-4.3712	2400	-4.292
304	379	11.1492	7500	10.9315

Таблиця 4

**Хід X10016\_2**

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $m^2c^{-2}$
379	89	-10.2575	2100	-10.0558
89	C-89	2.5919	3300	2.5475
C-89	4063	-7.4774	2000	-7.3357
4063	3923	-2.9137	2100	-2.8376
3923	4335	-3.4593	4400	-3.3953
4335	414	2.0222	3200	1.9785
414	4436	-5.7726	2900	-5.6665
4436	4216	-0.4754	2700	-0.4714
4216	1747	-0.6556	3100	-0.65

## Хід X10016\_3

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $m^2c^{-2}$
8	6114	1.2204	100	1.1971
6114	362	0.9047	1700	0.8866
362	5010	-4.23773	8300	-4.1571
5010	5016	0.6047	3200	0.5916
5016	207	2.9296	2500	2.8849
207	1747	-4.0118	2200	-3.9520

Таблиця 6

## Хід X10019

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $m^2c^{-2}$
2557	3972	1.4489	100	1.4177
3972	5025	7.9341	3400	7.7831
5025	4673	4.6084	2400	4.5257
4673	6(1)	6.1751	3600	6.0575
6(1)	4392	29.5484	8000	29.3488
4392	4427	16.7127	2100	7.7305
4427	104	0.828	2600	8.6565
104	86	10.3574	1600	10.1603
86	4360	16.6381	2300	16.32
4360	4124	28.5698	2500	28.0216
4124	74	39.0348	7100	38.2857
74	4293	-16.032	1800	-15.7209
4293	302	-28.0165	3300	-27.4741
302	374	-37.2625	5400	-36.5428
374	4284	-21.4534	3400	-21.0414
4284	6	-19.4778	6200	-19.1078

Таблиця 7

## Хід X10020\_1

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $m^2c^{-2}$
88	201	-6.1487	2300	-6.0293
201	84	-0.5325	1500	-0.522
84	62	-3.9571	4400	-3.8814
62	316	-3.185	2900	-3.1246
316	4194	-5.235	2300	-5.1347
4194	195	-1.8275	11200	-1.7921
195	4863	-2.8836	2200	-2.8283
4863	4	2.1377	1400	2.102
4	8	-4.2556	5100	-4.1794

Таблиця 8

## Хід X10020\_2

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $\text{м}^2\text{с}^{-2}$
6	4970	-15.7933	4100	-15.4861
4970	BN/b17	2.0724	200	2.0343
BN/b17	4609	-3.9675	1900	-3.8321
4609	24	-26.8473	11300	-26.3317
24	449	-9.8502	5500	-9.6581
449	4762	-13.8294	3700	-13.5709
4762	7	-7.0134	3400	-6.8828
7	6492	0.5905	100	0.5787
6492	88	1.8074	1800	1.7759

Таблиця 9

## Хід X10687

Початковий пункт	Кінцевий пункт	Перевищення, м	Відстань між пунктами, м	Різниця геопотенціальних чисел, $\text{м}^2\text{с}^{-2}$
1747	BN3	4.2021	2600	4.1216
Bn	1899	-0.1211	100	-0.1188
1899	1291	-1.2339	500	-1.2102
1291	417	0.7944	2900	0.7944
417	9753	-1.3071	1200	-1.3071
9753	21	-1.7862	1200	-1.7862

## 4. Вирівнювання ходів.

У процесі сумісного вирівнювання ходів отримано значення геопотенціальних чисел та висот на кожний пункт нівелірного ходу. Результати вирівнювання наведені в табл. 10 – 11.

Таблиця 10

## Значення геопотенціальних чисел пунктів нівелювання

Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$	Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$	Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$	Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$
104	1974,5135	195	1847,7412	201	1862,2456	207	1838,0560
1291	1000,6663	21	986,3151	3923	1847,2485	6859	2005,1602
140	1967,0801	2557	1915,1453	4063	1850,9050	8849	1971,8418
1578	1897,6320	26	1950,2196	414	1843,6315	89	1858,4371
165	1909,0647	27	1902,5252	4216	1000,4900	93	1920,2032
169	1865,2103	304	1859,5223	4335	1835,4395	9753	993,6376
1899	1033,9876	3504	1875,2890	5731	1996,1310	BN/On	1875,1850
19	1934,3287	379	1870,3118	6849	1987,8140	BN1	1952,4501
BN2	1963,0205	BN3	1836,8833	C-89	1860,2476	24	1902,1731
302	2024,0353	316	1857,6800	362	1838,7532	374	1987,4905
3972	1910,4558	4	1846,9712	4194	1849,5338	4216	1835,5726
4284	1966,4438	4293	2051,5150	4360	2000,9585	4392	1958,1494
4427	1965,8661	449	1892,5130	4609	1928,5053	4673	1922,7488
4762	1878,9376	4863	1844,9003	4970	1931,8447	5010	1834,5952

Закінчення таблиці 10

Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$	Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$	Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$	Назва пункту	$C_{Pi}, \text{м}^2\text{с}^{-2}$
5025	1918,2337	6	1947,3344	6(1)	1928,8015	6114	1837,8877
62	1857,8119	6492	1866,5294	6859	2005,1600	7	1872,0496
74	2067,2548	8	1842,7895	84	1861,6942	86	1984,6500
88	1868,2864						

Таблиця 11

**Значення висот пунктів нівелювання**

Назва пункту	$H_i^y, \text{м}$	Назва пункту	$H_i^y, \text{м}$	Назва пункту	$H_i^y, \text{м}$	Назва пункту	$H_i^y, \text{м}$
104	230,0075	195	108,3395	201	123,0786	207	104,5151
1291	102,8569	21	100,5510	3923	108,8447	6859	204,4130
140	186,5348	2557	162,9949	4063	111,7589	8849	184,6293
1578	148,0321	26	188,7335	414	107,4072	89	116,6452
165	156,9953	27	152,6532	4216	101	93	162,0749
169	120,1257	304	115,7542	4335	105,3852	9753	102,3405
1747	100,5028	33	124,2428	4436	101,6343	98	156,0990
1899	104,1097	3504	125,3061	5731	205,4362	BN/On	126,7507
19	173,2828	379	126,9032	6849	199,2198	BN1	180,9085
BN2	184,9261	BN3	104,7042	C-89	119,2369	24	157,7654
302	280,5563	316	115,4025	362	105,2192	374	243,2937
3972	164,2025	4	107,5919	4194	285,5710	4216	101,1586
4284	221,8401	4293	308,5730	4360	257,0016	4392	212,4677
4427	229,1798	449	147,9151	4609	184,6127	4673	176,7444
4762	134,0855	4863	105,4554	4970	186,5688	5010	101,5859
5025	172,1364	6	202,362	6(1)	182,9193	6114	118,5878
62	118,5878	6492	127,4211	6859	204,4130	7	127,0719
74	324,6057	8	103,3362	84	122,5450	86	240,3639
88	129,2277						

**Висновок.** Вирівнювання нівелірних мереж в геопотенціальних числах дає найбільш об'єктивну характеристику висотного положення пунктів нівелірних мереж. При цьому береться до уваги неоднозначність дійсного гравітаційного поля Землі.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Бровар В.В. Потенциалы начальных пунктов изолированных нивелирных сетей / В.В. Бровар // Геодезия и картография. – 1988. – №2. – С. 21-24.
2. Вировец А.М. Основная нивелирная сеть СССР / А.М. Вировец // Сб. науч.-техн. и произв. статей. – 1948. – Вып 19. – С. 38-52.
3. Еремеев В.Ф. О системе высот нивелирной сети СССР/ В.Ф. Еремеев., В.И. Звонов // Труды ЦНИИГАиК. – 1953. – Вып. 96.
4. Мещерский И.Н. Главная высотная основа страны /И.Н. Мещерский // Геодезия и картография. – 1983. – №1. – С. 22-26.
5. Мещерский И.Н. Анализ результатов нивелирования I и II классов (1957-1695 гг.) / И.Н. Мещерский, И.И. Энтин // Тр.ЦНИИГАиК.- 1972. – Вып. 169. – С. 3-26.
6. Павлив П.В. Проблемы высокоточного нивелирования / П.В. Павлив. – Львів: Вища школа, 1980. – 124 с.

7. Пеллинен Л.П. Новые возможности использования гравитационных данных при реализации геодезических систем координат / Л.П. Пеллинен // Геодезия и картография. – 1987. – №3. – С. 10-13.

8. Савчук С.Г. Основи формування геодезичної референцної системи України: дис. ... д-ра тех. наук: 05.24.01 / С. Г. Савчук. – Львів, 2005. – 275 с.

9. Юркина М.И. Потенциал в начале счета высот и контроль геометрического нивелирования / М.И. Юркина // Геодезия и картография. – 1981. – №10. – С. 11-15.

## REFERENCES

1. Brovar V.V. (1988) *Potencialy nachalnyh punktov izolirivanykh nivelirnykh setey [The potentials of the initial points of isolation leveling networks]*. Geodesiya i kartographia. – Moscow [in Russia].

2. Virovec A.M. *Osnovnaya nivelirnaya set SSSR [The main leveling network of the USSR]*. Collection of scientific, technical and industrial articles, № XIX. – Moscow [in Russia].

3. Eremeev V.F., Zvonov V.I. (1953) *O sisteme vysot nivelirnoy seti SSSR [About height leveling network of the USSR]*. Tr. TsNIIGAiK, №96. – Moscow [in Russia].

4. Mescherskiy I.N. *Glavnaya vysotnaya osnova strany [The main high base of the country]*. Geodesic cartography, №1. – Moscow [in Russia].

5. Mescherskiy I.N. Entin I.I. (1972) *Analiz rezultatov nivelirovaniya I i II klassov (1957-1966 goda) [Analysis of the results of leveling I and II classes (1957-1965)]*. Tr. TsNIIGAiK, №169. – Moscow [in Russia].

6. Pavliv P.V. (1980) *Problema vysokotochnogo nivelirovaniya [The problem of high-rise leveling]*. High school. Publishing in Lvivskiy University. – Lviv [in Ukraine].

7. Pellinen L.P. (1987) *Novye vozmozhnosti ispolzovania dannyh pri realizazii geodezicheskikh system koordinat [New features of the gravity data in the implementation of geodetic reference systems]*. Geodesy and cartography, №3/ - Moscow [in Russia].

8. Savchuk S.G. (2005) *Osnovy formuvannya geodezychnoyi referencznoyi systemy Ukrayiny [Bases of formation of geodetic reference system of Ukraine]*. Doctor's thesis/ L'viv: Nacional'nyj universytet «L'vivska politehnika» [in Ukraine].

Urkina M.I. (1981) *Potencial v nachale scheta vysot i control geometricheskogo nivelirovaniya [Potential early in the count, and the heights of geodetic leveling control]*. Geodesy and cartography, №10. – Moscow [in Russia].

**О.В. Кучер**

**В.С. Староверов**

**А.С. Акчурина**

## СОВРЕМЕННЫЙ ПОДХОД К УРАВНИВАНИЮ НИВЕЛИРНОЙ СЕТИ УКРАИНЫ

Указано, что неоднородность действительного гравитационного поля приводит к неоднозначности определения высот. Нормальные высоты, используемые в Украине, относятся к геопотенциальным системам высот, что требует использования геопотенциальных чисел.

Приведена методика уравнивания нивелирных сетей с учетом гравитационного поля Земли.

*Рассмотрены особенности уравнивания нивелирования в геопотенциальных числах.*

*Приведены общие рекомендации относительно процесса уравнивания и пути решения проблем, которые при этом возникают.*

*Предложено схемы необходимых работ по уравниванию нивелирной сети в геопотенциальных числах.*

*Приведен пример уравнивания нивелирования в геопотенциальных числах.*

**Ключевые слова:** *нормальные высоты, гравитационное поле, геопотенциальные числа, уравнивание нивелирования.*

**O.V. Kucher  
V.S. Staroverov  
H.S. Akchurina**

### **THE MODERN APPROACH TO EQUALIZATION LEVELING NETWORK OF UKRAINE**

*Indicated that the heterogeneity of the actual gravitational fields leads to ambiguity of define heights. Normal height, which are used in Ukraine are geopotential height system that requires the use of geopotential numbers.*

*Bringing method equalization leveling networks taking into account Earth's gravitational field.*

*Consider the features of the leveling equalization in geopotential numbers.*

*Provides general recommendations regarding equalization process and ways of solving problems that arise in this case.*

*A scheme of work necessary equalization leveling network geopotential numbers.*

*Gave an example of equalization of leveling in geopotential numbers.*

**Keywords:** *normal heights, gravitation field, geopotential number, equalization leveling network.*

Надійшла до редакції

20.07.2015

УДК 528.48

**А.В. Островський**, асп. кафедри інженерної геодезії,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

### **КРИТЕРІЙ ЯКОСТІ, ТОЧНОСТІ І ПОВНОТИ ЦИФРОВОЇ МОДЕЛІ РЕЛЬЄФУ**

*Stosovno modelювання рельєфу залишаються невирішеними питання, серед яких основним є виявлення впливу різноманітних чинників на точність математичного моделювання рельєфу, вибір оптимальних математичних методів створення цифрової моделі рельєфу (ЦМР). Проблема високоточного математичного моделювання є особливо важливою в задачах з проектування*

*об'єктів за ЦМР, визначення гідрологічних характеристик, дослідження ерозійних процесів. Таким чином, проблема побудови ЦМР надалі залишається актуальною задачею як в науковому, так і в прикладному аспектах.*

**Ключові слова:** *позиційна точність, дисперсія похибок висот, неіснуючий острів.*

**Вступ.** Бурхливий розвиток геоінформатики породжує чимало додатків, у яких використовується та чи інша цифрова модель рельєфу земної поверхні. Переважна кількість таких додатків, наприклад, прогноз повеней, гарантування безпеки польотів, об'ємне представлення карти на екрані комп'ютера тощо, потребують по можливості якомога точніших моделей.

**Актуальність роботи.** Найчастіше вимоги щодо точності ЦМР можна задовольнити, створюючи моделі на основі цифрових топографічних карт відповідного масштабу, що містять інформацію про рельєф у вигляді ізоліній, відміток висот, відміток урізів води та ін. Процес створення моделі рельєфу (в триангуляційному або матричному вигляді) за цифровими даними такого типу нині добре досліджений і реалізований в багатьох ГІС-пакетах. Однак очевидно, що якість і точність одержуваної моделі залежить від якості, точності і особливостей представлення вихідних цифрових даних - ізоліній, відміток висот та ін.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Детальний аналіз точності ЦМР, створених за картометричним і фотограмметричним методами, виконала у своїх працях Х. Бурштинська [8; 9; 10]. У роботах О. Левченко [6; 7] розглянуто питання кількісної оцінки точності побудови цифрових моделей рельєфу у вигляді grid-поверхонь, що ґрунтується на аналізі середньоквадратичних похибок моделей для різних параметрів лінійного універсального кригінгу та триангуляції. Відомі також праці зарубіжних авторів на цю тематику – С.В. Абламейка [5], О.Р. Мусина та ін.

**Постановка завдання.** Яким чином можна побудувати коректну і якісну модель рельєфу, використовуючи для цього вже створені цифрові топографічні карти? Напевно, цьому має сприяти максимальне використання неявної на мапі інформації про рельєф.

**Виклад основного матеріалу.** Критеріями якості побудованих ЦМР є позиційна точність і дисперсія похибок висот.

*Позиційна точність даних і типи помилок.* Позиційна точність визначається як величина відхилення вимірювання даних про місцезнаходження (зазвичай координат) від істинного значення. Для її визначення виходять з масштабу дослідження або первинного матеріалу, наприклад, в даних про природні ресурси прагнуть досягти точності карти заданого масштабу. Дотримання більшої точності потребує більш якісних вихідних матеріалів, але завжди слід замислитися, чи виправдані додаткові витрати завданнями дослідження.

Для зменшення значень помилок у вимірюванні місцеположення вдаються до геодезичного контролю та систем супутникового позиціонування, а також створення масивів даних географічної прив'язки. До даних висувають особливо високі вимоги до точності та достовірності ще на етапі збирання вихідної інформації. Застосування даних як основи для їх інтеграції у відомих оригінальних масштабах і проєкціях не викликає труднощів. У всіх інших випадках потрібне перетворення інформації, виконуване за правилами картографічної генералізації та узгодження.



Більшу частину даних про місцезнаходження об'єктів беруть з аерознімків, при цьому точність залежить від правильного розміщення контрольних точок. Дані космічної зйомки важче розміщувати з великою точністю – через недостатню роздільну здатність знімка.

На весь набір даних впливають: помилки реєстрації та визначення контрольних точок, перетворення координат, особливо коли невідомою є проекція вихідного документа; помилки в обробці даних, неправильний логічний підхід, генералізація і проблеми інтерпретації; математичні помилки; втрата точності представлення через невисоку точність обчислень; переведення векторних даних в растровий формат.

У базах даних (БД) зазвичай використовують відомості з різних джерел з різним ступенем точності. Під час накладання безлічі карт точність результативного матеріалу може виявитися дуже низькою. Більший інтерес становить показник придатності отриманої карти. Для деяких типів операцій ступінь придатності карт визначається точністю найменш точного шару БД. Показник придатності можна оцінити також за його стійкістю під час зміни порядку введення даних або зміни ваги атрибута [1].

Часто виникають штучні ознаки помилок (артефакти) – небажані наслідки застосування високоточних процедур для обробки просторових даних, що мають невелику точність. Використання растрових даних дає змогу застрахуватися від артефактів, якщо розмір елемента растра більший за позиційну точність даних або дорівнює їй. Під час роботи з векторними даними артефакти виникають у процесі кодування та накладення полігонів.

Для того щоб перевірити позиційну точність, потрібно використовувати незалежне, точніше джерело, наприклад, карту більшого масштабу, дані супутникового позиціонування, первинні («сирі») дані зйомки. Для контролю можна використовувати і внутрішні ознаки: незамкнуті полігони, лінії, що проходять вище або нижче від вузлових точок, і т. п. Величина цих похибок може слугувати мірою позиційної точності.

Найбільш надійним шляхом створення якісних БД, особливо для багаторазового і багатокористувацького застосування, є зберігання інформації про точність у самій БД у вигляді атрибутів або метаданих.

*Критерії точності.* Однак очевидно, що якість і точність одержуваної моделі визначається якістю, точністю й особливостями представлення вихідних цифрових даних – ізоліній, відміток висот тощо.

Практика свідчить, що одержувані за цифровими картами моделі рельєфу, на жаль, найчастіше є некоректними, тобто неправильно відтворюють рельєф місцевості в деяких зонах. До таких зон належать русла річок з крутими й обривистими берегами. Наявні на карті в цих зонах елементи рельєфу не дають змоги достатньо коректно описати рельєф загалом.



Рис. 1. Фрагмент карти з ділянкою річки

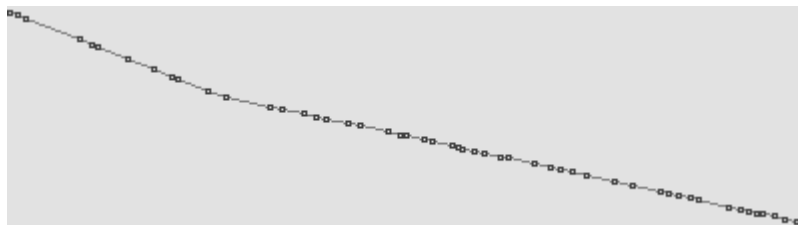


Рис. 2. Профіль рельєфу вздовж ділянки річки

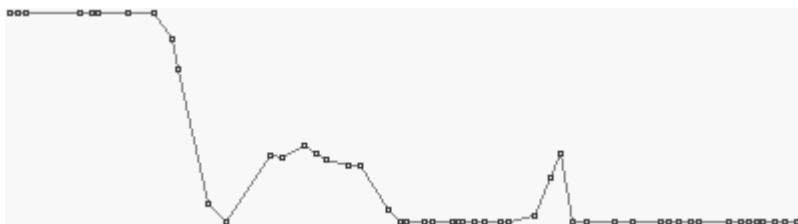


Рис. 3. Профіль після обробки

На рис.1 виділена ділянка річки, вздовж якої за моделлю рельєфу був побудований профіль місцевості. Розрахований профіль представлений на рис. 2. Видно, що профіль істотно відрізняється від монотонно-спадної функції, яка описує течію річки. Це пояснюється тим, що горизонталі вздовж русла річки складаються з окремих відрізків, які перериваються урвищем. Отже, модель рельєфу формується то з одних, то з інших «шматків» ізоліній, зокрема й тих, які мають величину приписаних висот, що значно відрізняються від істинної висоти русла. У результаті профіль рельєфу має не монотонну, а зубчасту форму.

Наведений приклад не є поодиноким випадком. Обстеження близько 100 листів цифрових карт масштабу 1:200 000, 1:1 000 000 рівнинних і гірських місцевостей виявило, що на більш ніж 90% листів трапляється одна або декілька немонотонно поточних річок. Це свідчить про те, що така ситуація є радше типовою, ніж винятковою. Отже, можна дійти висновку, що коректна побудова моделі рельєфу за цифровими топографічними картами неможлива без попередньої обробки, що унеможливило негативний вплив особливостей подання даних на картах.

Потрібно пам'ятати, що точність профілів, побудованих на основі цифрової моделі рельєфу, яка безпосередньо залежить від точності і коректності вихідних даних для моделі, часто є помітно нижчою, ніж точність профілів, побудованих в результаті польової інструментальної зйомки [2].

*Критерії повноти. Повнота ЦМР.* На ЦМР відображено всі континенти, великі острови, архіпелаги Землі. Однак слід зазначити часткову відсутність дрібних, протяжних або низьких островів, що ілюструється наступними прикладами (рис. 4; 5):



Рис. 4. Часткова відсутність дрібних, протяжних або низьких островів



Рис. 5. Часткова відсутність дрібних, протяжних або низьких островів

Не обведені лініями острови не відображено на ЦМР. У районах, де спостерігається безліч дрібних островів, такі ситуації не рідкісні. Розміри пропущених на ЦМР островів звичайно сумірні з розміром осередку цифрової моделі – приблизно 90 м. Але зрідка розміри пропущених островів сягають 300 метрів за максимально довгою стороною острова.

На наш погляд, відсутність дрібних островів пояснюється навмисним застосуванням спеціальної обробки радіосигналу, відбитого від водних поверхонь (для ЦМР, отриманої в проекті SRTM). У процесі обробки, мабуть, видаляються дрібні неоднорідності водної поверхні, порівнянні з розміром одного елемента ЦМР, і вирівнюється (з нульовою висотою) вся поверхня Світового океану.

Ще одна особливість ЦМР - наявність неіснуючих островів (рис. 6). Такі ситуації трапляються вкрай рідко, але все ж можливі. Нижче наведена одна з таких ситуацій. Це риф або мілина, що, можливо, за сильного відпливу перетворюється на сушу [3].

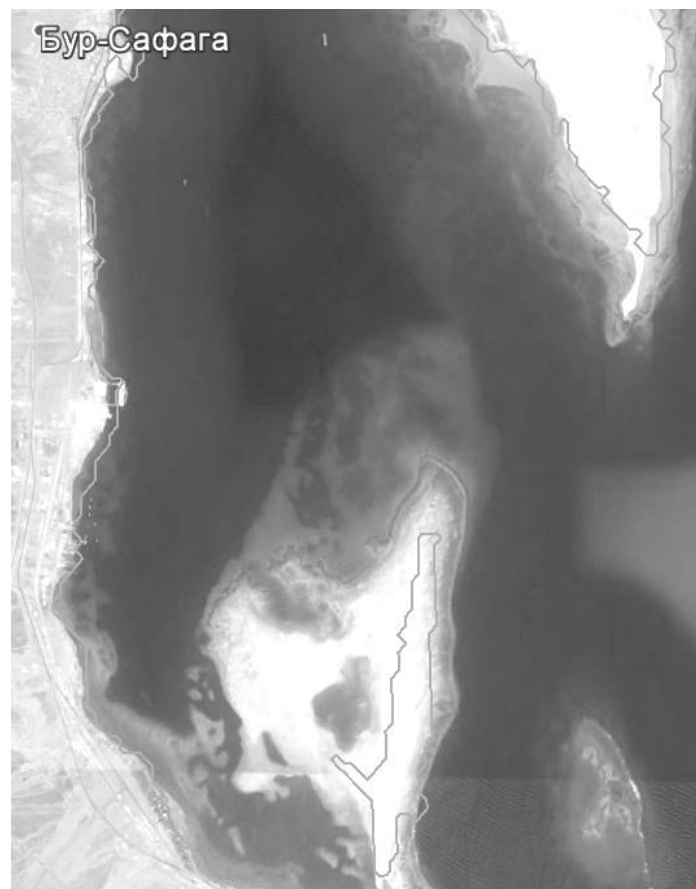


Рис. 6. Неіснуючий острів

Важливим завданням інженерно-геодезичного вишукування при цьому стає забезпечення адекватності створюваної ЦМР фізичному стану місцевості, необхідної і достатньої проектувальнику для ухвалення проектних рішень у процесі створення ЦМР. Така адекватність, крім дотримання норм інженерно-геодезичних вишукувань (точність, склад, повнота даних), особливо потребує:

- відповідності цифрової моделі рельєфу її топографічній реальності;
- просторового представлення в моделі підземних і надземних комунікацій;

- багат шаровості моделі рельєфу і ситуації із завданнями, потрібними проектувальникам, розподілом даних за ієрархічно організованими верствами;  
- інформаційної насиченості об'єктів моделі відомостями, потрібними для ухвалення проектних рішень та їх погодження.

**Висновок.** Отже, якісні оцінки точності побудови цифрових моделей рельєфу у вигляді grid-поверхонь через відтворення горизонталей дають підстави для деяких попередніх висновків [7]. Зокрема, для створення grid-поверхні рельєфу на рівнинних ділянках доцільно застосовувати кригінг з використанням для інтерполяції кожної комірки 50 точок, а у височинних та гірських районах – кригінг на 25 точках, який дає приблизно таку саму точність, однак його виконують у чотири рази швидше. Модель, побудована на базі триангуляції, дає гіршу картину відтворення горизонталей порівняно з кригінгом, вона має характерні помилки, що полягають у «зрізуванні» крутих вигинів горизонталей. Проте остаточно визначитися з параметрами інтерполяції grid-поверхонь рельєфу можна лише на підставі кількісних оцінок.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Сайт* онлайн бібліотеки освітньої і наукової літератури «Edu-Knigi.ru» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://edu-knigi.ru/tikunov/geoinformatika.php?id=30>. – Назва з екрана.
2. *Сайт* компанії «ЗАО КБ "Панорама"» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://www.gisinfo.ru/item/22.html>.
3. *Сайт* «Триангуляція, робота з полігонами і інші алгоритми» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://achawk.narod.ru/DEM.html>. – Назва з екрана.
4. *Сайт* компанії «Estate 3d Ltd.» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.est-3d.ru/articles/tciphrovaia\\_model\\_mestnosti.html](http://www.est-3d.ru/articles/tciphrovaia_model_mestnosti.html). – Назва з екрана.
5. *Абламейко С.В.* Метод підвищення точності моделювання рельєфа местности/ С.В. Абламейко // Геодезія и картографія. – 1993. – № 3. – С. 42-45.
6. *Левченко О.* Створення неперервних поверхонь рельєфу у картографічній системі Arcview / О. Левченко // Вісник Львів. ун-ту. – Львів, 2000. – Вип. 2. – С. 191-196. - Серія прикл. мат. та інф.
7. *Левченко О.* Дослідження точності побудови grid-поверхонь рельєфу: кількісна оцінка / О. Левченко // Вісник Львів. ун-ту. – Львів, 2006. – Вип. 11. – С. 236-243. - Серія прикл. мат. та інф.
8. *Бурштинська Х. В.* Теоретичні та методологічні основи цифрового моделювання рельєфу за фотограмметричними та картометричними даними: автореф. дис. ...д-ра техн. наук: 05.24.02 / Х. В. Бурштинська; [Національний ун-т "Львівська політехніка"]. – Львів, 2003.
9. *Бурштинська Х.В.* Основні чинники впливу на точність побудови цифрових моделей рельєфу/ Х.В. Бурштинська // Матеріали VII Міжнародного науково-технічного симпозіуму «Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища – GPS і GIS-технології». – Алушта. – 2002. – С. 10-17
10. *Бурштинська Х.В.,* Дослідження точності побудови цифрових моделей рельєфу на основі картометричних даних / Х.В. Бурштинська, О.С. Заяць // Вісник геодезії і картографії. – 2002. – № 2. – С. 26-31.

**REFERENCES**

1. Sayt kompaniyi «ZAO KB "Panorama"» [ Site of the company "ZAO KB" Panorama"].gisinfo.ru.item.22.html. Retrieved from <http://www.gisinfo.ru/item/22.html>. [in Russian].
2. Sayt on layn biblioteky osvity i naukovoyi literatury «Edu-Knigi.ru» [Site online library of educational and scientific literature «Edu-Knigi.ru»]. edu-knigi.ru.tikunov.geoinformatika.php?id=30. Retrieved from <http://edu-knigi.ru/tikunov/geoinformatika.php?id=30>. [in Russian].
3. Sayt «Trianhulyatsiya, robota z polihonamy i inshi alhorytmy» [Site "Triangulation, work with polygons and other algorithms" ]. achawk.narod.ru.DEM.html. Retrieved from <http://achawk.narod.ru/DEM.html>. [in Russian].
4. Sayt kompaniyi «Estate 3d Ltd.»[ Site of the company «Estate 3d Ltd.»]. [www.est-3d.ru.articles.tciphrovaia\\_model\\_mestnosti.html](http://www.est-3d.ru/articles/tciphrovaia_model_mestnosti.html). Retrieved from [http://www.est-3d.ru/articles/tciphrovaia\\_model\\_mestnosti.html](http://www.est-3d.ru/articles/tciphrovaia_model_mestnosti.html). [in Russian].
5. Ablameyko S.V. (1993). Metod povysheniya tochnosti modelirovaniya relefa mestnosti [The method of increasing the accuracy of the modeling terrain]. Geodeziya i kartografiya – Geodesy and Cartography, 3, 42 – 45 [in Russian].
6. Levchenko O. (2000). Stvorenyya neperervnykh poverkhon' rel'yefu u kartorafichnyy systemi Arcview[Creation of continuous relief surfaces in the cartographical system Arcview]. Visn. L'viv. un-tu. Ser. prykl. matematyka ta informatyka – Reporter Lviv university series applied mathematics and informatics [in Ukrainian].
7. Levchenko O. (2005). Doslidzhennya tochnosti pobudovy grid-poverkhon' rel'yefu: yakisna otsinka [Study accuracy building grid-relief surfaces: a qualitative assessment]. Visn. L'viv. un-tu. Ser. prykl. matematyka ta informatyka – Reporter Lviv university. series applied mathematics and informatics [in Ukrainian].
8. Burshtyn's'ka Kh.V. (2003). Teoretychni ta metodolohichni osnovy tsyfrovoho modelyuvannya rel'yefu za fotohrammetrychnymy ta kartometrychnymy danymy [Theoretical and methodological bases for digital terrain modeling and photogrammetric dimensions on landscape maps data]. Doctor's thesis. National University "Lviv Polytechnic". – Lviv [in Ukrainian].
9. Burshtyn's'ka Kh.V. (2002). Osnovni chynnyky vplyvu na tochnist' pobudovy tsyfrovyykh modeley rel'yefu [The main factors affecting the accuracy of digital elevation models]. Materials from GmeGG '02: VII Mizhnarodnyy naukovy-tekhnichnyy sympozium “Heoinformatsiynnyy monitorynh navkolyshn'oho seredovyscha – GPS i GIS-tekhnolohiyi” – Materials of VII International scientific and technical symposium "Geoinformation monitoring of environment - GPS and GIS-technologies". Alushta [in Ukrainian].
10. Burshtyn's'ka Kh.V., Zajac A.S. (2002) Doslidzhennya tochnosti pobudovy tsyfrovyykh modeley rel'yefu na osnovi kartometrychnyykh danykh [Study accuracy of digital elevation models based on photogrammetric dimensions on landscape maps data]. Visnyk heodeziyi i kartografii – Bulletin of Surveying and Mapping, [in Ukrainian].

## КРИТЕРИЙ КАЧЕСТВА, ТОЧНОСТИ И ПОЛНОТЫ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА

*Относительно моделирования рельефа остаются нерешенными вопросы, среди которых доминирующими являются выявление влияния различных факторов на точность математического моделирования рельефа, выбор оптимальных математических методов создания ЦМР. Проблема высокоточного математического моделирования особенно важна в задачах проектирования объектов по ЦМР, определение гидрологических характеристик, исследования эрозионных процессов. Таким образом, проблематика построения ЦМР является в дальнейшем актуальной задачей как в научном, так и в прикладном аспектах.*

**Ключевые слова:** *позиционная точность, дисперсия ошибок высот, несуществующий остров.*

A. Ostrovsky

## CRITERIA OF QUALITY, ACCURACY AND COMPLETENESS DIGITAL ELEVATION MODELS

*Regarding modeling relief remain unresolved issues, among which are the dominant identification of various factors on the accuracy of the mathematical modeling of the relief, the choice of optimal mathematical methods DTM. The problem of high-precision mathematical modeling is particularly important in the tasks of designing facilities for the DEM, the definition of the hydrological characteristics, the study of erosion processes. Thus, the problems of DTM is an urgent task in the future both in the scientific and applied aspects. The process of creating elevation model (or a triangular matrix form) in this type of digital data is now well understood, implemented in many GIS packages. But it is clear that the quality and accuracy of the obtained models determined by the quality, accuracy and presentation features original digital data - contours, elevation marks, etc.*

**Keywords:** *positional accuracy variance of the error of heights, non-existent island.*

**К. Р. ТРЕТЯК**, *д-р техн. наук, професор*  
*кафедри вищої геодезії та астрономії,*  
**К. Б. СМОЛІЙ**, *асист. кафедри*  
*фотограмметрії та геоінформатики,*  
**О.В. СЕРАНТ**, *асист. кафедри геодезії,*  
*Національний університет "Львівська політехніка"*

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ УРІВНОВАЖЕННЯ ГНСС-МЕРЕЖ

*З метою максимального вилучення систематичних похибок на етапі опрацювання ГНСС-мереж, створених на основі декількох сесій спостережень, розроблено диференційний метод їх урівноваження. За диференційним методом пропонується частково замінити рівняння поправок вимірних векторів на рівняння поправок різниць цих векторів. Виконано порівняння результатів урівноваження двох мереж з ідеальними умовами видимості і з обмеженим доступом до супутників. Ефективність диференційного методу врівноваження ГНСС-вимірів порівняно з класичним параметричним становить 10-50%.*

**Ключові слова:** *похибки ГНСС-вимірів, диференційний метод урівноваження, параметричний метод урівноваження.*

**Постановка проблеми.** Нині ГНСС-спостереження широко використовують у процесі моніторингу за деформаціями інженерних споруд ГЕС. Такі дослідження потребують високої точності отриманих результатів, а для цього слід максимально зменшити вплив випадкових та систематичних похибок. Відомо чимало методів та способів усунення систематичних похибок з ГНСС-вимірів, але незважаючи на це, вплив похибок залишається суттєвим та значною мірою позначається на результатах опрацювання ГНСС-вимірювань. Для зменшення систематичних похибок нами розроблено диференційний метод урівноваження ГНСС-мереж, уже досліджений для мереж з імітацією складних умов доступу до супутникових сигналів [4]. Вважаємо за доцільне дослідити його ефективність для урівноваження ГНСС-мереж, які мають задовільні умови.

**Мета роботи** – виконати врівноваження ГНСС-мереж за запропонованими диференційним та класичним параметричним методами та дослідити його ефективність порівняно з класичним параметричним методом.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасній геодезії метод ГНСС-спостережень широко застосовують у різноманітних дослідженнях. Однією із сфер застосування цього методу є моніторинг деформацій інженерних споруд, особливо об'єктів ГЕС [1; 3], тому важливим є отримання результатів високої точності. Для підвищення точності результатів ГНСС-спостережень потрібно зменшити вплив систематичних похибок, які виникають під час одночасних вимірювань, адже ці похибки становлять 2 мм для ліній довжиною близько 20 км [2]. Застосовують багато методів та способів зменшити вплив саме систематичних похибок на результати ГНСС-спостережень [5; 6; 7], але їх громіздкі та трудомісткі алгоритми



спрямовані переважно на усунення однієї зі складових цієї похибки, що не завжди дає змогу отримати бажаний результат.

**Виклад основного матеріалу.** Нині відомо чимало методів та способів усунення систематичних похибок з ГНСС-вимірів, але, незважаючи на це, вплив похибок залишається суттєвим, що значною мірою позначається на результатах опрацювання ГНСС-вимірів. Для зменшення впливу систематичних похибок нами розроблено диференційний метод урівноваження ГНСС-мереж, який є модифікацією класичного параметричного методу [4]. Особливістю запропонованого методу є те, що для трикутника з одночасно виміряними векторами замість рівнянь поправок усіх векторів потрібно складати рівняння поправок різниць векторів, при цьому утворені рівняння різниць не повинні мати спільних векторів. Для векторів, які не ввійшли в рівняння різниць векторів, записують класичні рівняння поправок. Отже, у диференційному методі можуть бути застосовані два типи рівнянь – рівняння поправок векторів (1) і їх різниць (2):

$$\begin{aligned} \delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} + \delta x_j \frac{\partial f}{\partial x_j} + l_{x_{ij}} &= v_{x_{ij}} ; \\ \delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} + \delta y_j \frac{\partial f}{\partial y_j} + l_{y_{ij}} &= v_{y_{ij}} ; \\ \delta z_i \frac{\partial f}{\partial z_i} + \delta z_j \frac{\partial f}{\partial z_j} + l_{z_{ij}} &= v_{z_{ij}} , \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \delta x_i \frac{\partial f}{\partial x_i} - \delta x_m \frac{\partial f}{\partial x_m} + \left( l_{x_{ij}} - l_{x_{mj}} \right) &= v_{x_{im}} ; \\ \delta y_i \frac{\partial f}{\partial y_i} - \delta y_m \frac{\partial f}{\partial y_m} + \left( l_{y_{ij}} - l_{y_{mj}} \right) &= v_{y_{im}} ; \\ \delta z_i \frac{\partial f}{\partial z_i} - \delta z_m \frac{\partial f}{\partial z_m} + \left( l_{z_{ij}} - l_{z_{mj}} \right) &= v_{z_{im}} , \end{aligned} \quad (2)$$

де

$$\begin{aligned} l_{x_{ij}} &= \Delta x_{ij_{вим}} - \Delta x_{ij_{набл}} ; \\ l_{x_{mj}} &= \Delta x_{mj_{вим}} - \Delta x_{mj_{набл}} ; \\ l_{y_{ij}} &= \Delta y_{ij_{вим}} - \Delta y_{ij_{набл}} ; \\ l_{y_{mj}} &= \Delta y_{mj_{вим}} - \Delta y_{mj_{набл}} ; \\ l_{z_{ij}} &= \Delta z_{ij_{вим}} - \Delta z_{ij_{набл}} ; \\ l_{z_{mj}} &= \Delta z_{mj_{вим}} - \Delta z_{mj_{набл}} ; \end{aligned} \quad (3)$$

$i, j, m$  – пункти трикутника, між якими виміряні вектори.

Застосовуючи класичний метод урівноваження для трикутника, утвореного трьома одночасно вимірними векторами, складають дев'ять рівнянь. Відповідно за диференційним методом, на відмінну від класичного параметричного методу, кількість рівнянь поправок для кожного трикутника буде на одне менше, що погіршує стійкість розв'язку та негативно позначається на оцінці точності врівноваженої мережі, але дає можливість вилучити систематичні похибки. Подальше урівноваження мережі за диференційним методом виконують за способом найменших квадратів.

Для доведення більшої ефективності диференційного методу урівноваження мереж порівняно з класичним параметричним методом нами вже виконано дослідження на трьох мережах з імітацією складних умов доступу до супутникових сигналів (кут відсічки супутників становив  $20^{\circ}$ , тривалість спостережень обмежена чотирма годинами) [4]. Мережі склалися з 6, 8 та 10 станцій, на яких розміщено двочастотні ГНСС-приймачі. Частота спостережень становила 15 секунд, максимальна відстань між станціями – 76 км. Під час досліджень виявлено, що середні та максимальні похибки визначення координат пунктів загалом на 10-50% менші за результатами диференційного методу урівноваження порівняно з класичним параметричним методом урівноваження, що підтверджує переваги диференційного методу з усунення систематичних похибок вимірів. Узагальнюючи результати опрацювання усіх трьох мереж, варто також зазначити, що середньоквадратичні похибки координат пунктів, визначені за класичним параметричним методом, в середньому на 60% менші, ніж помилки, визначені за тим самим методом, а для диференційного методу вони менші в середньому на 20%, що також підтверджує вищу достовірність результатів, отриманих за диференційним методом.

Зважаючи на викладене, доцільним є дослідити ефективність диференційного методу врівноваження ГНСС-вимірів для мереж, які мають задовільні умови відкритості горизонту (кут відсічки супутників становив  $10^{\circ}$ , тривалість спостережень обмежена 12 годинами). Для цього нами була вибрана мережа, що складається з восьми перманентних станцій (рис. 1), розміщених на південному заході США (південна Каліфорнія) поблизу узбережжя Тихого океану.

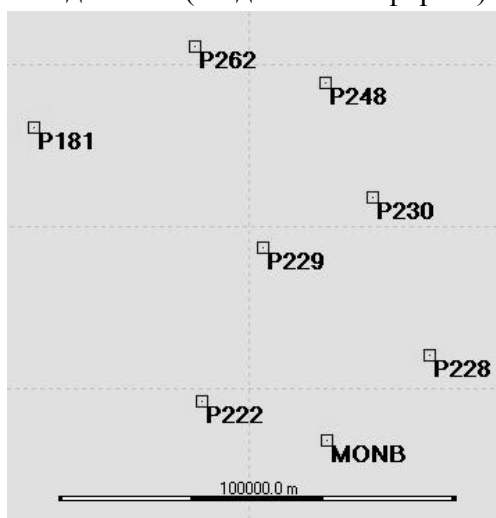


Рис. 1. Схема мережі ГНСС станцій

На кожному пункті мережі встановлено двочастотні ГНСС-приймачі, частота спостережень – 15 секунд. Мережа складається зі станцій p181, MONB, p222, p228, p229, p230, p248, p262. Вхідними даними для обчислення векторів і врівноваження мереж були RINEX-файли результатів ГНСС-вимірів на цих станціях, розміщених у вільному доступі на сайті Scripps Orbit and Permanent Array Center [8], а також значення точних ефемерид.

Схему вимірів для мережі складено з комбінації усіх можливих трикутників, утворених трьома одночасно вимірними векторами. Вимірювали вектори кожного трикутника щоразу в іншу добу, таким чином, період вимірювання становив 56 днів. Календарний графік вимірювань представлено в табл. 1.

Таблиця 1

**Календарний графік вимірювань для I і II мереж**

№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції	№ дня	Дата спостережень	Станції
1	1.04.2014	p181, p262, p248	2	2.04.2014	p181, p262, p230	3	3.04.2014	p181, p262, P228	4	4.04.2014	p181, p262, MONB
5	5.04.2014	p181, p262, P222	6	6.04.2014	p181, p262, p229	7	7.04.2014	p181, p248, p230	8	8.04.2014	p181, p248, P228
9	9.04.2014	p181, p248, MONB	10	10.04.2014	p181, p248, P222	11	11.04.2014	p181, p248, p229	12	12.04.2014	p181, p230, P228
13	13.04.2014	p181, p230, MONB	14	14.04.2014	p181, p230, P222	15	15.04.2014	p181, p230, p229	16	16.04.2014	p181, P228, MONB
17	17.04.2014	p181, P228, P222	18	18.04.2014	p181, P228, p229	19	19.04.2014	p181, MONB, P222	20	20.04.2014	p181, MONB, p229
21	21.04.2014	p181, P222, p229	22	22.04.2014	p262, p248, p230	23	23.04.2014	p262, p248, P228	24	24.04.2014	p262, p248, MONB
25	25.04.2014	p262, p248, P222	26	26.04.2014	p262, p248, p229	27	27.04.2014	p262, p230, P228	28	28.04.2014	p262, p230, MONB
29	29.04.2014	p262, p230, P222	30	30.04.2014	p262, p230, p229	31	1.05.2014	p262, P228, MONB	32	2.05.2014	p262, P228, P222
33	31.05.2014	p262, P228, p229	34	4.05.2014	p262, MONB, P222	35	5.05.2014	p262, MONB, p229	36	6.05.2014	p262, P222, p229
37	7.05.2014	p248, p230, P228	38	8.05.2014	p248, p230, MONB	39	9.05.2014	p248, p230, P222	40	10.05.2014	p248, p230, p229
41	11.05.2014	p248, P228, MONB	42	12.05.2014	p248, P228, P222	43	13.05.2014	p248, P228, p229	44	14.05.2014	p248, MONB, P222
45	15.05.2014	p248, MONB, p229	46	16.05.2014	p248, P222, p229	47	17.05.2014	p230, P228, MONB	48	18.05.2014	p230, P228, P222
49	19.05.2014	p230, P228, p229	50	20.05.2014	p230, MONB, P222	51	21.05.2014	p230, MONB, p229	52	22.05.2014	p230, P222, p229
53	23.05.2014	P228, MONB, P222	54	24.05.2014	P228, MONB, p229	55	25.05.2014	P228, P222, p229	56	26.05.2014	MONB, P222, p229

Особливістю порівняння результатів урівноваження мережі є те, що обчислення векторів було виконане двічі: один раз – в програмному пакеті LGO (Leica Geo Office), другий – в програмному пакеті TBC (Trimble Business Centre). Для визначення точності координат пунктів та встановлення переваг і недоліків, отриманих за результатами обох методів, потрібно мати достовірні, «істинні» координати пунктів. За істинні координати пунктів взято урівноважені координати, визначені на підставі опрацювання тривалих рядів спостережень з центру SOPAC, редуковані на середню епоху вимірювань [8].

Урівноваження виконано за диференційним та класичним параметричним методами. За координати першого пункту мережі взято координати, визначені центром SOPAC, координати решти пунктів отримано за результатами урівноваження. На основі отриманих координат з урівноважених мереж визначено їх різниці з координатами відповідних пунктів. Ці різниці визначені для класичного параметричного та диференційного методів і трансформовані на площину універсальної проєкції Меркатора. Різниці, визначені відносно координат центру SOPAC, можна інтерпретувати як помилки визначення координат пунктів за результатами урівноваження, тому далі ці різниці називаємо помилками визначених координат за відповідним методом урівноваження. Результати визначення помилок координат пунктів  $\delta x$ ,  $\delta y$ ,  $\delta h$  для мережі (вектори обчислено в програмному пакеті LGO) за двома методами урівноваження представлено в табл. 2. В передостанньому рядку таблиці наведено суму, а в останньому рядку – середнє значення відповідних помилок. У колонках 8 і 9 зазначено помилки кожного з пунктів у плані, а у колонках 10 і 11 – в просторі. В табл. 2 представлена апостеріорна оцінка точності визначених координат пунктів за результатами урівноваження диференційним та класичним параметричним методами. В останньому рядку наведено середні квадратичні похибки визначення координат пунктів.

Результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті LGO) представлені у табл. 2 та 3 і на рис. 2. З рисунків 2, а; 2, б та 2, в і табл. 2 видно, що помилки у визначених за диференційним методом координат є значно меншими, ніж помилки у координатах, визначених за класичним методом для осей  $x$  і  $y$ , за винятком п. 3 для осі  $x$ , а на осі  $h$  вони приблизно однакові. Зміну помилок у визначенні координат в плані і просторі зображено на рис. 2, з і 2, д. Слід зазначити, що помилки, отримані за диференційним методом, є меншими, ніж помилки, визначені з урівноваження за класичним параметричним методом. Ефективність запропонованого методу становить 15% в плані і 4% – в просторі.

Таблиця 2

**Помилки координат пунктів мережі, визначені за диференційним і класичним параметричним методами (вектори обчислені в програмному пакеті LGO)**

№ пункту	$\delta x$ диф, мм	$\delta x$ клас, мм	$\delta y$ диф, мм	$\delta y$ клас, мм	$\delta h$ диф, мм	$\delta h$ клас, мм	$\delta$ план диф, мм	$\delta$ план клас, мм	$\delta$ прос диф, мм	$\delta$ прос клас, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-8,0	-27,8	3,7	18,6	15,9	38,2	8,8	33,5	18,2	50,8
3	10,4	-1,6	-0,2	-2,1	10,5	39,9	10,4	2,6	14,8	39,9

№ пункту	$\delta x$ диф, мм	$\delta x$ клас, мм	$\delta y$ диф, мм	$\delta y$ клас, мм	$\delta h$ диф, мм	$\delta h$ клас, мм	$\delta$ план диф, мм	$\delta$ план клас, мм	$\delta$ прост диф, мм	$\delta$ прост клас, мм
4	19,8	18,7	-5,4	-9,5	-15,2	11,8	20,6	21,0	25,6	24,1
5	18,1	23,0	-5,6	-9,3	-42,8	-31,3	18,9	24,8	46,8	39,9
6	7,9	13,2	-2,3	-6,2	-31,5	-20,7	8,2	14,6	32,6	25,3
7	-8,2	-3,7	-8,0	-6,7	-122,6	-96,8	11,5	7,7	123,1	97,1
8	-29,3	-26,3	19,7	17,0	-3,4	-5,4	35,3	31,3	35,5	31,7
$ \Sigma $	101,7	114,4	44,9	69,2	241,9	244,1	113,7	135,4	296,5	308,9
серед	14,5	16,3	6,4	9,9	34,6	34,9	16,2	19,3	42,4	44,1

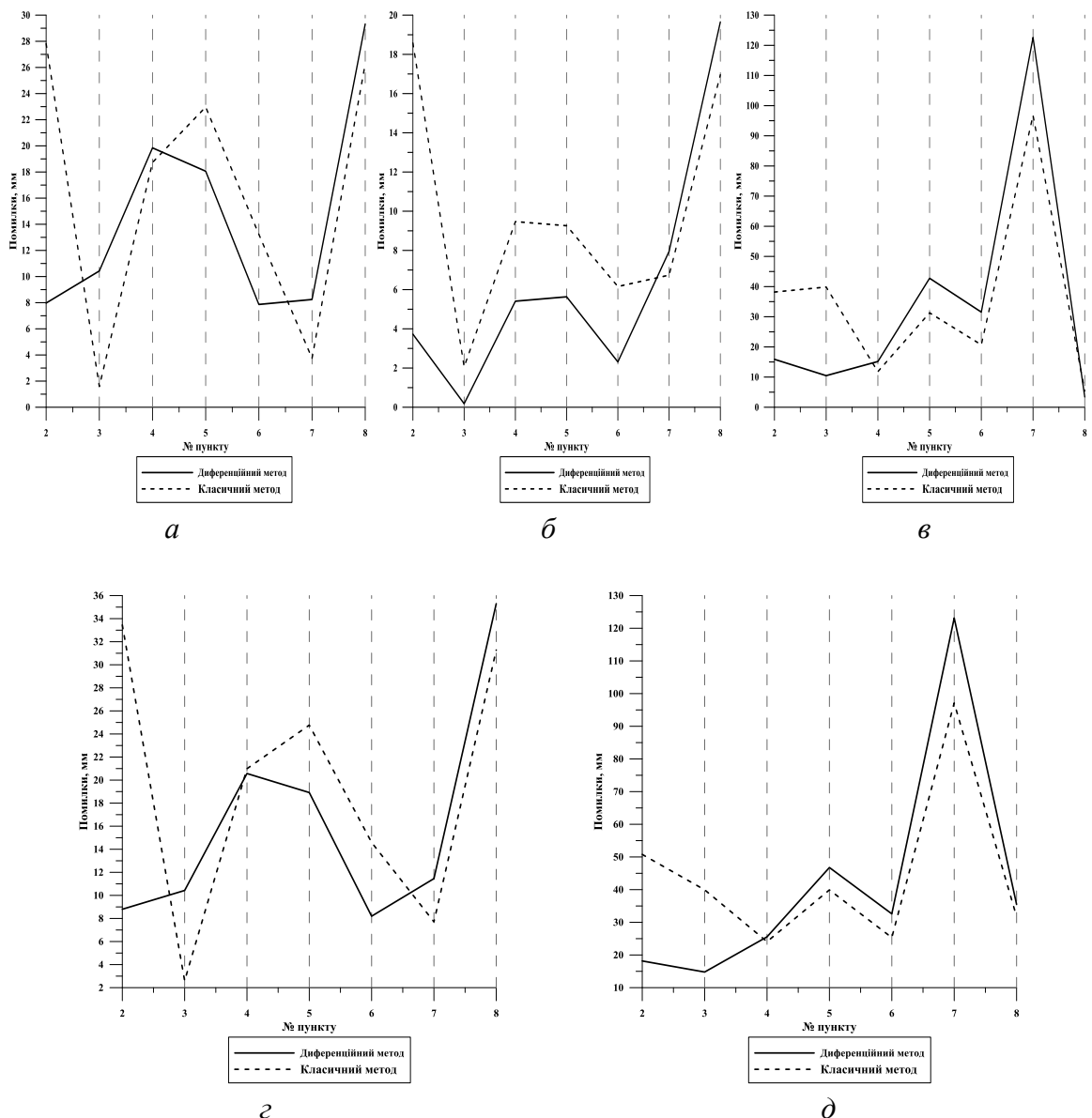


Рис. 2. Зміна помилок у визначенні координат пунктів за диференційним та класичним параметричним методами:  
 а – помилки  $\delta x$ ; б – помилки  $\delta y$ ; в – помилки  $\delta h$ ;  
 г – помилки в плані; д – помилки в просторі

Результати дослідження апостеріорної оцінки точності у визначенні координат за двома методами представлено у табл. 3. Порівнявши середні середньоквадратичні похибки та помилки у визначених координатах пунктів мережі, для яких вектори обчислені в програмному пакеті LGO, можна стверджувати, що для диференційного методу похибки менші за помилки на 20%, а для класичного параметричного – менші на 60%, що підтверджує наявність систематичних похибок.

Таблиця 3

**Середні квадратичні похибки координат пунктів, визначених за диференційним і класичним параметричним методами (вектори обчислені в програмному пакеті LGO)**

№ пункту	$m_x$ диф, мм	$m_x$ клас, мм	$m_y$ диф, мм	$m_y$ клас, мм	$m_h$ диф, мм	$m_h$ клас, мм	$m$ план диф, мм	$m$ план клас, мм	$m$ прос диф, мм	$m$ прос клас, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	9,7	1,1	8,2	8,7	21,5	21,2	12,7	8,7	25,0	23,0
3	10,7	1,2	4,3	5,1	23,5	23,1	11,6	5,3	26,2	23,7
4	11,5	1,2	3,9	4,9	22,3	20,2	12,1	5,0	25,4	20,8
5	11,2	1,0	4,2	5,3	24,9	22,4	12,0	5,4	27,6	23,0
6	11,4	1,1	4,4	5,5	23,5	15,8	12,2	5,6	26,5	16,7
7	11,8	1,1	6,3	5,0	28,2	22,6	13,4	5,1	31,2	23,2
8	15,9	1,1	10,3	5,4	31,4	20,5	19,0	5,5	36,7	21,2
серед	11,7	1,1	5,9	5,7	25,1	20,8	13,3	5,8	28,4	21,7

У табл. 4 та 5 і на рис. 3 відображені результати опрацювання мережі (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС) за диференційним і класичним параметричним методами. З рис. 3, в видно, що на осі  $h$  результати є приблизно однаковими (рис. 3, в), за винятком пункту 8. Та якщо розглянути результати опрацювання мережі в плані та просторі (рис. 3, г; 3, д), то ефективність диференційного методу становить 15% порівняно з класичним параметричним методом.

Таблиця 4

**Помилки координат пунктів мережі, визначених за диференційним і класичним параметричним методами (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС)**

№ пункту	$\delta x$ диф, мм	$\delta x$ клас, мм	$\delta y$ диф, мм	$\delta y$ клас, мм	$\delta h$ диф, мм	$\delta h$ клас, мм	$\delta$ план диф, мм	$\delta$ план клас, мм	$\delta$ прос диф, мм	$\delta$ прос клас, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	-8,1	-26,5	3,2	16,3	-1,7	-1,8	8,7	31,1	8,9	31,2
3	11,3	0,6	-0,8	-3,1	-3,4	-5,9	11,3	3,2	11,8	6,7
4	20,2	20,3	-5,6	-10,3	-0,3	-3,7	20,9	22,7	20,9	23,0
5	17,3	22,8	0,0	-4,6	-1,9	-4,9	17,3	23,2	17,4	23,8
6	6,8	12,5	-2,4	-6,0	4,6	-1,3	7,2	13,8	8,5	13,9
7	-13,8	-9,1	-6,0	-4,2	-55,1	-56,3	15,0	10,1	57,1	57,2
8	-29,3	-26,3	17,6	16,9	14,0	-0,4	34,2	31,2	36,9	31,2
$ \Sigma $	106,8	118,0	35,6	61,5	80,9	74,4	114,7	135,4	161,6	187,0
серед	15,3	16,9	5,1	8,8	11,6	10,6	16,4	19,3	23,1	26,7

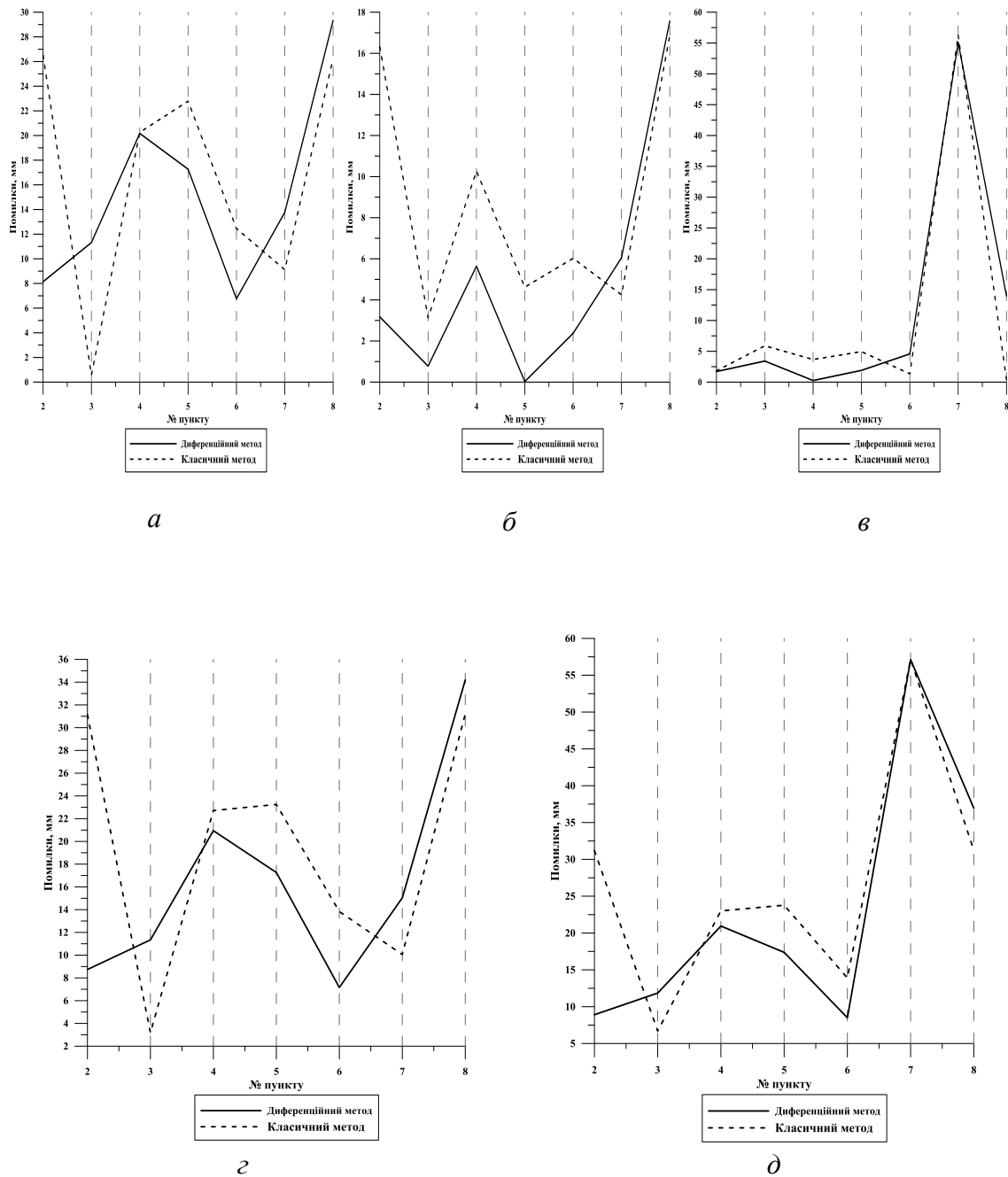


Рис. 3. Зміна помилок у визначенні координат пунктів за диференційним та класичним параметричним методами  
 а – помилки  $\delta x$ ; б – помилки  $\delta y$ ; в – помилки  $\delta h$ ;  
 г – помилки в плані; д – помилки в просторі

У табл. 5 представлені дослідження апостеріорної оцінки точності визначення координат за двома методами мережі, для якої вектори обчислені в програмному пакеті ТВС. Результати свідчать, що точність визначення координат за класичним методом є вищою, ніж за запропонованим диференційним. Ці результати, як і для попередніх мереж, зумовлені тим, що кількість рівнянь поправок за класичним методом є більшою, ніж за диференційним. За результатами опрацювання за двома

методами мережі (вектори обчислені в програмному пакеті ТВС) виявлено, що середньоквадратичні похибки, визначені за диференційним методом у середньому менші за помилки на 7%, а за класичним параметричним методом вони в середньому менші на 45%, що ще раз підтверджує наявність систематичних похибок у вимірах та ефективність урівноваження мереж за диференційним методом.

Таблиця 5

**Середні квадратичні похибки координат пунктів, визначених  
за диференційним і класичним параметричним методами  
(вектори обчислені в програмному пакеті ТВС)**

№ пункту	$m_x$ диф, мм	$m_x$ клас, мм	$m_y$ диф, мм	$m_y$ клас, мм	$m_h$ диф, мм	$m_h$ клас, мм	$m$ план диф, мм	$m$ план клас, мм	$m$ прос диф, мм	$m$ прос клас, мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
2	9,7	1,2	7,9	9,1	11,2	13,1	12,6	9,2	16,9	16,0
3	10,8	1,3	4,2	5,4	12,3	14,3	11,6	5,5	16,9	15,3
4	11,6	1,2	3,8	5,2	11,7	12,5	12,2	5,3	16,8	13,6
5	10,7	1,0	4,1	5,6	12,9	13,7	11,4	5,7	17,2	14,8
6	11,0	1,1	4,3	5,7	11,6	9,7	11,8	5,9	16,6	11,3
7	12,3	1,2	6,1	5,3	14,5	13,8	13,7	5,4	20,0	14,8
8	16,4	1,1	9,5	5,7	18,7	12,9	18,9	5,8	26,6	14,2
серед	11,8	1,1	5,7	6,0	13,3	12,9	13,2	6,1	18,7	14,3

У табл. 6 та на рис. 4 наведено зведені результати визначення середніх помилок з опрацювання мереж за диференційним і класичним методами, а в табл. 6 – середні середньоквадратичні похибки за результатами урівноваження. В підсумку середні помилки визначення координат пунктів для мережі I та II на 10-20% менші за результати, отримані за диференційним методом урівноваження порівняно з класичним, що ще раз доводить ефективність запропонованого диференційного методу урівноваження, навіть за умов обчислення векторів за допомогою різних програмних продуктів.

Таблиця 6

**Середні помилки координат, визначених за диференційним та класичним  
параметричним методами**

Опрацювання в програмному пакеті	$\delta x$ диф, мм	$\delta x$ клас, мм	$\delta y$ диф, мм	$\delta y$ клас, мм	$\delta h$ диф, мм	$\delta h$ клас, мм	$\delta$ план диф, мм	$\delta$ план клас, мм	$\delta$ прос диф, мм	$\delta$ прос клас, мм
Середні										
LGO	14,5	16,3	6,4	9,9	34,6	34,9	16,2	19,3	42,4	44,1
TBC	15,3	16,9	5,1	8,8	11,6	10,6	16,4	19,3	23,1	26,7



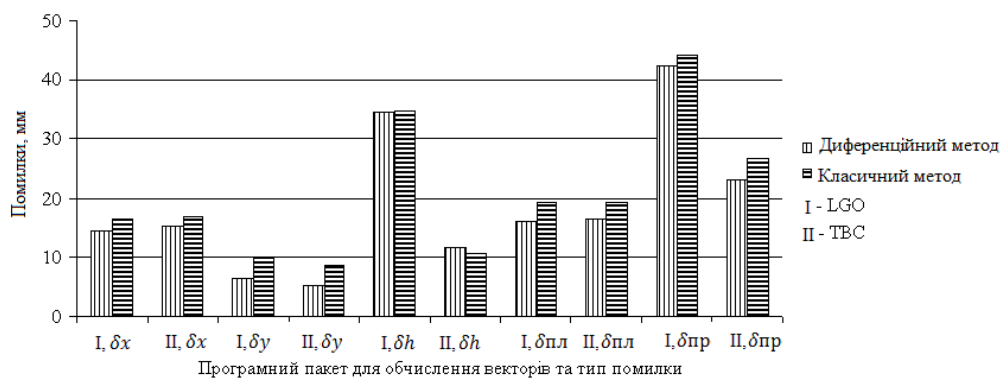


Рис. 4. Середні помилки координат, визначених за диференційним та класичним параметричним методами за результатами опрацювання трьох мереж

Таблиця 7

**Середні середньоквадратичні похибки визначених координат за диференційним та класичним параметричним методами**

Опрацювання в програмному пакеті	$m_x$	$m_x$	$m_y$	$m_y$	$m_h$	$m_h$	$m_{план}$	$m_{план}$	$m_{прост}$	$m_{прост}$
	диф, мм	клас, мм	диф, мм	клас, мм	диф, мм	клас, мм	диф, мм	клас, мм	диф, мм	клас, мм
Середні										
LGO	11,7	1,1	5,9	5,7	25,1	20,8	13,3	5,8	28,4	21,7
TBC	11,8	1,1	5,7	6,0	13,3	12,9	13,2	6,1	18,7	14,3

На підставі виконаних досліджень виявлено, що результати опрацювання вимірів ГНСС-мереж в умовах, рекомендованих для виконання ГНСС-спостережень за розробленим диференційним методом, дає змогу частково вилучити з опрацювання систематичні похибки, які проявляються під час опрацювання ГНСС-мереж за класичним методом. Ефективність диференційного методу урівноваження порівняно з класичним параметричним становить 10-20%, але тільки для ідеальних умов видимості супутників, у разі обмеження видимості ефективність запропонованого методу є вищою, що пов'язано з підвищенням впливу систематичних похибок.

Помилки у визначенні координат пунктів за диференційним методом є практично співвимірними з середньоквадратичними похибками, отриманими з урівноваження мереж, натомість за умови опрацювання мереж за класичним методом помилки значно перевищують визначені параметри точності мереж.

**Висновки**

1. Розроблено диференційний метод опрацювання ГНСС-вимірів з метою вилучення систематичних похибок, які виникають за одночасних ГНСС-спостережень.
2. Ефективність диференційного методу апробовано на мережах з ідеальними умовами видимості супутників (повністю відкритий горизонт) і з обмеженою видимістю супутників. Результати опрацювання мереж перевірено у двох програмних пакетах (LGO, TBC).

3. Похибки визначення координат за диференційним методом порівняно з класичним параметричним методом для мереж з ідеальними умовами видимості супутників на 10-20% є меншими. Для мереж з незадовільними умовами спостережень (кут відсічки супутників становив  $20^0$ ) ефективність диференційного методу порівняно з класичним параметричним методом становить 10-50%.

4. Розроблену методику слід застосувати для опрацювання ГНСС-вимірів, які виконують за декілька сесій на мережах, призначених для геодинамічних полігонів, і для моніторингу деформацій великих інженерних споруд.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Грицюк Т.Ю. До питання розробки методики моніторингу вертикальних зміщень інженерних споруд ГЕС за допомогою GPS-технологій / Т.Ю. Грицюк // Геоінформаційний моніторинг навколишнього середовища: GPS і GIS-технології: Матеріали XII міжнародного науково-технічного симпозіуму (м. Алушта). – Алушта: ЛАГТ, 2007. – С. 215-219.

2. Тревого І. Метрологічна атестація еталонного базиса технологією GNSS / І. Тревого, І. Цюпак // Метрологія. – 2014. – С. 381-384.

3. Третяк К.Р. Аналіз стійкості пунктів системи автоматизованого геодезичного моніторингу інженерних споруд Канівської ГЕС / К.Р. Третяк, С.Л. Петров, Ю.І. Голубінка, Ф. К. Ф. Аль-Алусі // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2014. – Вип. 80. – С. 5-19.

4. Третяк К.Р. Урівноваження диференційним методом ГНСС мереж з обмеженим доступом до супутникових сигналів / К.Р. Третяк, К.Б. Смолій // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2015. – Вип. 81. – С. 25-45.

5. Fritsche M., Dietrich R., Knöfel C., Rülke A., Vey S., Rothacher M., Steigenberger P. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. Geophysical research letters, 2005, Vol. 32, Issue 23, L23311, doi:10.1029/2005GL024342.

6. Mosavi M., Azarshahi S., Emamgholipour I., Abedi A. Least squares techniques for GPS receivers positioning filter using pseudo-range and carrier phase measurements. Iranian Journal of electrical and electronic engineering, 2014, Vol. 10, No. 1, pp. 18-26.

7. Schmid R., Steigenberger P., Gendt G., Ge M., Rothacher M. Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. Journal of Geodesy, 2007, Vol. 81, Issue 12, pp. 781-798.

8. Сайт центру SOPAC [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml>. – Назва з екрана.

### REFERENCES

1. Grycjuk T.Ju. (2007). Do pytannya rozrobky metodyky monitorynhu vertykal'nykh zmishchen' inzhenernykh sporud HES za dopomohoyu GPS tekhnolohiy [On the development of methods of monitoring the vertical displacement of hydroelectric engineering structures using GPS technology]. Zbirnyk naukovykh prac' XII mizhnarodnogo naukovno-tehnichnogo sympoziumu "Geoinformacijnyj monitoryng navkolyshn'ogo seredovyshha GPS i GIS-tehnologii" Scientific Papers XII international scientific symposium "Geoinformation monitoring of environment GPS and GIS-technologies". (pp. 215-219). [in Ukraine].

2. Trevogo I., Cjupak I. (2014). Metrologichna atestacija etalonnogo bazysa tehnologijeju GNSS [Metrological certification of reference bases using GNSS technology]. Metrologija Metrology. (pp. 381-384). [in Ukraine].
3. Tretyak K.R., Petrov S.L., Holubinka Yu.I., Al-Alusi F.K.F. (2014). Analiz stiykosti punktiv systemy avtomatyzovanoho heodezychnoho monitorynhu inzhenernykh sporud Kanivs'koyi HES [Analysis of stability of points of automated geodetic monitoring of engineering structures kanev HPP]. Gheodezija, kartohrafija i aerofotozнимannja Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Vol. 80. (pp. 5-19). [in Ukraine].
4. Tretyak K.R., Smolij K.B. (2015). Urivnovazhennya dyferentsiynym metodom HNSS merezh z obmezhenym dostupom do suputnykovykh syhnaliv [Differential method's adjustment for GNSS networks with limited access to satellite signals]. Gheodezija, kartohrafija i aerofotozнимannja Geodesy, Cartography and Aerial Photography. Vol. 81. (pp. 25-45). [in Ukraine].
5. Fritsche M., Dietrich R., Knöfel C., Rülke A., Vey S., Rothacher M., Steigenberger P (2005). Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. Geophysical research letters. Vol. 32, Issue 23. Retrieved from <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2005GL024342/full>.
6. Mosavi M., Azarshahi S., Emamgholipour I., Abedi A (2014). Least squares techniques for GPS receivers positioning filter using pseudo-range and carrier phase measurements. Iranian Journal of electrical and electronic engineering. Vol. 10. No. 1. (pp. 18-26).
7. Schmid R., Steigenberger P., Gendt G., Ge M., Rothacher M (2007). Generation of a consistent absolute phase-center correction model for GPS receiver and satellite antennas. Journal of Geodesy. Vol. 81. Issue 12. (pp. 781-798).
8. Sayt tsentru SOPAC [Site of centr SOPAC] Retrieved from <http://sopac.ucsd.edu/dataBrowser.shtml> [in USA].

**К.Р. Третьак,  
К. Б. Смолий,  
О.В. Серант**

### **ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ УРАВНИВАНИЯ ГНСС-СЕТЕЙ**

*С целью максимального извлечения систематических погрешностей на этапе обработки ГНСС-сетей, созданных на основе нескольких сессий наблюдений, разработан дифференциальный метод их уравнивания. В дифференциальном методе предлагается частично заменить уравнения поправок измеренных векторов уравнениями поправок разниц этих векторов. Выполнено сравнение результатов уравнивания двух сетей с идеальными условиями видимости и с ограниченным доступом к спутникам. Эффективность дифференцированного метода уравнивания ГНСС-измерений по сравнению с классическим параметрическим методом составляет 10-50%.*

**Ключевые слова:** погрешности ГНСС-измерений, дифференциальный метод уравнивания, параметрический метод уравнивания.

**K. R. Tretyak,  
K. B. Smoliy,  
O.V. Serant**

## **RESEARCH EFFICIENCY ADJUSTMENT FOR GNSS-NETWORKS**

*Today GNSS measurements are widely used for deformation's monitoring of engineering buildings. Namely, the method of GNSS-measurements. Basically, modern methods of GNSS-observations' results' processing allow us to resolve only random errors. Differential method's adjustment for GNSS networks is proposed to maximal reduces the influence of systematic errors on the results of observations, which are based on several observations sessions. In differential method instead of the correction equations for vectors partly making the correction equations for differences simultaneously measured vectors is proposed. Comparison the results of adjustment one network with ideal condition (but vectors obtained from two different program products) and three networks with complex conditions of access to satellite signals. The results of the adjustment by differential and classic parametric methods were compared with reference values of the coordinates of the points defined by the center SOPAC. The effectiveness of differential method adjustment of GNSS-observations compared to the classical parametric method is 10-50%.*

**Keywords:** *GNSS-measurements errors, differential method adjustment, classical parametric method adjustment.*

Надійшла до редакції

25.10.2015

УДК 528.48

**В.М. Гладілін**, канд. техн. наук, професор  
кафедри аерокосмічної геодезії,  
Національний авіаційний університет

**П.О. Чуланов**, ст. викл. кафедри інженерної геодезії,

**Н.С. Шудра**, ст. викл. кафедри інженерної геодезії,  
Київський національний університет будівництва і архітектури

## **ВИЗНАЧЕННЯ МОДЕЛІ ЗМІЩЕННЯ ТОЧОК ТЕХНОЛОГІЧНОГО ОБЛАДНАННЯ ПРИ ДЕФОРМАЦІЙНИХ ПРОЦЕСАХ**

*У статті запропоновано розглянути визначення моделі горизонтальних та вертикальних векторів зміщення точок (деформацій) промислового обладнання як динамічної системи в тривимірному просторі.*

*Моделювання виконано на основі складання векторів за правилом паралелограма та множення векторів.*

*Сучасне визначення і правильне використання даних про деформації дасть можливість збільшити строк планової та безпечної експлуатації промислового обладнання.*

**Ключові слова:** *деформації, часткові (кутові, горизонтальні, вертикальні) деформації, відносні деформації.*

**Вступ.** Промислові споруди та обладнання є динамічною системою, що зазнає деформацій не тільки в процесі монтажу, а й у період експлуатації. Під впливом змінного навантаження та зміщення центру ваги основи виникають нерівномірні горизонтальні і вертикальні зміщення, отже, споруди й обладнання нерівномірно деформуються, що становить для них небезпеку. Дуже часто окремо визначають горизонтальні і вертикальні зміщення точок обладнання, хоча зміщення відбуваються одночасно у тривимірному просторі.

Найбільш критичними деформаціями для прецизійного технологічного обладнання є часткові деформації.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Своєчасне одержання відомостей про деформації прецизійного обладнання та промислових споруд за допомогою геодезичних, геологічних та інших методів та правильне їх використання сприяє підвищенню експлуатаційних властивостей і збільшенню терміну експлуатації обладнання, наприклад, ротаційних цементних печей, машин неперервного лиття заготовок, прокатних станів, конвеєрів шліфування та полірування скла, прецизійних конвеєрних ліній тощо [1; 2; 5; 6; 7; 8].

**Постановка завдання.** Визначити модель горизонтальних і вертикальних зміщень точок (деформацій) технологічного обладнання як динамічної системи в тривимірному просторі. Своєчасне визначення і правильне використання даних про деформації сприяє безперебійній та безпечній експлуатації промислового обладнання.

**Основна частина.** Важливим є визначення моделі горизонтальних і вертикальних зміщень для подальшого прогнозування поведінки основи споруд і промислового обладнання за досить невеликою кількістю вимірів, одержаних в початковий період їх функціонування. Модель деформаційних процесів визначимо на основі векторів зміщень окремих точок обладнання.

У загальному випадку кут  $\psi$  між векторами горизонтальних зміщень  $S(x)$  та  $S(y)$  може набувати значення від 0 до  $2\pi$ , для спрощення викладки важатимемо, що  $0 < \psi \leq \pi/2$ , тоді відповідно до рис. 1 вертикальне зміщення становитиме

$$|S(h)| = |S(x)| |S(y)| \sin \psi, \quad (1)$$

де  $S(h)$  – вектор осідання;  $S(x)$ ,  $S(y)$  – вектори горизонтальних зміщень відповідно за осями  $x$  та  $y$ ;  $\psi$  – кут між векторами  $S(x)$  та  $S(y)$ .

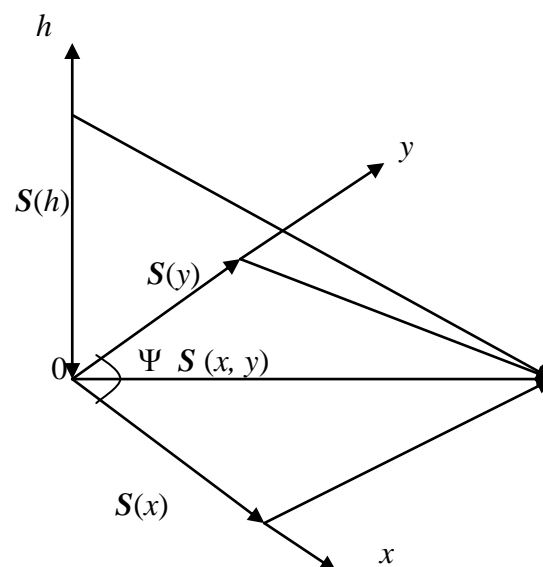


Рис.1. Схема векторів горизонтальних і вертикальних зміщень

Введемо додатковий вектор  $k = \pm 1$  (може відбуватись осідання або здимання) і вираз (1) запишемо:

$$|S(h)| = - |S(x)| |S(y)| \sin \psi k, \tag{2}$$

відповідно до правила паралелограма вектор горизонтальних зміщень буде

$$S(x, y) = S(x) + S(y), \tag{3}$$

вектор зміщень в усіх напрямках (у просторі) набуде вигляду

$$S(x, y, h) = S(x, y) + S(h), \tag{4}$$

звідси, підставивши рівняння (2) і (3) у вираз (4), одержимо

$$S(x, y, h) = S(x) + S(y) - |S(x)| |S(y)| \sin \psi k. \tag{5}$$

Оскільки  $S(h)$  може бути від'ємним і додатним, то формулу (5) визначимо за модулем, тобто

$$|S(x, y, h)| = |S(x) + S(y) - |S(x)| |S(y)| \sin \psi k|. \tag{6}$$

Якщо вважати, що  $\psi \approx \pi/2$ , то  $\sin \psi = 1$  і вираз (6) набуде вигляду

$$|S(x, y, h)| = |S(x) + S(y) - |S(x)| |S(y)||. \tag{7}$$

Повний вектор зміщення можна представити у квадратичній формі

$$|S(x, y, h)|^2 = |S(h)|^2 + |S(x, y)|^2, \text{ або} \\ |S(x, y, h)|^2 = (|S(x)| |S(y)| \sin \psi)^2 + (|S(x)| + |S(y)|)^2, \tag{8}$$

$k^2 = 1$ , якщо прийняти  $\psi \approx \pi/2$ , то  $\sin \psi = 1$  і вираз (8) набуде вигляду

$$|S(x, y, h)|^2 = 2(|S(x)| |S(y)|)^2. \tag{9}$$

Розглянемо цю систему з іншого боку. Введемо систему координат  $OXYH$  таким чином, щоб вектори  $OX, OY, OH$  склали праву трійку (рис.2).

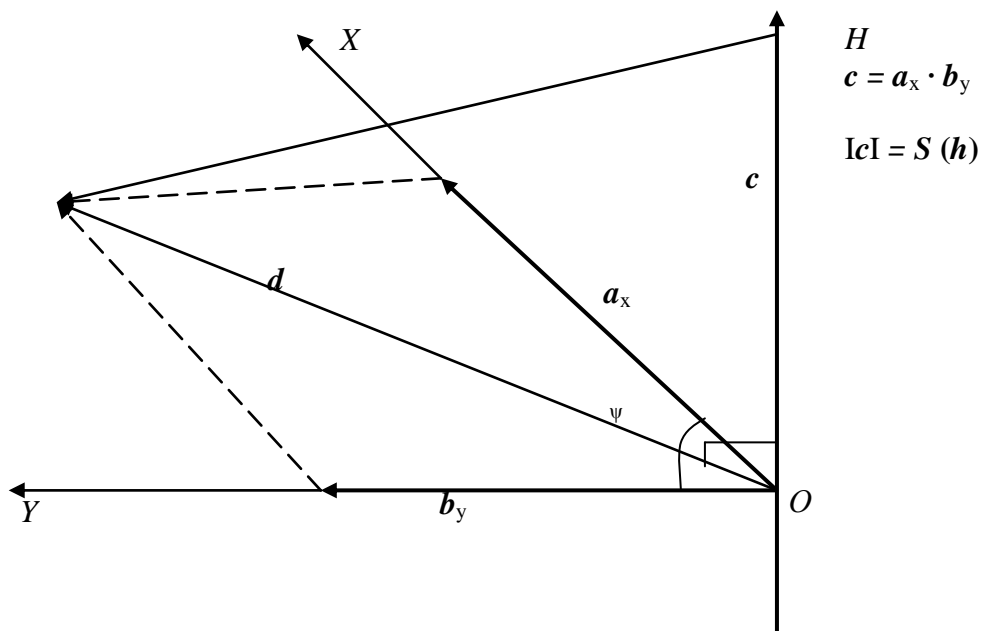


Рис. 2. Схема зміщення точки в системі координат  $OXYH$

Вектори  $a_x$  та  $b_y$  колінеарні відповідно до  $OX$  та  $OY$ , тоді якщо  $\psi \approx \pi/2$ , а  $\sin \psi = 1$ , то вектор  $a_x$  практично перпендикулярний до вектора  $b_y$ , тобто  $(a_x \perp b_y)$ , отже маємо

$S(x, y) = d = a_x + b_y$  – додатак векторів за правилом паралелограма;

$S(h) = c = a_x \cdot b_y$  – векторний добуток.

Запишемо координати векторів:  $\mathbf{a}_x = \{x_a; 0; 0\}$ ,  $\mathbf{b}_y = \{0; y_b; 0\}$ , тоді

$$\mathbf{d} = \{x_a; y_b; 0\}, \mathbf{c} = \{0; 0; x_a \cdot y_b\}.$$

За правилом додавання векторів знайдемо

$$S(x, y, h) = \mathbf{d} - \mathbf{c} = (\mathbf{a}_x + \mathbf{b}_y) - \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{b}_y,$$

за модулем

$$|S(x, y, h)| = |(\mathbf{a}_x + \mathbf{b}_y) - \mathbf{a}_x \cdot \mathbf{b}_y|. \quad (10)$$

Оскільки за початкових умов вектор  $\mathbf{c}$  практично перпендикулярний до вектора  $\mathbf{d}$ , тобто ( $\mathbf{c} \perp \mathbf{d}$ ), то за теоремою Піфагора вираз (10) набуде вигляду

$$|S(x, y, h)|^2 = |\mathbf{a}_x + \mathbf{b}_y|^2 + |\mathbf{a}_x \cdot \mathbf{b}_y|^2, \quad (11)$$

або  $S(x, y, h) = \{x_a; y_b; -x_a \cdot y_b\}$ , тоді

$$|S(x, y, h)|^2 = |x_a^2 + y_b^2 + x_a^2 \cdot y_b^2|. \quad (12)$$

Під дією зовнішніх сил і сил опору деякі точки реального обладнання змінюють своє положення у просторі, що може призвести до змінення розмірів та / або форми обладнання, тобто до його деформацій. У разі виникнення деформацій важливими є відносні зміщення точок обладнання, які спричинюють зміну його розмірів і форми.

Виміряні значення  $S(x)$ ,  $S(y)$ ,  $S(h)$  та горизонтальні координати  $x$  та  $y$  точок на обладнанні, визначені електронним тахеометром, наведено у табл. 1.

Таблиця 1

**Виміряні і обчислені зміщення точок обладнання**

№ точки	$S(h)$ , мм	$S(x)$ , мм	$S(y)$ , мм	$ S(x,y) $ , мм	$ S(x,y,h) $ , мм	$x$ , м	$y$ , м
1	-5,0	-12,0	5,0	13,00	13,93	-0,012	0,005
2	-5,5	-10,0	7,0	12,21	13,39	19,990	0,007
3	-6,0	-4,0	15,0	15,52	16,64	39,996	0,015
4	-7,0	-3,0	10,0	10,44	12,57	-0,003	20,010
5	-5,0	-7,0	9,0	11,40	12,45	19,993	20,009
6	-6,5	5,0	8,0	9,43	11,46	40,005	20,008
7	-3,0	6,0	-1,0	6,08	6,78	0,006	39,999
8	-4,0	-10,0	-3,0	10,44	11,18	19,990	39,997
9	-2,0	-8,0	7,0	10,63	10,82	39,992	40,007
10	-2,5	-5,0	-1,0	5,10	5,68	-0,005	59,999
11	-4,0	-1,0	0,0	1,00	4,12	19,999	60,000
12	-5,0	-5,0	-4,0	6,40	8,12	39,995	59,996
13	-7,0	0,0	5,0	5,00	8,60	0,000	80,005
14	-9,0	2,0	9,0	9,22	12,88	20,002	80,009
15	-11,0	-8,0	12,0	14,42	18,14	39,992	80,012
16	-13,0	-8,0	9,0	12,04	17,72	-0,008	100,009
17	-15,0	-7,0	-1,0	7,07	16,58	19,993	99,999
18	-13,5	-4,0	0,0	4,00	14,08	39,996	100,000
19	-10,0	1,0	4,0	4,12	10,92	0,001	120,004
20	-9,0	2,0	7,0	7,28	11,58	20,002	120,007
21	-7,0	5,0	8,0	9,43	11,75	40,005	120,008

На рис. 3 наведено розміщення точок на обладнанні за координатами  $x$  та  $y$  (за табл. 1) відповідно до зміщень, тобто  $x = x_0 + S(x)$ ;  $y = y_0 + S(y)$ , де  $x_0, y_0$  – проектні координати. За вісь  $y$  взято повздовжнє розміщення обладнання, за вісь  $x$  – поперечне розміщення.

Напрями горизонтальних зміщень на рис. 3 вказані відповідними стрілками.

Перед обчисленням повних зміщень потрібно встановити кореляційну залежність між зміщеннями в усіх напрямках. Коефіцієнти кореляції мають такі значення: між горизонтальними зміщеннями  $x$  та  $y$   $r_{xy} = 0,12$ ; між вертикальними зміщеннями  $h$  і горизонтальними  $r_{hx} = 0,01$ ,  $r_{hy} = -0,27$ . Коефіцієнти кореляції мають невеликі значення, отже, можна дійти висновку, що зміщення в усіх напрямках є незалежними випадковими величинами, тому обчислення зміщень будемо виконувати за формулами (1) – (12).

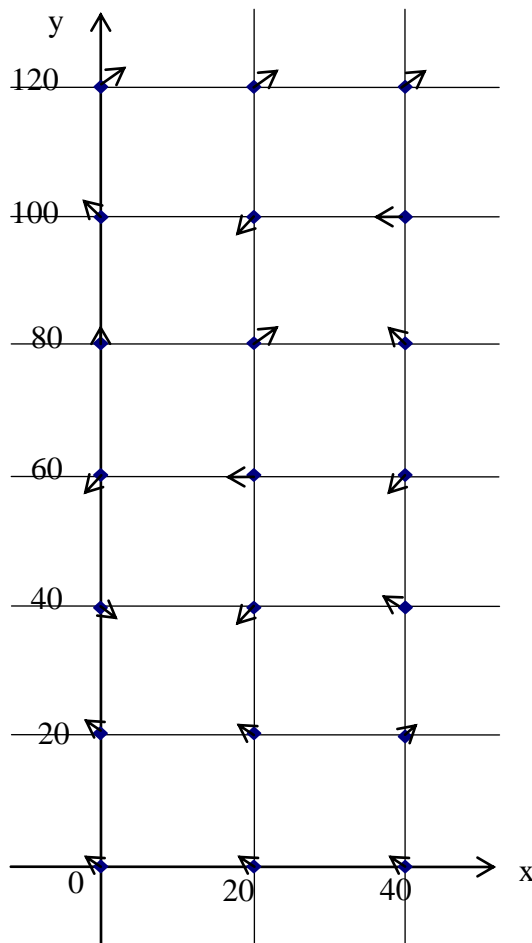


Рис. 3. Схема розміщення точок на обладнанні

Знайдемо часткові деформації:

1) розтягнення (із знаком «+») або стискання (із знаком «-») визначимо за формулою

$$\Delta\rho_i = \rho_i - \rho_{oi}; \tag{13}$$

2) відносна деформація становитиме

$$l = \Delta\rho_i / \rho_i; \tag{14}$$



3) деформація кутів дорівнюватиме

$$\Delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{oi}; \quad (15)$$

відстані між центром ваги обладнання і точками, які вимірюються на обладнанні (рис. 3), обчислюють за координатами (табл1).

$$\rho^2_i = dx^2 + dy^2 + dh^2 \quad (16)$$

Після підстановки виразів для  $dx$ ,  $dy$ ,  $dh$  отримуємо рівняння еліпсоїда відносно лагранжевих координат:

$$\rho^2 = (\delta x_i / \delta x_j * dx_j)^2 = \delta x_m / \delta x_i * \delta x_m / \delta x_j = bx_i x_j dx_i dx_j.$$

Шість коефіцієнтів  $bx_i x_j$  утворюють новий симетричний тензор  $T_b$  з компонентами  $bxx$ ,  $bxy$ ,  $bxh$ ,  $bxy$ ,  $buh$ ,  $bhh$ , аналітичні вирази для яких можуть бути отримані з наведеної формули й аналогічні формулам [3; 4].

Геометрична інтерпретація рівняння полягає в такому. У недеформованому стані є сукупність різних еліпсоїдів; у процесі деформації ці початкові еліпсоїди в різні моменти часу перетворюються на сфери радіусом  $\rho$  з центром в точці 11 (рис. 3) – центр ваги обладнання.

Обидва наведені тензори деформацій Коші  $T_a$  [4] та  $T_b$  характеризують кінцеве (результативне) формозмінення нескінченно малих сфери або еліпсоїда з центром в деякій матеріальній точці (точці 11), при цьому тензор  $T_a$  описує результативне формозмінення в змінних Ейлера, а тензор  $T_b$  – у змінних Лагранжа. Компоненти обох тензорів належать до однієї декартової системи координат, в якій  $X$ ,  $Y$ ,  $H$  – координати матеріальної точки в початковому стані середовища, що деформується,  $x$ ,  $y$ ,  $h$  – координати тієї самої точки в її кінцевому стані.

Для визначення фізичного сенсу компонентів результативного формозмінення припустимо, що деякий лінійний елемент  $M_o N_o$  (рис. 4) [4], початкова довжина якого дорівнює  $\rho_o$ , в результаті деформації став паралельний осі  $x$ , тоді  $dx=dr$ ,  $dy=dh=0$ , таким чином отримаємо

$$a_{xx} = (dr_o / dr)^2.$$

Якщо довжина елемента  $MN$  у процесі деформації не змінюється, то  $a_{yy} = 1$ , якщо елемент розтягнутий, то  $a_{xx} > 1$ , і навпаки, за скорочення елемента  $a_{xx} < 1$ . Аналогічні залежності можна вивести і для компонентів  $a_{yy}$  і  $a_{hh}$ . Таким чином, діагональні компоненти тензора Коші  $a_{xx}$ ,  $a_{yy}$ ,  $a_{hh}$  характеризують деформацію матеріальних волокон, які в результаті стають паралельними осями  $x$ ,  $y$ ,  $h$  відповідно. Очевидно, що ці компоненти завжди додатні.

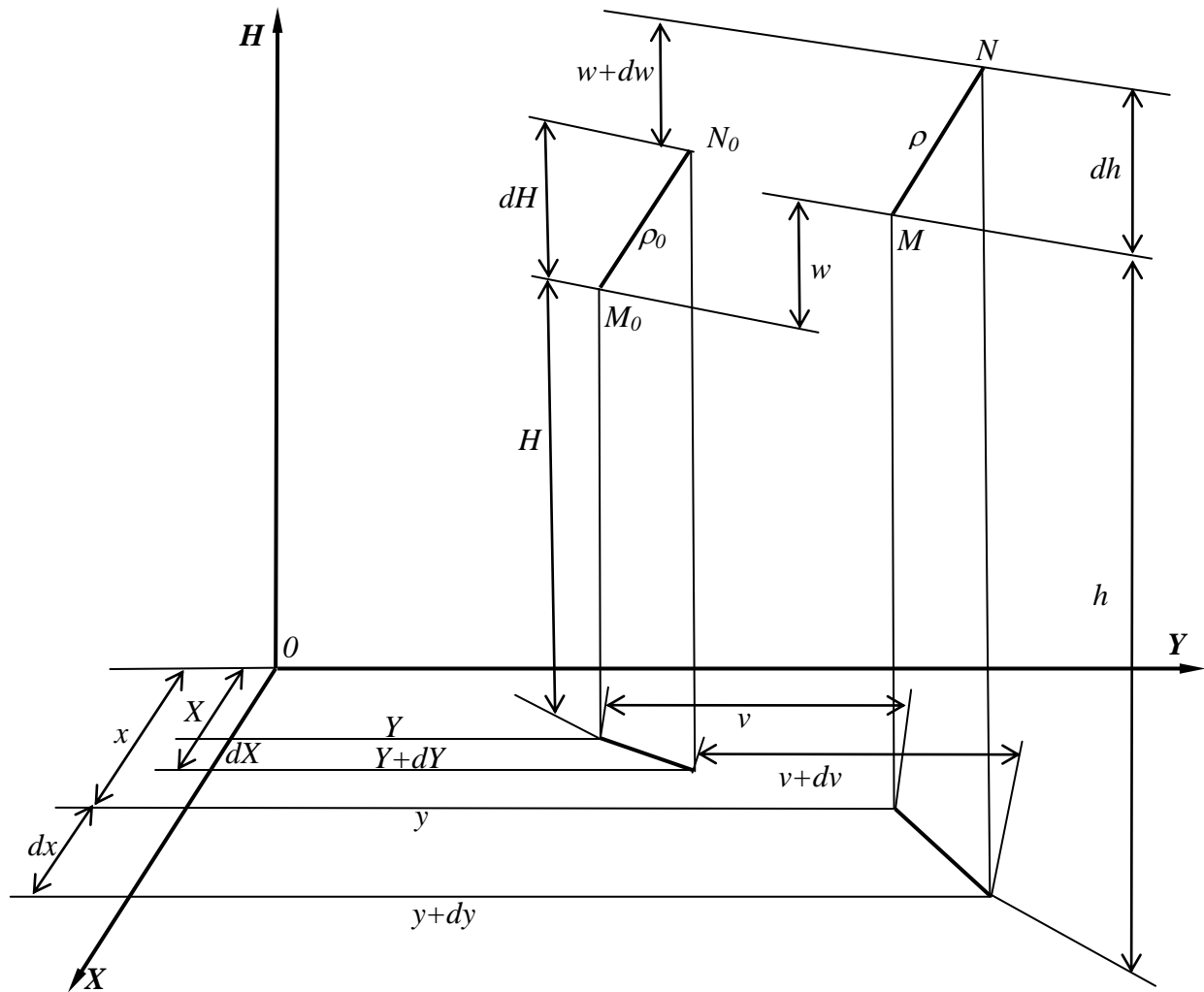


Рис. 4. Деформація відрізка  $MN = \rho$  в системі координат  $OXUH$

Лінійний елемент  $MN$ , напрям якого до деформації позначимо як  $\rho_0$ , має в початковому стані такі напрямні косинуси:

$$\cos(n_x, i) = dx/dr_0, \cos(n_y, j) = dy/dr_0, \cos(n_h, k) = dh/dr_0.$$

Значення деформацій, обчислених за формулами (13; 14; 15; 16), наведено в табл. 2.

Унаслідок деформації відрізок  $MN$  (рис. 4) стає паралельним осі  $x$ , тому  $dr = dx, dy = dh = 0$ , тоді на підставі рівності

$$dx = \partial x_i / \partial x \cdot dr; \quad dy = \partial y / \partial x \cdot dr; \quad dh = \partial h / \partial x \cdot dr.$$

Підставивши ці співвідношення у формули для косинусів та відносно рівняння  $a_{xx} = (dr_0 / dr)^2$ , одержимо:

$$\cos(n_x, i) = 1 / \sqrt{a_{xx}} \cdot \partial X / \partial x; \cos(n_y, j) = 1 / \sqrt{a_{xx}} \cdot \partial Y / \partial x; \cos(n_x, k) = 1 / \sqrt{a_{xx}} \cdot \partial H / \partial x.$$

## Відносна та кутова деформація точок обладнання

№№ точок	$\rho_{0i}$ , м	$\rho_i$ , м	$\varphi_{0i}$ , в градусній мірі	$\varphi_i$ , в градусній мірі	$\Delta\rho_i$ , мм	$l_i$	$\Delta\varphi_i$ , в секун дах
11 – 10	20,0000	20,0040	180 00 00,0	180 00 10,3	+ 4,0	1:5000	+10,3
11 – 13	28,2843	28,2871	135 00 00,0	134 59 29,1	+ 2,8	1:10100	-30,9
11 – 16	44,7214	44,7325	116 33 54,2	116 34 04,5	+11,1	1:4000	+10,3
11 – 19	63,2456	63,2487	108 26 05,8	108 25 55,5	+ 3,1	1:20400	-10,3
11 – 14	20,0000	20,0090	90 00 00,0	89 59 29,1	+ 9,0	1:2220	-30,9
11 – 17	40,0000	39,9990	90 00 00,0	90 0 30,9	- 1,0	1:40000	+30,9
11 - 20	60,0000	60,0070	90 00 00,0	89 59 49,7	+ 7,0	1:8570	-10,3
11 - 21	63,2456	63,2550	71 33 54,2	71 33 43,9	+ 9,4	1:6730	-10,3
11 – 18	44,7214	44,7200	63 26 05,8	63 6 18,2	-1,4	1:31940	+12,4
11 – 15	28,2843	28,2878	45 00 00,0	45 01 38,0	+3,5	1:8080	+98,0
11 – 12	20,0000	19,9960	0 00 00,0	359 59 18,7	-4,0	1:5000	-41,3
11 - 09	28,2843	28,2744	315 00 00,0	315 00 00,0	-9,9	1:2860	0,0
11 – 06	44,7214	44,7169	296 33 54,2	296 34 35,4	-4,5	1:9940	+41,2
11 - 03	63,2456	63,2304	288 26 05,8	288 26 12,0	-15,2	1:4160	+7,0
11 – 08	20,0000	20,0030	270 00 00,0	269 58 27,2	+3,0	1:6670	-92,8
11 - 05	40,0000	39,9910	270 00 00,0	269 59 29,0	-9,0	1:4440	-31,0
11 – 02	60,0000	59,9930	270 00 00,0	269 59 29,0	-7,0	1:8570	-31,0
11 – 01	63,2456	63,2443	251 33 54,2	251 33 15,0	-1,3	1:48650	-39,2
11 – 04	44,7214	44,7133	243 26 05,8	243 25 36,9	-8,1	1:5520	-28,9
11 – 07	28,2843	28,2800	225 00 00,0	225 00 41,3	-4,3	1:6580	-41,3

Скориставшись подібними міркуваннями для двох інших лінійних елементів, які після деформації збігаються з осями  $u$  і  $h$ , можна записати:

$$\cos(n_y, i) = 1/\sqrt{a_{yy}} \cdot \partial X/\partial y; \quad \cos(n_h, i) = 1/\sqrt{a_{hh}} \cdot \partial X/\partial h;$$

$$\cos(n_y, j) = 1/\sqrt{a_{yy}} \cdot \partial Y/\partial y; \quad \cos(n_h, j) = 1/\sqrt{a_{hh}} \cdot \partial Y/\partial h;$$

$$\cos(n_y, k) = 1/\sqrt{a_{yy}} \cdot \partial H/\partial y; \quad \cos(n_h, k) = 1/\sqrt{a_{hh}} \cdot \partial H/\partial h.$$

Кути між лінійними елементами, які після деформування стануть паралельними осям  $x$ ,  $y$ ,  $h$ , у початковий момент часу в загальному випадку відмінні від  $\pi/2$ . Позначимо змінені кути як  $\varphi_{xy}$ ,  $\varphi_{yh}$ ,  $\varphi_{xh}$  (здвигові деформації) і, підставивши отримані значення косинусів у відому формулу аналітичної геометрії

$$\cos(n_x, n_y) = \cos(n_x, i)\cos(n_y, i) + \cos(n_x, j)\cos(n_y, j) + \cos(n_x, k)\cos(n_y, k), \quad (17)$$

одержимо:

$$\cos(n_x, n_y) = a_{xy}/\sqrt{a_{xx} a_{yy}} = \cos(\pi/2 - \varphi_{xy}) = \sin \varphi_{xy};$$

$$\cos(n_y, n_h) = a_{yh}/\sqrt{a_{yy} a_{hh}} = \cos(\pi/2 - \varphi_{yh}) = \sin \varphi_{yh};$$

$$\cos(n_x, n_h) = a_{xh}/\sqrt{a_{xx} a_{hh}} = \cos(\pi/2 - \varphi_{xh}) = \sin \varphi_{xh}.$$

Відповідно компоненти  $a_{xy}$ ,  $a_{yh}$ ,  $a_{xh}$  тензора Коші  $T_a$  характеризують здвигові деформації: якщо вони дорівнюють нулю, то прямі кути до початку деформування залишаться прямими і після деформації, аналогічно одержимо і для тензора

результативного формозмінення  $T_b$ . Деформований стан обладнання описують за допомогою симетричного тензора швидкості деформації  $T$  [3].

Розглянемо горизонтальні зміщення. Поле розсіяння горизонтальних зміщень  $S(x), S(y)$  зображено на рис. 5. Біля точок наведено величини зміщень із таблиці за їх зростанням.

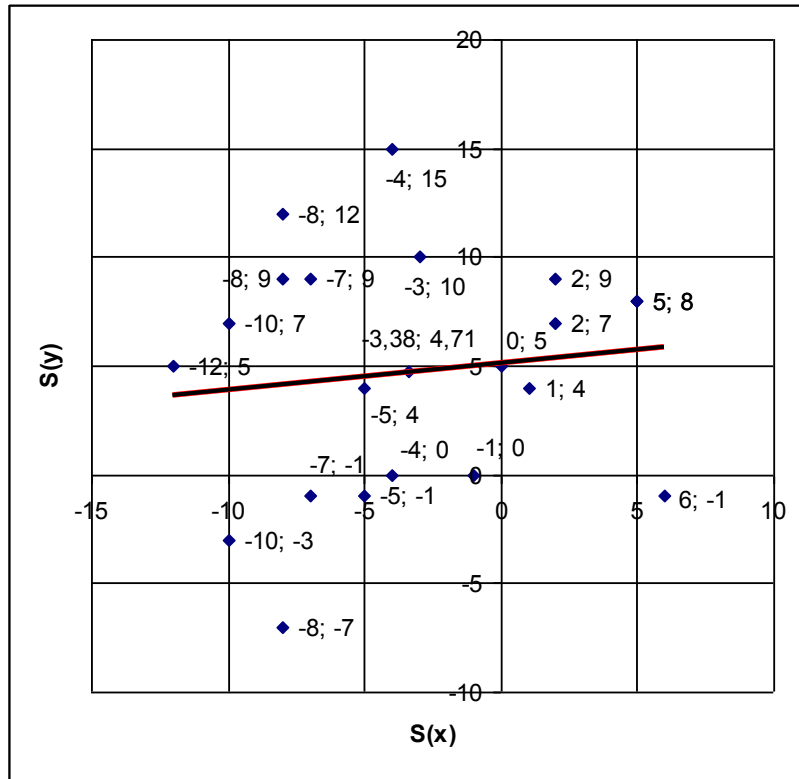


Рис. 5. Поле розсіяння горизонтальних зміщень

Лінійне рівняння регресії  $S(y) / S(x)$ , наведене на рис. 5, має такий вигляд:

$$S(y) = 0,1234 S(x) + 5,1316, \tag{13}$$

визначене із середньою квадратичною помилкою  $m_{S(y)} = \pm 0,12\text{мм}$  обернене рівняння регресії  $S(x) / S(y)$  відповідно має вигляд

$$S(x) = [S(y) - 5,1316] / 0,1234 = 8,1037 S(y) - 41,5851. \tag{14}$$

Лінію регресії (13) наведено на рис. 5 чорним кольором, а лінію регресії (14) – сірим; координати їх перетину, що мають значення  $x = - 3,38 \text{ мм}$ ,  $y = 4,71\text{мм}$ , вказують на загальний горизонтальний вектор зміщення  $S(x, y)$  (горизонтальну деформацію) цього обладнання.

**Висновки.** Побудовано модель зміщення точок промислового обладнання у тривимірному просторі як динамічної системи. Зміщення точок обладнання розглянуто на основі додатку і добутку векторів горизонтальних і вертикальних зміщень як результату деформаційних процесів.

Виділення часткових деформацій із загальної повної деформації має важливе значення для безперебійної та безпечної експлуатації обладнання. Наявність великої загальної деформації загалом не впливає на експлуатаційні характеристики обладнання, але для таких видів споруд, як гідротехнічні, для мостів і тунелів тощо, вона має велике значення.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Гладилін В. Н. Расчет точности геодезических построений на монтажном горизонте методами марковских случайных процессов / В.М. Гладилін // Інженерна геодезія. – 1985. – №28. – С. 25 – 29.
2. Гладилін В. Н. Точность построения пространственной геодезической сети / В.М. Гладилін // Інженерна геодезія. – 1987. – № 30. – С. 18 - 19.
3. Гладілін В. М. Швидкість та прискорення деформаційного процесу / В.М. Гладілін, О. Л. Ремішевський // Інженерна геодезія. – 2001. – №.45. – С. 56-59.
4. Гладілін В. М. Визначення деформацій технологічного обладнання при періодичному навантаженні у часі / В.М. Гладілін, О. В. Біляга // Інженерна геодезія. – 2002. – №.46. – С.68-74.
5. Гладілін В. М. Дослідження моделі деформаційного процесу технологічного обладнання / В.М. Гладілін, П.О. Чуланов // Інженерна геодезія. – 2002. – №.48. – С. 70-77.
6. Гладілін В. М. Побудова системи автоматизованого визначення деформацій технологічного обладнання. / В.М. Гладілін // Інженерна геодезія. – 2004. – №50. – С. 34 – 37.
7. Гладілін В.М. Застосування теорії графів для дослідження деформацій промислового обладнання / В.М. Гладілін // Інженерна геодезія. – 2005. – № 51. – С. 77-82.
8. Экспериментальные методы исследования деформаций и напряжений / Б.С. Касаткин, А. Б.Кудрин, Л. М.Лобанов и др.– К.: Наукова думка, 1981. – 582 с.

**REFERENCES**

1. Gladilin V.N. (1985). Raschet tochnosty heodezycheskykh postroenyi na montazhnom horyzonte metodamy markovskyykh sluchainyykh protsessov [Calculation of exactness of geodesic constructions on assembling horizon by the methods of markovskikh casual processes]. *Engineering geodesy*, 28, 25-29 [in Ukrainian].
2. Gladilin V.N. (1987). Tochnost postroenyia prostranstvennoi heodezycheskoi sety [Exactness of construction of spatial geodesic network]. *Engineering geodesy*, 30, 18-19 [in Ukrainian].
3. Gladilin V.N. & Remishevskiy O.L. (2001). Shvydkist ta pryskorennia deformatsiinoho protsesu [Speed and acceleration of deformation]. *Engineering geodesy*, 45, 56-59 [in Ukrainian].
4. Gladilin V.N. & Biliaga O.V. (2002). Vyznachennia deformatsii tekhnolohichnoho obladdannia pry periodychnomu navantazhenni u chasi. [Determination of deformations of technological equipment at the periodic loading in time]. *Engineering geodesy*, 46, 68-74 [in Ukrainian].
5. Gladilin V.N. & Chulanov P.A. (2002). Doslidzhennia modeli deformatsiinoho protsesu tekhnolohichnoho obladdannia. [Research of model of deformation process of technological equipment]. *Engineering geodesy*, 48, 70-77 [in Ukrainian].
6. Gladilin V.N. (2004). Pobudova systemy avtomatyzoivanoho vyznachennia deformatsii tekhnolohichnoho obladdannia. [Construction of the automated determination of deformations of tecnological process]. *Engineering geodesy*, 50, 34-37 [in Ukrainian].

7. Gladilin V.N. (2005). Zastosuvannia teorii hrafiv dlia doslidzhennia deformatsii promyslovoho obladnannia. [Application of theory of columns for research of determinations of technological equipment]. *Engineering geodesy*, 50, 34-37 [in Ukrainian].

8. Kasatkin B.S., Kudrin A.B., Lobanov L.M. (1981). *Eksperimentalnyie metody issledovaniya deformatsiy i napryazheniy* [Experimental methods of research of deformations and tensions]. Kiev: "Naukova dumka" [in Ukrainian].

**В.Н. Гладилин,  
П.О. Чуланов,  
Н.С. Шудра**

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ СМЕЩЕНИЯ ТОЧЕК ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССАХ**

*В статье рассмотрено определение модели горизонтальных и вертикальных векторов смещений точек (деформаций) промышленного оборудования как динамической системы в трехмерном пространстве.*

*Моделирование выполнено на основе сложения векторов по правилу параллелограмма и умножения векторов.*

*Под действием внешних сил и упругих сил сопротивления отдельные точки (узлы) оборудования изменяют свое положение в пространстве, что приводит к изменению размеров и формы оборудования, то есть к его деформациям, когда важную роль играют относительные деформации и кручение между смежными точками (узлами). Между общим смещением точек (узлов) оборудования и горизонтальными и вертикальными смещениями установлена небольшая по модулю корреляционная зависимость, которая указывает на то, что смещения являются фактически независимыми между собой.*

*Своевременное определение и правильное использование данных о деформациях даст возможность увеличить срок плановой и безопасной эксплуатации промышленного оборудования.*

**Ключевые слова:** деформации, частичные (угловые, горизонтальные, вертикальные) деформации, относительные деформации.

**V.N. Gladilin,  
P.A. Chulanov,  
N.S. Shudra**

### **DETERMINATION OF DISPLACEMENT OF POINTS IS THE RESULT OF THE DEFORMATION OF PROCESS EQUIPMENT**

*Determination of horizontal and vertical displacement vectors points of industrial equipment as a dynamic system in three – dimensional space is considered in this article.*

*The simulation made on the basis of vector addition by the parallelogram rule and multiplication of vectors.*

*Under the action of external forces and the elastic forces of the resistance of the individual points (nodes) of equipment to its deformation, where an important role is played by relative deformation and torsion between adjacent points (nodes). Between the*

*total displacement of points (nodes) of the equipment and the horizontal and vertical displacement have correlation module, which indicates that these displacement are actually independent of each other.*

*Early identification and proper use of data on deformations would increase the period of planning and safe operation of industrial equipment.*

**Keywords:** *deformations, partial (angular, horizontal, vertical) deformations, relative deformations.*

Надійшла до редакції

08.12.2015

УДК 528.48

**Р.В. Шульц**, *д-р техн. наук, професор,*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

**М.В. Білоус**, *канд. техн. наук, доцент,*

*ПубАТ Київметробуд, ДП «Укргеодезмарк», директор*

**В.Я. Ковтун**, *головний інженер*

*ПубАТ Київметробуд, ДП «Укргеодезмарк»,*

**Н.В. Куліченко**, *асп.,*

**О. М. Гончерюк**, *асп.,*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

## **ВИЗНАЧЕННЯ КРЕНІВ ІСТОРИЧНИХ СПОРУД ЗА МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ**

*У роботі запропоновано методику визначення кренів історичних споруд за матеріалами наземного лазерного сканування. Розглянуто методику визначення переміщення споруд, що мають значну кількість площинних елементів. Наведено математичну модель апроксимації результатів сканування рівнянням площини за методом найменших квадратів. Отримані у двох циклах за апроксимацією рівняння площини порівняно через величину зміни нормальних векторів площини. Обчислення лінії нульового переміщення виконано за допомогою рівняння площини в неявній формі. Для отримання неявного рівняння площини використано алгоритм, що ґрунтується на обчисленні власних значень та нормованих власних векторів. Використовуючи лінії нульового переміщення, запропоновано алгоритм для визначення лінійного переміщення площини історичної споруди. Розроблену методику апробовано за матеріалами сканування історичної споруди, в зоні будівельних робіт у м. Києві.*

**Ключові слова:** *наземне лазерне сканування, крен, рівняння прямої, рівняння площини, вектор нормалі, проекції вектору нормалі.*

**Вступ.** *Спостереження за кренами інженерних споруд традиційно належить до класичних завдань інженерної геодезії. Особливо актуальними є завдання*

спостереження за об'єктами в зоні інтенсивного ведення будівельних робіт. Нині відомо чимало методів та способів визначення кренів споруд. Традиційні методи спостережень до теперішнього часу не втратили своєї актуальності. Дотепер широко застосовують метод проектування, методи кутів і напрямків, різні варіанти засічок. Останнім часом набувають популярності методи, пов'язані із використанням сучасного геодезичного обладнання. Під час спостережень за кренами висотних споруд значні переваги мають ГНСС-технології у комбінації із високоточними цифровими датчиками нахилу. Для спостереження за історичними спорудами найбільш доцільно використовувати електронні тахеометри, зокрема роботизовані, а також методи наземної фотограмметрії та наземного лазерного сканування [6; 7]. Останні два, окрім безпосереднього визначення крену, дають змогу отримати цілісну картину деформування будівлі завдяки використанню тривимірної моделі. Найбільш перспективним й одночасно найменш дослідженим є метод наземного лазерного сканування. Через великий надлишок даних, особливо у методі наземного лазерного сканування, актуальним завданням є розроблення методики отримання потрібних характеристик деформаційного процесу за матеріалами сканування. До головних деформаційних характеристик, які потрібно визначити, належать безпосередньо крен будівлі та загальне переміщення споруди. Розроблення методики для визначення цих характеристик за матеріалами наземного лазерного сканування і висвітлено в представленій роботі.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Аналізуючи можливості методу наземного лазерного сканування, не будемо зупинятись на відомих геодезичних методах спостереження за кренами. Такий аналіз наведено у більшості класичних робіт з інженерної геодезії [8]. Загалом можливості наземного лазерного сканування для вирішення завдань інженерної геодезії детально подано в роботах [4; 9]. В цих роботах розглянуто технологічні схеми та алгоритми застосування сканування для розв'язання завдань з топографічного знімання, моніторингу, виконавчого знімання та ін. Спостереження за кренами є частиною загального завдання геодезичного моніторингу. Розглянемо можливості та особливості застосування лазерного сканування для вирішення завдань саме з геодезичного моніторингу. Особливості геодезичного моніторингу тісно пов'язані з категорією об'єктів, для яких його виконують. Зокрема, в роботах [1; 11; 15; 17] наведено приклади виконання моніторингу висотних споруд. Розглянуто переваги та особливості моніторингу висотних будівель, градирень, телевізійних веж. У такому випадку наземне лазерне сканування є допоміжним засобом у застосуванні геодезичних технологій, у яких використовують ГНСС та електронні тахеометри. Основні деформаційні характеристики визначають за результатами геодезичних спостережень, а дані лазерного сканування використовують для підтвердження отриманих характеристик або для виявлення локальних переміщень поверхонь об'єктів. Використання наземного лазерного сканування як самостійного засобу для визначення деформаційних характеристик потребує зовсім інших підходів. Для прикладу у праці [10] розглянуто методику застосування лазерного сканування для моніторингу житлових споруд. У цій ситуації результати, отримані із сканування, є фактично



безконтрольними, отже, виконання робіт слід планувати і виконувати більш ретельно. Проте головна проблема полягає у виконанні моделювання споруд за результатами сканування, оскільки деформаційні характеристики визначають безпосередньо за геометричними змінами моделей споруд між циклами спостережень. Нагадаємо, що поверхні будь-яких штучних споруд обов'язково утворені комбінацією геометричних примітивів та їх елементів. До таких примітивів належать площина, конус, циліндр, сфера і тор. У більшості робіт [3;13;16] дослідники, на жаль, обмежуються простим порівнянням двох хмар сканування з обчисленням різниць координат між двома поверхнями. Не є винятком і виконання моніторингу історичних споруд за даними наземного лазерного сканування [18], хоча зрозуміло, що отримані безпосередньо різниці координат дають лише загальне уявлення про перебіг деформаційного процесу. З цієї позиції найбільш адекватним є підхід, розглянутий у праці [14], де наземне лазерне сканування використано для моніторингу тунелів метрополітену. Для отримання деформаційних характеристик за результатами сканування у кожному циклі виконують моделювання хмари сканування поверхнею циліндра із визначенням його геометричних параметрів. У подальшому завдяки порівнянню математичних моделей можна визначити не тільки переміщення окремих точок споруди, а й нахил, поперечне зміщення, крутіння тощо. Саме такий підхід, що базується на використанні рівняння площини, буде розглянутий далі.

**Мета роботи.** Метою публікації є висвітлення запропонованої авторами методики визначення кренів історичних споруд за результатами наземного лазерного сканування. Методику оснований на використанні площинних елементів із подальшим обчисленням взаємного переміщення цих елементів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо методику визначення деформаційних характеристик історичних споруд за матеріалами наземного лазерного сканування. Перш за все вважатимемо, що виконуємо дослідження споруд, які мають форму поверхні, утворену здебільшого площинними елементами. До початку моделювання площинних елементів виконують фільтрацію хмари точок сканування та видаляють грубі помилки. Після попереднього оброблення на хмарі точок виконують сегментацію з метою виділення всіх площинних елементів. Методику й алгоритми фільтрації і сегментації докладно викладені у роботах [2; 9]. Остаточно отримують хмару точок, на якій виділено множини точок, що належать різним площинам. На цьому підготовчий етап аналізу переміщень завершується.

Наступним кроком є отримання рівнянь площини. З метою визначення рівняння апроксимаційної площини в нормальній формі, скористаємося алгоритмом, запропонованим в літературі [12]. Від рівняння площини в неявній формі, що задається як

$$AX + BY + CZ + D = 0, \quad (1)$$

перейдемо до рівняння площини у вигляді (2):

$$\left(\frac{A}{D}\right)X + \left(\frac{B}{D}\right)Y + \left(\frac{C}{D}\right)Z = -1. \quad (2)$$

Оскільки рівняння має лінійну форму, то достатньо просто перейти до рівнянь поправок:

$$aX_i + bY_i + cZ_i = -1 + v_i. \quad (3)$$

У рівнянні поправок (3) поправки  $v_i$  відповідають відстані між точкою та площиною. Подальші обчислення виконують за класичною схемою методу найменших квадратів. Система рівнянь поправок у матричному вигляді записують таким чином:

$$\mathbf{AX} = \mathbf{I} - \mathbf{v}, \quad (4)$$

звідки оцінку параметрів площини знаходять, як

$$\mathbf{X} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{I}.$$

Вектор поправок визначають з системи рівнянь (4).

$$\mathbf{v} = \mathbf{I} - \mathbf{AX}.$$

У системі рівнянь (4) використано такі позначення:  $\mathbf{X} = \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}$  - вектор

параметрів площини;  $\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{bmatrix}$  - матриця коефіцієнтів рівнянь поправок;

$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ \dots \\ -1 \end{bmatrix}$  - вектор-стовпчик вільних членів.

Вважатимемо, що з двох циклів спостережень з однієї і тієї самої станції сканування ми отримали дві множини точок, які апроксимовано рівнянням площини. Тоді матимемо відповідно дві матриці коефіцієнтів рівнянь поправок  $\mathbf{A}_1$  і  $\mathbf{A}_2$ , два вектори оцінок параметрів  $\mathbf{X}_1$  і  $\mathbf{X}_2$  та два вектори поправок  $\mathbf{v}_1$  і  $\mathbf{v}_2$ . Для отриманих рівнянь площини у двох циклах виконаємо оцінку точності. Розрахуємо середні квадратичні похибки одиниці ваги:

$$\mu_1^2 = \frac{\mathbf{v}_1^T \mathbf{v}_1}{n-k}; \quad \mu_2^2 = \frac{\mathbf{v}_2^T \mathbf{v}_2}{n-k}, \quad (5)$$

і кореляційні матриці оцінок параметрів:

$$\mathbf{K}_1 = \mu_1^2 (\mathbf{A}_1^T \mathbf{A}_1)^{-1}; \quad \mathbf{K}_2 = \mu_2^2 (\mathbf{A}_2^T \mathbf{A}_2)^{-1}. \quad (6)$$

Аналіз переміщень між циклами пропонуємо виконувати за двома характеристиками:

- зміна кутового орієнтування площини між циклами (крен та кручення споруди);
- лінійне зміщення площини у просторі (загальне переміщення споруди).

Отримаємо алгоритм для визначення зміни кутового орієнтування площини. Для цього використаємо вектори нормалі до площини у різних циклах. Від

визначених параметрів площини перейдемо до одиничних векторів нормалей площини у кожному циклі за виразами:

$$\mathbf{n}_1 = \frac{\mathbf{X}_1}{\|\mathbf{X}_1\|}; \quad \mathbf{n}_2 = \frac{\mathbf{X}_2}{\|\mathbf{X}_2\|}, \quad (7)$$

де використано норми векторів нормалей

$$\|\mathbf{X}_1\| = \sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}, \quad \|\mathbf{X}_2\| = \sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}. \quad \text{Елементи векторів у виразі (7)}$$

можна представити так:

$$n_1^x = \frac{a_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}; \quad n_1^y = \frac{b_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}}; \quad n_1^z = \frac{c_1}{\sqrt{a_1^2 + b_1^2 + c_1^2}};$$

$$n_2^x = \frac{a_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}; \quad n_2^y = \frac{b_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}; \quad n_2^z = \frac{c_2}{\sqrt{a_2^2 + b_2^2 + c_2^2}}.$$

Для визначення кутового розвороту площини між двома циклами утворимо різницю двох одиничних векторів:

$$\mathbf{d} = \mathbf{n}_2 - \mathbf{n}_1. \quad (8)$$

Норма цієї різниці визначає кут між одиничними векторами нормалей

$$\|\mathbf{d}\| = \sqrt{d_x^2 + d_y^2 + d_z^2}.$$

Отримані величини мають чітку геометричну інтерпретацію, яку представлено на рис. 1.

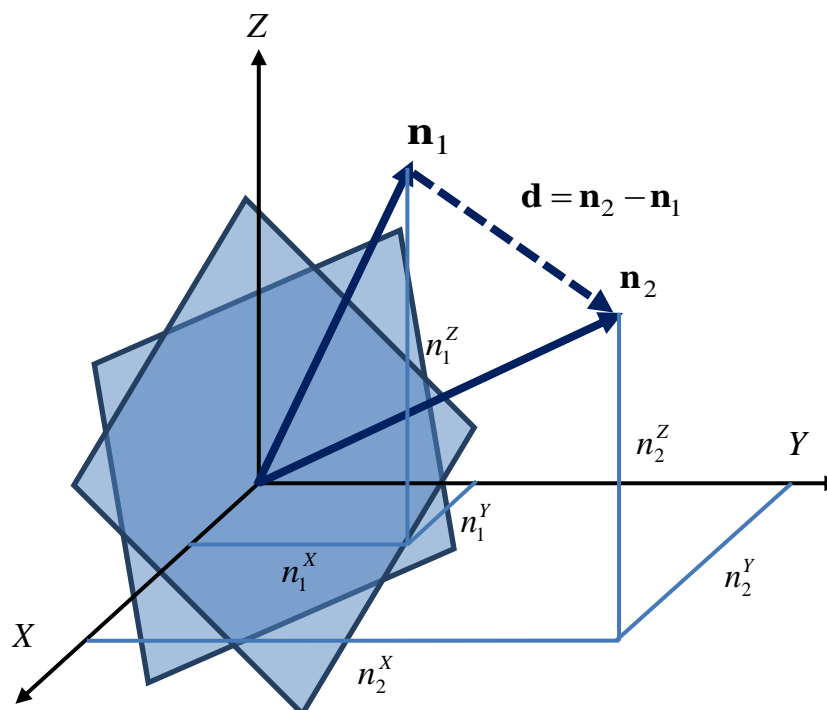


Рис. 1. Взаємне розміщення двох одиничних векторів нормалей площини

Переміщення в інших напрямках можна обчислити через напрямні косинуси вектора відхилень нормалі до площини:

$$\gamma_X = \rho d_X, \gamma_Y = \rho d_Y, \gamma_Z = \rho d_Z.$$

Для обчислення переміщень в лінійній мірі для крайніх точок споруди можна використати максимальні різниці координат  $\Delta X_{\max}, \Delta Y_{\max}, \Delta Z_{\max}$ :

$$\Delta_X = \Delta X_{\max} \rho d_X, \Delta_Y = \Delta Y_{\max} \rho d_Y, \Delta_Z = \Delta Z_{\max} \rho d_Z.$$

Для оцінювання точності різниці одиничних векторів використаємо вираз, запропонований у літературі [12]:

$$\mathbf{K}_d = \frac{1}{\|\mathbf{X}_1\|^2} \mathbf{K}_1 + \frac{1}{\|\mathbf{X}_2\|^2} \mathbf{K}_2. \quad (9)$$

Позначення у рівнянні (8) зрозумілі із виразів (5) і (6). Для визначення точності, з якою оцінено різницю векторів, застосуємо правило перетворення кореляційних матриць. Різниця векторів є функцією  $\|\mathbf{d}\|$ , тому треба знайти матрицю частинних похідних:

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \|\mathbf{d}\|}{\partial d_X} & \frac{\partial \|\mathbf{d}\|}{\partial d_Y} & \frac{\partial \|\mathbf{d}\|}{\partial d_Z} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{d_X}{\sqrt{d_X^2 + d_Y^2 + d_Z^2}} & \frac{d_Y}{\sqrt{d_X^2 + d_Y^2 + d_Z^2}} & \frac{d_Z}{\sqrt{d_X^2 + d_Y^2 + d_Z^2}} \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Середню квадратичну похибку різниці двох векторів знаходимо з виразу

$$m_{\|\mathbf{d}\|}^2 = \mathbf{C} \mathbf{K}_d \mathbf{C}^T. \quad (11)$$

За загальновідомим в інженерній геодезії підходом величину різниці між векторами  $\|\mathbf{d}\|$  вважають значущою, якщо вона перевищує  $t \cdot m_{\|\mathbf{d}\|}$ , де параметр  $t$  вважають рівним 2-3 залежно від прийнятої довірчої ймовірності.

За викладеною методикою оцінюють параметри кутового орієнтування площини. Недолік полягає в тому, що за загального лінійного переміщення споруди параметри площини у рівнянні (2) не змінюються. Загальне переміщення споруди можна визначити за зміною коефіцієнта  $D$  у рівнянні (1). Для отримання рівняння площини у формі (1) розглянемо методику, запропоновану в літературі [5].

Як і раніше, скористаємося матрицею координат точок:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} X_1 & Y_1 & Z_1 \\ X_2 & Y_2 & Z_2 \\ \dots & \dots & \dots \\ X_n & Y_n & Z_n \end{bmatrix}.$$

Знайдемо матрицю  $\mathbf{C}$ , що складається із середніх значень координат:

$$\mathbf{C} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i (Y_i, Z_i). \quad (12)$$

Далі знаходимо матрицю  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{M} = n \mathbf{C}^T \mathbf{C} - \mathbf{A}^T \mathbf{A}. \quad (13)$$

Для матриці  $\mathbf{M}$  знаходимо власні значення  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$  та відповідні їм нормовані власні вектори  $\mathbf{N}_{11}, \mathbf{N}_{12}, \mathbf{N}_{13}$ . Вибираємо максимальне власне значення та нормований власний вектор, відповідний цьому значенню. Відповідно матимемо  $\mathbf{N}_{li}^{\max} = (A \ B \ C)$ , за якими обчислюємо коефіцієнт  $D$ :

$$D = -\mathbf{N}_{li}^{\max} \mathbf{C}^T. \quad (14)$$

За виразами (12) – (14) отримуємо значення коефіцієнтів для двох циклів  $D_1$  і  $D_2$ . Значення цих коефіцієнтів дають змогу обчислити відстані по нормалі до площини відносно будь-якої точки. У найпростішому випадку, коли сканування у двох циклах виконується з однієї і тієї самої станції з координатами  $X_S, Y_S, Z_S$ , можна обчислити відстані  $\Delta_1, \Delta_2$  від станції сканування до площини споруди за виразами:

$$\Delta_1 = \frac{A_1 X_S + B_1 Y_S + C_1 Z_S + D_1}{\sqrt{A_1^2 + B_1^2 + C_1^2}}, \quad \Delta_2 = \frac{A_2 X_S + B_2 Y_S + C_2 Z_S + D_2}{\sqrt{A_2^2 + B_2^2 + C_2^2}}. \quad (15)$$

Утворимо різницю:

$$\delta = \Delta_2 - \Delta_1, \quad (16)$$

яка характеризує загальне переміщення споруди у напрямку, перпендикулярному до площини.

Відмітимо особливість цієї методики визначення кренів і переміщень, яка пов'язана із особливістю вимірювання системами наземного лазерного сканування. Оскільки вимірювання виконують не до конкретних марок, а до поверхні об'єкта, то загальне переміщення можна визначити у напрямку, перпендикулярному до площини. Найчастіше саме ця величина цікавить замовника. Якщо потрібно визначити складові загального переміщення за координатними осями, використовують величину  $\delta$ , яку через напрямні косинуси площини проєктують на координатні осі.

Для більш докладного аналізу закону переміщення треба розрахувати лінію нульового переміщення. Це просторова лінія, яка проходить через досліджувану поверхню і вздовж якої переміщення дорівнюють нулю (рис. 2). Відносно цієї лінії переміщення мають різне спрямування. Пряма, що не проходить через досліджувану поверхню, свідчить про загальне переміщення споруди.

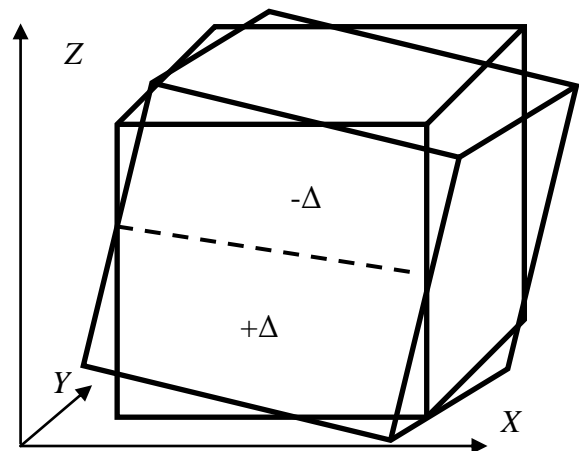


Рис. 2. Лінія нульового переміщення

Розглянемо методику визначення лінії нульового переміщення. Знайшовши коефіцієнти площини у двох циклах у формі (1), визначимо лінію перетину між площинами, яка визначає лінію нульового переміщення. Для цього слід знайти рівняння прямої як результат перетину двох площин. У векторній формі рівняння просторової прямої має вигляд  $\mathbf{P}(t) = \mathbf{P}_0 + \mathbf{V}t$ . У параметричній формі рівняння записують так [5]:

$$X(t) = X_0 + lt, \quad Y(t) = Y_0 + mt, \quad Z(t) = Z_0 + nt. \quad (17)$$

Якщо пряма визначається як результат перетину двох площин, заданих  $\mathbf{F}_1 = (\mathbf{N}_1 \ D_1)$  та  $\mathbf{F}_2 = (\mathbf{N}_2 \ D_2)$ , то пряма, на якій вони перетинаються, має невідомі вектори  $\mathbf{P}_0, \mathbf{V}$ .

Скористаємось алгоритмом, поширеним в обчислювальній геометрії [5]. Напишемо систему рівнянь двох площин:

$$(\mathbf{p} \ 1) \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_2^T \\ D_1 & D_2 \end{pmatrix} = (0 \ 0) \Rightarrow \mathbf{p} \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_2^T \\ D_1 & D_2 \end{pmatrix} = (-D_1 \ -D_2).$$

Отримане векторне рівняння є еквівалентним невизначеній системі двох рівнянь з трьома невідомими. Рішення системи знаходять, застосовуючи метод множників Лагранжа. Функція Лагранжа має вигляд:

$$L(\mathbf{p}, \mathbf{k}) = \frac{1}{2}(\mathbf{p} \cdot \mathbf{p}^T) + \mathbf{k} \cdot \varphi(\mathbf{p}),$$

де  $\mathbf{k}$  – вектор множників Лагранжа;  $\varphi(\mathbf{p}) = \mathbf{p} \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_2^T \\ D_1 & D_2 \end{pmatrix} + (-D_1 \ -D_2)$  – векторна функція зв'язку координат точки  $\mathbf{p}$ .

Вектор множників Лагранжа отримують як

$$\mathbf{k} = (D_1 \ D_2) \left[ \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_2^T \end{pmatrix} \right]^{-1}. \quad (18)$$

Координати точки  $p$  знаходять за виразом

$$\mathbf{p} = -(D_1 \ D_2) \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{N}_1^T & \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{N}_2^T \\ \mathbf{N}_1 \cdot \mathbf{N}_2^T & \mathbf{N}_2 \cdot \mathbf{N}_2^T \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} \mathbf{N}_1 \\ \mathbf{N}_2 \end{pmatrix}. \quad (19)$$

Якщо рівняння двох площин задані у вигляді рівностей

$$A_1X + B_1Y + C_1Z + D_1 = 0; \quad A_2X + B_2Y + C_2Z + D_2 = 0,$$

то напрямні косинуси прямої, на якій перетинаються площини, визначають за виразами (20).

$$l = B_1C_2 - B_2C_1, \quad m = C_1A_2 - C_2A_1, \quad n = A_1B_2 - A_2B_1. \quad (20)$$

Ця лінія визначає пряму нульового переміщення.

Розглянута вище комплексна методика аналізу переміщень за матеріалами наземного лазерного сканування була апробована під час спостережень за кренами однієї з історичних будівель в Києві (рис. 3). Причиною виникнення кренів споруди

є виконання будівельних робіт в безпосередній близькості до будівлі, зокрема котлована глибиною вісім метрів. Спостереження виконували за двома незалежними методами. Як основне джерело інформації використано матеріали геодезичних спостережень. На стіні будівлі закріплено шість марок, для яких визначили просторові координати в кожному циклі. В цокольній частині будівлі були встановлені деформаційні марки, для яких у кожному циклі виконували геометричне нівелювання за програмою III класу. Для перевірки результатів геодезичних спостережень виконано два цикли спостережень за методом наземного лазерного сканування.

У кожному циклі лазерного сканування як опору використано геодезичні пункти, розташовані поза зоною осідання споруди.



Рис. 3. Досліджувана будівля

Марки сканера для прив'язки сканів в геодезичну систему координат встановили на геодезичних пунктах та деформаційних марках будівлі (рис. 4).

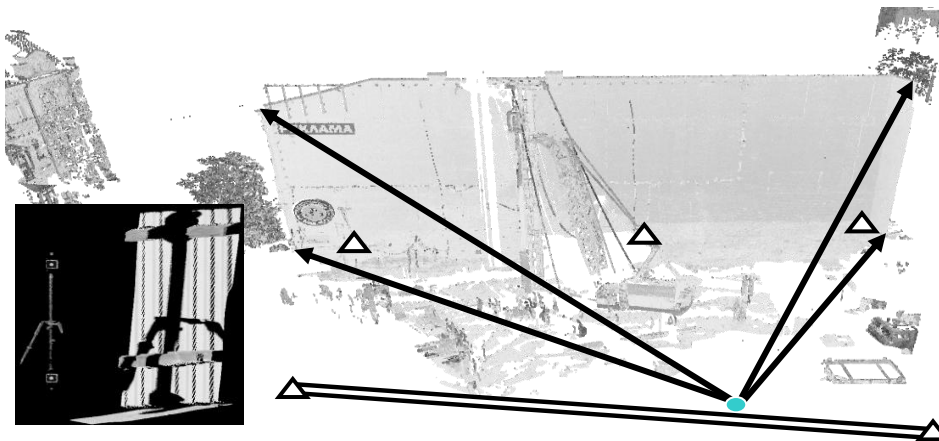


Рис. 4. Прив'язка станцій сканування в геодезичну систему координат

У першому циклі роботи були виконані з однієї станції сканування. На рис. 5 і 6 прямокутником показано область, яка була виділена після сегментації і для якої у першому і другому циклах виконано апроксимацію площиною. Далі наводимо результати розрахунків та визначення переміщень.

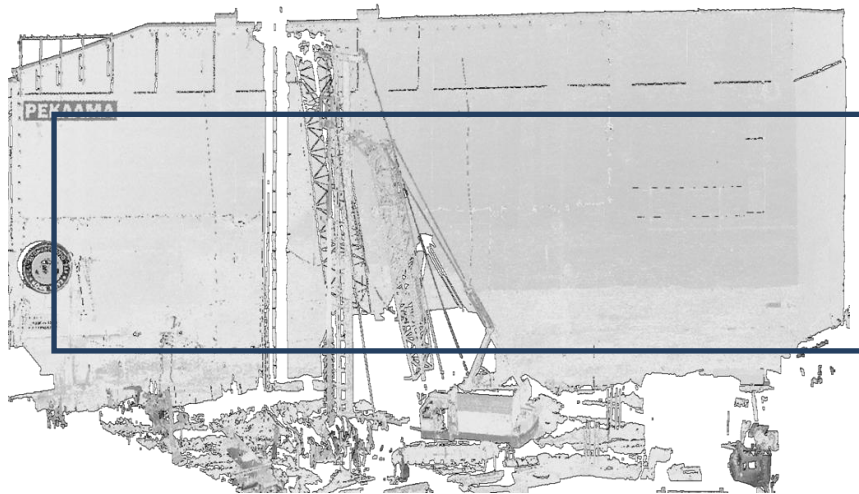


Рис. 5. Перший цикл спостережень

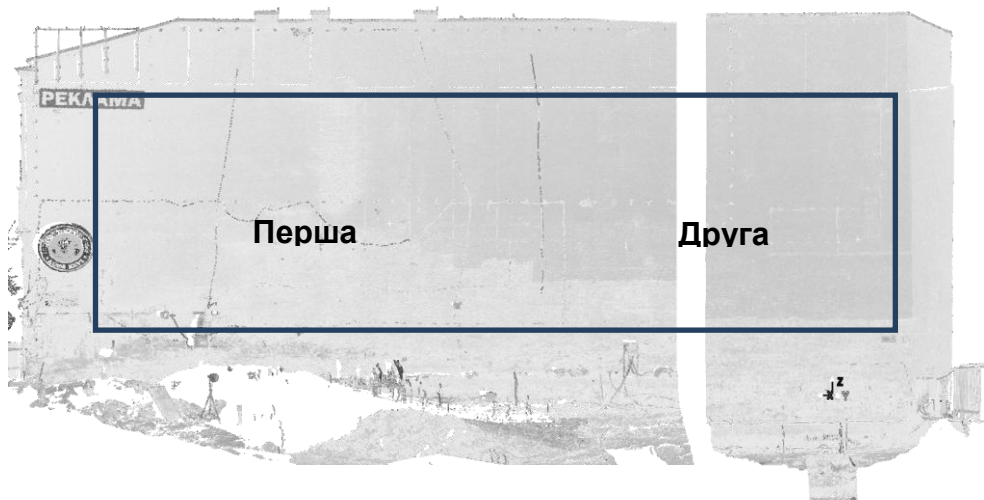


Рис. 6. Третій цикл спостережень

Визначимо за виразом (4) оцінки параметрів у двох циклах:

$$\mathbf{X}_1 = \begin{bmatrix} 0.00996 \\ -0.01993 \\ -1.5934 \times 10^{-5} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{X}_2 = \begin{bmatrix} 0.009997 \\ -0.019986 \\ 3.2851 \times 10^{-6} \end{bmatrix},$$

з оцінкою точності апроксимації за формулами (5):

$$\mu_1 = 1.8 \times 10^{-3} \text{ мм}; \quad \mu_2 = 1.8 \times 10^{-3} \text{ мм}.$$

За отриманими оцінками параметрів визначимо одиничні вектори нормалей до площини за виразом (7).

$$\mathbf{n}_1 = \begin{pmatrix} 0.4470 \\ -0.8945 \\ -7.15 \times 10^{-4} \end{pmatrix}; \quad \mathbf{n}_2 = \begin{pmatrix} 0.4474 \\ -0.8944 \\ 1,47 \times 10^{-4} \end{pmatrix}.$$



Використовуючи вираз (8), розраховуємо переміщення вектора нормалі:

$$\mathbf{d} = \begin{pmatrix} 3.380 \times 10^{-4} \\ 1.687 \times 10^{-4} \\ 8.621 \times 10^{-4} \end{pmatrix}.$$

Норма загального переміщення дорівнює  $\|\mathbf{d}\| = 9.413 \times 10^{-4}$  рад, або у кутовій мірі  $\gamma = 3.24'$

Кореляційні матриці параметрів знаходять за формулами (6)

$$\mathbf{K}_1 = \begin{pmatrix} 2.65 \times 10^{-9} & -4.08 \times 10^{-9} & 1.24 \times 10^{-9} \\ -4.08 \times 10^{-9} & 6.83 \times 10^{-9} & -2.48 \times 10^{-9} \\ 1.24 \times 10^{-9} & -2.48 \times 10^{-9} & 1.16 \times 10^{-9} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{K}_2 = \begin{pmatrix} 2.64 \times 10^{-9} & -4.06 \times 10^{-9} & 1.24 \times 10^{-9} \\ -4.06 \times 10^{-9} & 6.81 \times 10^{-9} & -2.47 \times 10^{-9} \\ 1.24 \times 10^{-9} & -2.47 \times 10^{-9} & 1.16 \times 10^{-9} \end{pmatrix}.$$

Для оцінювання точності визначення зміщення між векторами знаходимо матрицю частинних похідних (10):

$$\mathbf{C} = (-0.359 \quad -0.179 \quad -0.916)$$

та кореляційну матрицю (9)

$$\mathbf{K}_d = \begin{pmatrix} 5.30 \times 10^{-9} & -8.14 \times 10^{-9} & 2.48 \times 10^{-9} \\ -8.14 \times 10^{-9} & 1.36 \times 10^{-9} & -4.96 \times 10^{-9} \\ 2.48 \times 10^{-9} & -4.96 \times 10^{-9} & 2.32 \times 10^{-9} \end{pmatrix}.$$

Оцінку точності виконаємо за виразом (11). Знайдемо

$$m_{\|\mathbf{d}\|} = 4.5 \times 10^{-5} \text{ рад, або у кутовій мірі } m_\gamma = 0.2',$$

тобто отримане переміщення є значущою величиною і визначене із достатньою точністю.

Для того, щоб знайти загальне переміщення споруди за виразом (13), обчислимо матриці  $\mathbf{M}$ , для яких знайдемо власні значення

$$\mathbf{\Lambda}_1 = \begin{pmatrix} -1.360 \times 10^4 \\ -2.688 \times 10^3 \\ -0.786 \end{pmatrix}; \quad \mathbf{\Lambda}_2 = \begin{pmatrix} -1.361 \times 10^4 \\ -2.688 \times 10^3 \\ -0.775 \end{pmatrix}$$

та нормовані власні вектори

$$\mathbf{N}_1 = \begin{pmatrix} 0.894 & 3.4 \times 10^{-5} & 0.447 \\ 0.447 & 3.529 \times 10^{-5} & -0.894 \\ 4.62 \times 10^{-5} & 1 & -1.636 \times 10^{-5} \end{pmatrix};$$

$$\mathbf{N}_2 = \begin{pmatrix} 0.894 & 4.852 \times 10^{-4} & 0.448 \\ 0.448 & -6.941 \times 10^{-4} & -0.894 \\ 1.233 \times 10^{-4} & 1 & 8.378 \times 10^{-4} \end{pmatrix}.$$

За виразом (14) визначаємо коефіцієнти

$$D_1 = 44.711; D_2 = 44.566.$$

Знаючи координати станції сканування:  $X_S = 120.451$ ,  $Y_S = 68.452$ ,  $Z_S = 104.012$ , розрахуємо переміщення площини між циклами за виразами (15):

$$\Delta_1 = 37.409 \text{ м}; \Delta_2 = 37.424 \text{ м}$$

та знайдемо загальне переміщення площини  $\delta = 15$  мм. Наявність загального переміщення свідчить про те, що лінія нульового переміщення не проходить через фасад будівлі, тобто всі переміщення мають однаковий знак.

Для прикладу розрахуємо параметри лінії нульового переміщення. Визначимо множники Лагранжа  $\mathbf{k} = (189.79 \quad -727.7151)$ . За цими множниками знайдемо вектор, що належить лінії нульового переміщення

$$\mathbf{p} = (44.398 \quad 72.200 \quad 126.106)$$

та напрямні косинуси лінії

$$l = -8.5 \times 10^{-4}; m = -3.899 \times 10^{-4}; n = 0.401.$$

Наостанок розрахуємо переміщення крайніх точок споруди:

$$\Delta_X = \Delta X_{\max} \rho d_X = 10; \Delta_Y = \Delta Y_{\max} \rho d_Y = 2.5 \text{ мм}; \Delta_Z = \Delta Z_{\max} \rho d_Z = 12 \text{ мм}.$$

У лінійній мірі ця величина є відповідною зміщенню у верхній частині будівлі на +16 мм, що добре кореспондується з даними геодезичних вимірювань, які підтверджують факт крену стіни в напрямку, протилежному котловану, до 20 мм, а загальне осідання становить 12 мм.

Отже, запропонована методика дає змогу розв'язати задачу з визначення кренів історичних споруд за методом наземного лазерного сканування. Подальші дослідження слід виконати для об'єктів, що мають не лише площинну, а й більш складну форму. До об'єктів такого класу належать, наприклад, просторові оболонки.

**Висновок.** Досліджено метод наземного лазерного сканування для визначення кренів історичних споруд. Виявлено, що метод наземного лазерного сканування дає можливість оперативно з необхідною точністю виконувати спостереження за переміщеннями історичних споруд та отримати загальну картину крену споруди, а також відстежити локальні деформації споруди. В результаті виконаного дослідження запропоновано методику визначення деформаційних характеристик за допомогою методу наземного лазерного сканування, апробовану на прикладі спостережень за креном історичної споруди у м. Києві.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Вальков В.А.* Геодезические наблюдения за процессом деформирования высотных сооружений с использованием технологии наземного лазерного сканирования [Текст]: дис.... канд. техн. наук: 25.00.32 / В. А. Вальков. – СПб., 2015. – 158 с.
2. *Войтенко С.П.* Визначення кренів інженерних споруд методом наземного лазерного сканування / Войтенко С.П., Шульц Р.В., Білоус М.В. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва. – 2009. – Вип. I (17). – С. 144-150.
3. *Ермаков В.А.* Усовершенствование методики мониторинга пространственных деформаций стержневых конструкций сооружений с помощью лазерного сканирования // Вестник МГСУ. – 2011. – № 8. – С. 206–211.
4. *Наземное лазерное сканирование: монография / В.А. Середович, А.В. Комиссаров, Д.В. Комиссаров, Т.А. Широкова.* – Новосибирск: СГГА, 2009. – 261 с.
5. *Никулин Е.А.* Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 560 с.
6. *Рубцов И.В.* Назначение и современные способы проведения инструментального геодезического мониторинга памятников гражданской архитектуры / И.В. Рубцов, Т.А. Пятницкая // Вестник МГСУ. – 2013. – № 5. – С. 80–86.
7. *Симонян В.В.* Инструментальное определение кренов стен Борисоглебского монастыря / В.В. Симонян, А.И. Кузнецов, Э.С. Черненко, Т.А. Пятницкая // Вестник МГСУ. – 2011. – № 1(2). – С. 239–243.
8. *Сытник В.С.* Геодезический контроль точности возведения монолитных зданий и сооружений. / В.С. Сытник, А.Б. Ключин. – М.: Стройиздат, 1981. – 119 с.
9. *Шульц Р.В.* Теорія і практика наземного лазерного сканування в задачах інженерної геодезії [Текст]: дис.... доктора техн. наук: 05.24.01 / Р. В. Шульц. – К., 2012. – 364 с.
10. *Chang Y.-M., Lai S.-H., Peng S.-M., Chang K.-T., Tu Y.-S.* Data Processing of 3D Laser Scanning on Structural Deformation. // Integrating Generations FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden 14-19 June 2008, TS 5C – Structural Monitoring. 11p.
11. *Ioannidis C., Valani A., Georgopoulos A., Tsiligiris E.* 3D model generation for deformation analysis using laser scanning data of a cooling tower. / 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006.
12. *Kefyalew, H.* Investigation of the use of Laser Scanning for Deformation Monitoring [Text]: Master of Science Thesis / H.Kefyalew. - Stockholm, 2013. – 67 p.
13. *Koska B., Křemen T., Pospíšil J., Kyrinovič P., Halíčková J.* Monitoring Of Lock Chamber Dynamic Deformation // 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon, 12-15 May 12-15 2008 10p.
14. *Lindenbergh R., Pfeifer N., Rabbani T.* Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands, September 12-14, 2005 6p.

15. *Schafer T.*, Wasmeier P., Ratke K., Foppe K., Preu G. Motion detection at Munich's Olympic Tower with a multi-sensor system operating at different sampling rates / XXIII FIG Congress Munich, Germany, October 8-13, 2006.

16. *Schäfer T.*, Weber T., Kyrinovič P., Zámečniková M. Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo // INGENEO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying Bratislava, Slovakia, November 11-13, 2004 TS2 – Terrestrial Laser Scanning, 10p.

17. *Schneider D.* Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water damns. / 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden, May 22-24, 2006.

18. *Sternberg H.* Deformation Measurements at Historical Buildings with Terrestrial Laser Scanners. // IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden 25-27 September 2006, 6p.

### REFERENCES

1. Valkov, V.A. (2015). Geodezicheskie nablyudeniya za protsessom deformirovaniya vyisotnykh sooruzheniy s ispolzovaniem tehnologii nazemnogo lazernogo skanirovaniya [Geodetic monitoring of the deformation process of high-rise buildings using the technology of terrestrial laser scanning]. *Candidate's thesis*. St. Petersburg [in Russian].

2. Voitenko, S.P., Shults, R.V., Bilous, M.V. (2009) *Vyznachennia kreniv inzhenernykh sporud metodom nazemnoho lazernoho skanuvannia* [Determination rolls engineering structures by terrestrial laser scanning]. *Suchasni dosiahnennia heodezychnoi nauky ta vyrobnytstva. – Modern achievements of geodetic science and industry*, (Is. I (17)), (pp. 144-150) [in Ukrainian].

3. Ermakov, V.A. (2011) *Usovershenstvovanie metodiki monitoringa prostranstvennykh deformatsiy sterzhnevyykh konstruksiy sooruzheniy s pomoschy lazernogo skanirovaniya* [The Improvement of the Method for Monitoring Strain Space Bar Structures Using Laser Scanning]. *Vestnik MGSU – Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 8, pp. 206-211 [in Russian].

4. Seredovich V.A., Komissarov A.V., Komissarov D.V., Shirokova T.A. (2009) *Nazemnoe lazernoe skanirovanie* [Terrestrial laser scanning]. Novosibirsk: SGGGA [in Russian].

5. Nikulin, E.A. (2005) *Kompyuternaya geometriya i algoritmy mashinnoy grafiki* [Computer geometry and computer graphics algorithms]. St. Petersburg: BHV-Peterburg [in Russian].

6. Rubtsov, I.V., Pyatnitskaya, T.A. (2013) *Naznachenie i sovremennyye sposoby provedeniya instrumentalnogo geodezicheskogo monitoringa pamyatnikov grazhdanskoj arhitekturyi* [Purpose and Advanced Methods of Geodetic Tool Monitoring for Monuments of Civil Architecture]. *Vestnik MGSU – Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering*, 5, 80–86 [in Russian].

7. Simonyan, V.V., Kuznetsov, A.I., Chernenko E.S., Pyatnitskaya T.A. (2011) *Instrumentalnoe opredelenie krenov sten Borisoglebskogo monastyrya* [Express

Estimation Detection of the Borisoglebsky Monastery Walls Slants]. Vestnik MGSU – Proceedings of Moscow State University of Civil Engineering, 1(2), 239–243 [in Russian].

8. Syitnik, V.S., Klyushin, A.B. (1981) *Geodezicheskiy kontrol tochnosti vozvedeniya monolitnyih zdaniy i sooruzheniy* [Geodetic control precision monolithic construction of buildings and structures]. Moscow: Stroyizdat [In Russian].

9. Schultz, R. V. (2012). *Teoriya i prakty`ka nazemnogo lazernogo skanuvannya v zadachax inzhenernoyi geodeziyi* [Theory and practice of terrestrial laser scanning in the tasks of applied geodesy]. *Doctor's thesis*. Kyiv [in Ukrainian].

10. Chang Y.-M., Lai S.-H., Peng S.-M., Chang K.-T., Tu Y.-S.(2008) Data Processing of 3D Laser Scanning on Structural Deformation. // Integrating Generations FIG Working Week 2008, Stockholm, Sweden 14-19, TS 5C – Structural Monitoring.

11. Ioannidis C., Valani A., Georgopoulos A., Tsiligiris E. (2006) 3D model generation for deformation analysis using laser scanning data of a cooling tower. / 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden.

12. Kefyalew, H. (2013) Investigation of the use of Laser Scanning for Deformation Monitoring [Investigation of the use of Laser Scanning for Deformation Monitoring]. Stockholm, 67.

13. Koska B., Křemen T., Pospíšil J., Kyrinovič P., Halíčková J. (2008) Monitoring Of Lock Chamber Dynamic Deformation // 13<sup>th</sup> FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, Lisbon.

14. Lindenbergh R., Pfeifer N., Rabbani T. (2005) Accuracy analysis of the leica HDS3000 and feasibility of tunnel deformation monitoring. ISPRS WG III/3 Workshop "Laser scanning 2005", Enschede, the Netherlands.

15. Schafer T., Wasmeier P., Ratke K., Foppe K., Preu G. (2006) Motion detection at Munich's Olympic Tower with a multi-sensor system operating at different sampling rates / XXIII FIG Congress Munich, Germany.

16. Schäfer T., Weber T., Kyrinovič P., Zámečnicková M. (2004) Deformation Measurement Using Terrestrial Laser Scanning at the Hydropower Station of Gabčíkovo // INGENIO 2004 and FIG Regional Central and Eastern European Conference on Engineering Surveying Bratislava, Slovakia, TS2 – Terrestrial Laser Scanning.

17. Schneider D. (2006) Terrestrial laser scanning for area based deformation analysis of towers and water damns. / 3rd IAG / 12th FIG Symposium, Baden.

18. Sternberg H.(2006) Deformation Measurements at Historical Buildings with Terrestrial Laser Scanners. // IAPRS Volume XXXVI, Part 5, Dresden.

**Р.В. Шульц,  
Н.В. Белоус,  
В.Я. Ковтун,  
Н.В. Куличенко  
О.М. Гончерюк**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ КРЕНОВ ИСТОРИЧЕСКИХ ЗДАНИЙ МЕТОДОМ НАЗЕМНОГО ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ**

*В работе предложена методика определения кренов исторических сооружений по материалам наземного лазерного сканирования. Рассмотрена методика определения перемещения сооружений, имеющих значительное количество плоскостных элементов. Приведена математическая модель аппроксимации результатов сканирования уравнением плоскости по методу наименьших квадратов. Полученные в двух циклах из аппроксимации уравнения плоскостей сравниваются через величины изменения нормальных векторов плоскостей. Вычисление линии нулевого перемещения выполнено по уравнениям плоскости в неявной форме. Для получения неявного уравнения плоскости использован алгоритм, основанный на вычислении собственных значений и нормированных собственных векторов. С использованием линии нулевого перемещения предложен алгоритм для определения линейного перемещения плоскости исторического здания. Разработанная методика апробирована на материалах сканирования исторического сооружения, находящегося в зоне строительных работ в г. Киеве.*

**Ключевые слова:** наземное лазерное сканирование, крен, уравнение прямой, уравнение плоскости, вектор нормали, проекции вектора нормали.

**R.V. Schultz,  
N.V. Belous,  
V.Y. Kovtun,  
N.V. Kulichenko,  
O. Honcheryuk**

## **DETERMINATION OF HISTORIC BUILDINGS ROLLS BY TERRESTRIAL LASER SCANNING**

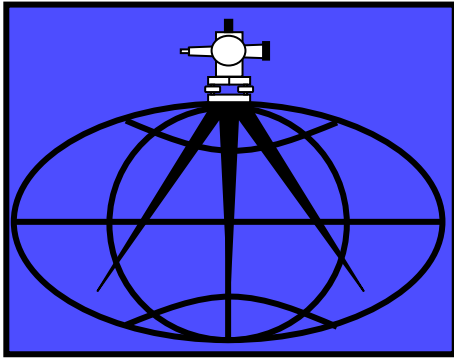
*In this work we propose a method of determining the rolls of the historic buildings by materials of terrestrial laser scanning. The method of determining the movement of buildings, with a significant number of planar elements is reviewed. The mathematical model of the equation approximating the results of scanning plane by the method of least squares showed. These two cycles of the approximation of the planes are compared by the*

*amount of change of normal vectors of planes. To do this using the normal vector of the plane pass to its norm. The resulting difference is compared with the norm of valid values, which are obtained by the standard procedure for assessing the accuracy of the parameters of the plane in the method of least squares. The calculation of the zero line of movement performed by the plane equation in implicit form. To obtain the implicit equation of a plane used by the algorithm based on the computation of the eigenvalues and eigenvectors normalized. Using the zero line moving an algorithm for determining the linear displacement of the plane of a historic building is showed. Since linear movement is invariant with respect to the coordinate system, it proposed to calculate the movement relative to coordinates of the laser scan. The developed method was tested on the scanned material of historic buildings located in the area of construction works in Kiev.*

**Keywords:** *terrestrial laser scanning, roll, line equation, plane equation, the normal vector, the projection of the normal vector.*

Надійшла до редакції

10.12.2015



## КАДАСТР І МОНІТОРИНГ ЗЕМЕЛЬ

УДК 332.6

**В.К. Чибіряков**, *д-р техн. наук, професор,  
завідувач кафедри вищої математики*

**М.А. Малашевський**, *канд. техн. наук, доцент, завідувач  
кафедри земельних ресурсів ВСП ІПО,*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

**О.А. Бугаєнко**, *асист. кафедри землеустрою і кадастру,*

*Київський національний університет будівництва і архітектури*

### ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ РОЗРАХУНКУ РІВНОЦІННИХ ЗЕМЕЛЬНИХ ДІЛЯНОК СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ПІД ЧАС ЇХ ОБМІНУ

*У розрізі методики обміну земель під час впорядкування землеволодінь і землекористувань проаналізовано можливості врахування основних факторів впливу, зумовлених змінними соціально-економічними умовами. Запропоновано вдосконалену формулу розрахунку площ обмінюваних земельних ділянок сільськогосподарського призначення. Визначено та обґрунтовано технічні показники, що характеризують фактори впливу для принципових випадків обміну сільськогосподарських земель.*

**Ключові слова:** обмін земель, рівноцінні земельні ділянки, фактори рівноцінного обміну.

**Вступ.** Обмін земель – ефективна складова як вітчизняної, так і закордонної практики впорядкування землеволодінь і землекористувань, зокрема усунення недоліків землекористування. Зважаючи на актуальні завдання землеустрою, що зумовлюють перегрупування земель, виникає потреба в дослідженні можливостей застосування та шляхів вдосконалення методики рівноцінного обміну земель у сучасних умовах.

На докладний розгляд та аналіз, зважаючи на виняткову актуальність оптимізації фрагментованих землеволодінь і землекористувань, заслугове рівноцінний обмін земельних ділянок сільськогосподарського призначення. Особливості формування технічної складової цього процесу зумовлені потребою в оптимізації площі земель колективної та державної власності відповідно до спеціалізації, природних умов тощо [1] шляхом укрупнення або розділення землекористування. Загалом основні принципи та підходи до розрахунку розмірів



обмінюваних ділянок значною мірою залежали від вихідних умов й обґрунтування. Останнім часом гостро постає питання визначення уніфікованих механізмів впорядкування землеволодінь і землекористувань, отже, у застосуванні методики рівноцінного обміну земельних ділянок сільськогосподарського призначення виникає потреба у вичерпному врахуванні чинників впливу безпосередньо під час виконання розрахунків.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Технічну та процесуальну складові обміну земель з погляду раціоналізації землекористування розглянуто у працях А. Мартина, О. Краснолуцького, Л.Ткачук, А. Третьяка, В. Другака та ін. Висловлено, зокрема, загальні пропозиції щодо вдосконалення розрахунків обміну, оцінювання земельних ділянок. Водночас досі не запропоновано комплексного аналізу принципів і вичерпного обґрунтування механізмів обміну земельних ділянок сільськогосподарського призначення.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є визначення можливостей вдосконалення методики розрахунку розміру земельних ділянок сільськогосподарського призначення в процесі обміну земель шляхом відображення основних факторів впливу в сучасних соціально-економічних умовах.

**Основна частина.** У процесі обміну земель у сучасних умовах, зважаючи на посилення вимог до інтенсифікації землекористування, захисту прав власності та охорони земель, доцільно брати до уваги низку факторів [2] (рис. 1).

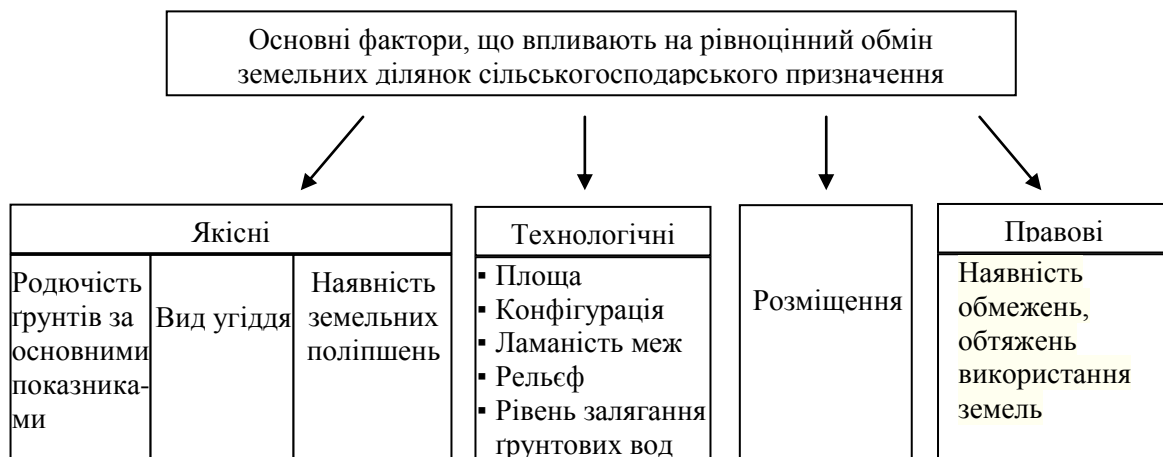


Рис. 1. Класифікація факторів, що впливають на рівноцінний обмін сільськогосподарських земель

Традиційно розрахунок рівноцінних земельних ділянок у процесі обміну відображає залежність площі земельної ділянки  $P_i$  від балу бонітету  $B_i$  [3]:

$$P_2 = \frac{P_1 \cdot B_1}{B_2} .$$

У разі наявності у межах земельної ділянки ґрунтів різних агровиробничих груп наведене співвідношення доцільно представити у вигляді рівності

$$\sum_{k=1}^n P_k B_k = \sum_{j=1}^m P_j B_j , \tag{1}$$

де  $P$ – площа ґрунту агровиробничої групи в межах обмінюваних земельних ділянок;

$B$  – бал ґрунту певної агровиробничої групи;

$n, m$  – кількість агровиробничих груп ґрунтів у межах першої і другої обмінюваних земельних ділянок.

З метою відображення додаткових факторів формулу (1) пропонується удосконалити, застосовуючи коефіцієнт  $K$ , що характеризує просторові, правові та невраховані якісні особливості обмінюваних земельних ділянок:

$$K_1 \sum_{k=1}^n P_k B_k = K_2 \sum_{j=1}^m P_j B_j. \quad (2)$$

Значення  $K$  обчислюють як добуток окремих коефіцієнтів залежно від наявності факторів, що їх визначають, за формулою:

$$K_i = K_{Я_i} \times K_{V_i} \times K_{П_i} \times K_{К_i} \times K_{Л_i} \times K_{Р_i} \times K_{В_i} \times K_{М_i} \times K_{О_i}, \quad (3)$$

де  $K_{Я_i}$  – коефіцієнт, що характеризує погіршення якості ґрунту внаслідок забруднення, ерозії тощо;

$K_{V_i}$  – коефіцієнт, що характеризує вид сільськогосподарських угідь;

$K_{П_i}$  – коефіцієнт, що характеризує наявність земельних поліпшень;

$K_{К_i}$  – коефіцієнт, що характеризує конфігурацію земельної ділянки;

$K_{Л_i}$  – коефіцієнт, що характеризує ламаність меж земельної ділянки;

$K_{Р_i}$  – коефіцієнт, що характеризує рельєф;

$K_{В_i}$  – коефіцієнт, що характеризує гідрографічні умови земельної ділянки;

$K_{М_i}$  – коефіцієнт, що характеризує розміщення земельної ділянки;

$K_{О_i}$  – коефіцієнт, що характеризує наявність обмежень й обтяжень у використанні земельної ділянки.

Відповідно до суті оцінювання якості земельних ділянок [4] значення бала бонітету як порівняльної оцінки родючості за показниками властивостей ґрунтів, що суттєво впливають на урожайність [5], доповнено коефіцієнтом  $K_{Я}$  для корегування формули (1), якщо земельна ділянка зазнала ерозії, забруднення або псування земель.

У розрізі основних груп факторів, аналізуючи вихідну формулу (1), вид сільськогосподарських угідь земельної ділянки і наявність поліпшень, вплив технологічних, правових факторів та розміщення доцільно характеризувати окремими коефіцієнтами. При цьому беруть до уваги функціональну роль сільськогосподарських земель як фактор виробництва, що виявляється в недостовірності бонітету для відображення якості земель на площах із несприятливими технологічними умовами території [6], змінності оцінки розміщення та втратах виробництва за обмежень та обтяжень використання земель. З огляду на наведені фактори відповідно до розрахунків визначають площі рівноцінних земельних ділянок – сталого просторового базису порівняно з відносно змінними іншими показниками, такими як характеристики ґрунтів, правовий режим використання.

За умови обміну земельних ділянок ріллі в межах одного земельного масиву без земельних поліпшень, обмежень, обтяжень використання земель встановимо

технічні показники, що характеризують наявні фактори впливу під час розрахунку відповідно до формули (2). У такому разі загальний коефіцієнт  $K_i$  доцільно характеризувати сукупним впливом конфігурації, ламаності меж, рельєфу земельної ділянки, зважаючи на погіршення якості земель:

$$K_i = K_{яi} \times K_{Ki} \times K_{Лi} \times K_{Pi}.$$

Коефіцієнт  $K_{яi}$  запропоновано визначати відповідно до поправочних коефіцієнтів, обґрунтованих М.В Кривовим [7] у випадках, коли земельна ділянка має ознаки водної або вітрової ерозії, закиснення, залуження, засолення, завалунення, карстоутворення.

Для оцінювання конфігурації земельної ділянки взято за основу показник відцентрованості як характеристики віддаленості сторін периметру від центра фігури. Застосування цього показника для порівняння земельних ділянок різної форми обґрунтовано М. О Володимир [8]. При цьому в разі здійснення рівноцінного обміну земельних ділянок коефіцієнт  $K_K$  пропонується визначати за формулою:

$$K_K = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{r_{\min}^i}{r_{\max}^i}}{n},$$

де  $r^i$  – максимальна і мінімальна відстані від центра до  $i$ -ї сторони земельної ділянки;

$n$  – кількість сторін.

Центр земельної ділянки у такому разі визначають так само, як центр ваги для земельної ділянки будь-якої конфігурації, – шляхом поділу на підділянки у формі трикутників за усталеною методикою [9]. При цьому максимальна і мінімальна відстані є відстанями до поворотних точок і перпендикулярами до сторін.

Ламаність меж земельної ділянки, зважаючи на особливості формування контуру довільного багатокутника, може бути локалізована, отже, можливим є порівняння довжини ламаного фрагмента з відповідною прямою віднесення [8]. Ламаність меж земельної ділянки охарактеризуємо коефіцієнтом  $K_{Л}$ , що у розгляданому випадку доцільно розраховувати за формулою:

$$K_{Л} = \frac{\sum_{k=1}^n \frac{a_k^2}{\sum_{j=1}^m l_{kj}}}{\sum_{k=1}^n a_k},$$

де  $n$  – кількість фрагментів периметра;

$a$  – довжина прямої віднесення для  $k$ -го фрагмента (рис. 2);

$m$  – кількість ламаних складових в межах  $k$ -го фрагмента;

$l$  – довжина ламаної складової  $k$ -го фрагмента периметра.

Визначаючи рівноцінні земельні ділянки сільськогосподарського призначення, рекомендовано брати до уваги рельєф, застосовуючи при цьому значення ухилу як одного з найбільш вагомих у господарській діяльності показників під час заходів для збереження і покращення якості земель. За умови, що земельну ділянку поділяють на  $n$  трикутників з вершинами у поворотних точках земельної ділянки і центрі ваги, для визначення показника конфігурації розрахунок кута, що

характеризує ухил, можна виконувати за координатами вершин, використовуючи кут нахилу нормалі до площини трикутника [9].

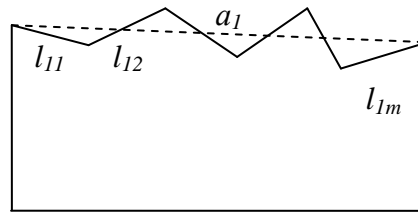


Рис. 2. Розміщення прямої віднесення в межах ламаного фрагмента периметра багатокутника

Оскільки площина трикутника за координатами вершин може бути задана у вигляді

$$\begin{vmatrix} x - x_A & y - y_A & z - z_A \\ x_B - x_A & y_B - y_A & z_B - z_A \\ x_C - x_A & y_C - y_A & z_C - z_A \end{vmatrix} = 0$$

або

$$(x - x_A) \cdot \begin{vmatrix} y_B - y_A & z_B - z_A \\ y_C - y_A & z_C - z_A \end{vmatrix} + (y - y_A) \cdot \begin{vmatrix} x_B - x_A & z_B - z_A \\ x_C - x_A & z_C - z_A \end{vmatrix} + (z - z_A) \cdot \begin{vmatrix} x_B - x_A & y_B - y_A \\ x_C - x_A & y_C - y_A \end{vmatrix} = 0,$$

шуканий кут може бути розрахований через значення косинуса кута між вертикальною віссю і нормаллю до площини із застосуванням формули:

$$\cos(\vec{N}, \vec{k}) = \frac{N_z}{\sqrt{N_x^2 + N_y^2 + N_z^2}},$$

де  $N$  – вектор нормалі:

$$\vec{N} = N_x \vec{i} + N_y \vec{j} + N_z \vec{k}.$$

При цьому:

$$N_x = \begin{vmatrix} y_B - y_A & z_B - z_A \\ y_C - y_A & z_C - z_A \end{vmatrix}, \quad N_y = \begin{vmatrix} x_B - x_A & z_B - z_A \\ x_C - x_A & z_C - z_A \end{vmatrix}.$$

Відповідно до обчисленого кута нахилу площин трикутників для кожного з них пропонується визначити поправочний коефіцієнт  $K_{Pi}$  згідно з табл. 1 [10].

Коефіцієнт, що характеризує рельєф земельної ділянки, визначають як середньозважений:

$$K_p = \frac{\sum_{i=1}^n K_{Pi} P_i}{\sum_{i=1}^n P_i},$$

де  $K_p$  – поправочний коефіцієнт за рельєф для трикутника;  
 $n$  – кількість трикутників, на які поділено земельну ділянку;  
 $P$  – площа трикутника.

**Поправочні коефіцієнти на рельєф земельної ділянки**

Крутизна схилу, град	Поправочний коефіцієнт
менша за 1	1,00
1-3	0,96
3-5	0,93
5-7	0,87
7-9	0,76

Припустимо, що до обміну запропоновано земельну ділянку ріллі складної конфігурації (рис. 3), що має ухил  $2^\circ$  і поверхня ґрунту якої характеризується середнім ступенем кам'янистості, земельними поліпшеннями, тоді як обмежень і обтяжень використання немає.

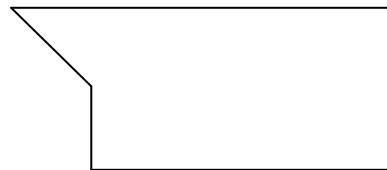


Рис. 3. Земельна ділянка складної конфігурації, запропонована до обміну

Розрахунок розміру рівноцінної земельної ділянки ріллі у межах одного земельного масиву та поширення ґрунтів визначеної агровиробничої групи, квадратної форми та без заданих інших характеристик, виконано в табл. 2.

Таблиця 2

**Розрахунок рівноцінних земельних ділянок**

	$P_1$ , га	$B_1$	$K_1$		$P_2$ , га	$B_2$	$K_2$
Без урахування факторів впливу	<b>2</b>	<b>18</b>			<b>1,06</b>	<b>34</b>	
З урахуванням факторів впливу	<b>2</b>	<b>18</b>	0,89	$K_A$	<b>0,41</b>	<b>34</b>	<b>0,71</b>
			0,63	$K_K$			
			0,99	$K_L$			
			0,98	$K_P$			
			<b>0,54</b>				

**Висновки.** Базуючись на дослідженні міри врахування факторів, що найбільше впливають на рівноцінний обмін земельних ділянок сільськогосподарського призначення в сучасних соціально-економічних умовах, у межах застосовуваної методики запропоновано вдосконалену формулу розрахунку. Визначено та обґрунтовано технічні показники, що характеризують основні фактори впливу на підходи до обміну земель.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. *Малашевський М. А.* Дослідження вітчизняного досвіду обміну земель сільськогосподарського призначення / М. А. Малашевський, Ю. А. Мосійчук, О. А. Бугаєнко // Інженерна геодезія. – 2014. – № 61. – С. 85-94.
2. *Бугаєнко О. А.* Дослідження факторів, що впливають на проведення рівноцінного обміну земельних ділянок сільськогосподарського призначення/ О. А. Бугаєнко // Містобудування та територіальне планування. – 2015. – № 57. – С.48-54.
3. *Землеустроительное проектирование* / М. А. Гендельман. В. Я. Заплетин, А. Д. Шулейкин и др.; под ред. М. А. Гендельмана. – М.: Агропромиздат, 1986. – 511 с.
4. *Якість ґрунту. Показники родючості ґрунтів: ДСТУ 4362:2004.* – [Чинний від 2004-11-09]. – К.: Держспоживстандарт України, 2005. – 36 с. – (Національний стандарт України).
5. *Новаковский Л. Я.* Справочник по землеустройству / Л. Я. Новаковский, В. М. Буленок, Ю. Н. Вагин [и др.]; под ред. Л. Я. Новаковского. – 3-е изд., перераб. и доп. – К.: Урожай, 1989. – 353 с.
6. *Борук А. Я.* Бонитировка и экономическая оценка земель / А. Я. Борук. – М.: Колос, 1972. – 172 с.
7. *Кривов В. М.* Основи землевпорядкування: навч. посіб. / В. М. Кривов, Р. В. Тихенко, І. П. Гетманьчик. – 2-ге вид., доповн. – К.: Урожай, 2009. – 322 с.
8. *Володін М. О.* Теоретичні основи формування кадастрового забезпечення базових процесів використання земельних ресурсів: дис. ... доктора техн. наук: 25.00.26 «Кадастр і моніторинг земель» / М. О. Володін – К., 2004. – 316 с.
9. *Малашевський М. А.* Врахування рельєфу при визначенні площ фізичної поверхні місцевості: дис. ... канд. техн. наук: 05.24.01 «Геодезія, фотограмметрія та картографія» / М. А. Малашевський. – К., 2011. – 140 с.
10. *Волков С. Н.* Землеустройство. Экономика землеустройства. [Т.5.] / С. Н. Волков. – М.: Колос, 2001. – 456 с.

**REFERENCES**

1. Malashevskiy, N. A., Mosiichuk, Yu. A. & Bugaienko, O. A. (2014). Doslidzhennia vitchyznianoho dosvidu obminu zemel silskohospodarskoho pryznachennia [The research of the homeland experience of land exchange]. *Inzhenerna heodeziia – Engineering geodesy*, 61, 85-94 [in Ukrainian].
2. Bugaienko, O. A. (2015). Doslidzhennia faktoriv, shcho vplyvaiut na provedennia rivnotsinnoho obminu zemelnykh dilianok silskohospodarskoho pryznachennia [The research of factors affecting the peer agricultural land plots exchange]. *Mistobuduvannia ta terytorialne planuvannia – Urban construction and territory planning*, 57, 48-54 [in Ukrainian].
3. Hendelman, M.A., Zapletin, V.Ya. & Shuleikin, A.D. (1986). *Zemleustroitelnoe proektirovanie [Land Surveying Design]*. M.A.Hendelman (Ed.). Moscow: Agropromizdat [in Russian].

4. Yakist gruntu. Pokaznyky rodiuchosti gruntiv [Soil Quality. Soil Fertility Figures]. (2005). *DSTU 4362:2004 from 11 November 2004*. Kyiv: Derzhspozhyvstandart Ukraine [in Ukrainian].
5. Novakovskiy, L. Ya., Bulenok, V. M., Vahyn, Yu. N. (1989). *Spravochnyk po zemleustroistvu [Land Surveying Guide]*. (3d ed.rev.). L. Ya. Novakovskiy (Ed.). Kyiv: Urozhay [in Ukrainian].
6. Boruk, A. Ya. (1972). *Bonytyrovka y ekonomycheskaia otsenka zemel [Taxation and Land Economic Assessment]*. Moscow: Kolos [in Russian].
7. Kryvov, V. M., Tykhenko, R. V. & Hetmanchyk, I. P. (2009) *Osnovy zemlevporiadkuvannia [The Essentials of Land Surveying]*. (2d ed.rev.). Kyiv: Urozhai, [in Ukrainian].
8. Volodin, M. O. (2004). *Teoretychni osnovy formuvannia kadaastrovoho zabezpechennia bazovykh protsesiv vykorystannia zemelnykh resursiv [The Theoretical Basis for Forming the Cadastral Supply of the Basic Land Resource Usage Process]*. *Doctor`s thesis*. Kyiv: KNUCA [in Ukrainian].
9. Malashevskiy, M. A. (2011). *Vrakhuvannia reliefu pry vyznachenni ploshch fizychnoi poverkhni mistsevosti [Considering the Relief at Defining the Area of the Terrain Physical Surface]* *Candidat`s thesis*. Kyiv: KNUCA [in Ukrainian].
10. Volkov, S. N. (2001). *Zemleustroistvo. Ekonomyka zemleustroistva. [Land Surveying Land Surveying Economy]*. (Vols. 5). Moscow: Kolos [in Russian].

**В.К. Чибиряков**  
**Н.А. Малашевский**  
**Е.А. Бугаенко**

#### **СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА РАВНОЦЕННЫХ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОГО НАЗНАЧЕНИЯ ПРИ ОБМЕНЕ**

*В разрезе методики обмена земель при упорядочении землевладений и землепользований проанализированы возможности учета основных факторов влияния, обусловленных изменяющимися социально-экономическими условиями. Предложено усовершенствованную формулу расчета площадей земельных участков сельскохозяйственного назначения, которые обмениваются. Определены и обоснованы технические показатели, характеризующие факторы влияния для принципиальных случаев обмена сельскохозяйственных земель.*

**Ключевые слова:** обмен земель, равноценные земельные участки, факторы равноценного обмена.

**V. Chibiriakov**  
**M. Malashevskiy**  
**O. Bugaienko**

#### **THE DEVELOPMENT OF PEER AGRICULTURAL LAND PLOTS CALCULATION METHODOLOGY AT THE EXCHANGE PROCESS**

*The calculation of peer agricultural land plots has been analyzed based on the existing land exchange methodology at the land ownership and land tenure resettlement.*

*The possibility and the extent, to which the key influence factors, predetermined by changeable social and economic conditions are taken into consideration, i.e. qualitative, spatial and technological properties, placement and legal restrictions and limitations for land plot usage have been defined. The improved formula for calculating the area of agricultural land plots to be exchanged, considering the quality of soil in accordance to the relative quality, the lowering of their quality in case of contamination, erosion, damage, agricultural land type, land improvements, configuration, folding, relief, ground water level, placement, land plot usage limitations and restrictions have been suggested. Technical data, characterizing influence factors for agricultural land plots exchange within the specified land massif have been determined and substantiated. Based on the provided preconditions, land plot area, equal to the given one, is calculated using the improved methodology. In accordance to the set above options, coefficients characterizing stoniness, complicated configuration, folding of limits and relief inclination are applied to the specified land plot.*

**Key words:** *land exchange, peer land plots, peer exchange factors.*

Надійшла до редакції

26.06.2015

**УДК 332.85 + 332.334.4:711.58**

**Ю.М. Чобану**, канд. техн. наук, доцент  
кафедри земельних ресурсів ВСП ІПО  
Київський національний університет будівництва та архітектури

## **СТРУКТУРНА МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ РИНКУ ЖИТЛОВОЇ НЕРУХОМОСТІ**

*На основі комплексного підходу до формування ринку житлової нерухомості розглянуто економічну, правову, адміністративну, містобудівну, земельну, інженерну, соціальну складові його інфраструктури як взаємопов'язані й взаємодоповнювані елементи єдиної, цілісної системи інститутів ринку житлової нерухомості. Відповідно до чинного законодавства структуровано об'єкти житлової нерухомості, які за різних обставин можуть бути об'єктами ринку житлової нерухомості. Запропоновано структурну модель функціонування ринку житлової нерухомості.*

**Ключові слова:** *структурна модель; об'єкти; суб'єкти; інфраструктура ринку житлової нерухомості.*

**Вступ.** Ефективний розвиток та функціонування ринку нерухомості загалом та ринку житлової нерухомості зокрема залежить від його інфраструктури, яка формується відповідно до особливостей житлової нерухомості та прав на неї у контексті тієї чи іншої сфери діяльності.



Саме комплексний підхід до формування інфраструктури ринку житлової нерухомості може певним чином синхронізувати процеси його функціонування і сприяти їх найвищій ефективності.

У зв'язку із цим набуває актуальності комплексне дослідження елементів формування ринку житлової нерухомості, зокрема його об'єктів та суб'єктів як взаємопов'язаних й взаємодоповнюваних складових єдиної, цілісної системи.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Завдання ринку нерухомості зумовлюють його специфічні функції, дослідженні в працях науковців В.А. Йолкіної, І.А. Єфіменко, А.О. Бойко, які, проте, стосуються здебільшого особливостей певного виду діяльності, зокрема ріелтерської, а також безпосередньо ринку комерційної нерухомості та джерел інформації для оцінювання ринку нерухомості.

**Постановка завдання.** Структурувати об'єкти житлової нерухомості, які за різних обставин можуть бути об'єктами ринку. На основі комплексного підходу до формування ринку житлової нерухомості розглянути економічну, правову, адміністративну, містобудівну, земельну, інженерну, соціальну складові його інфраструктури як взаємопов'язані й взаємодоповнювані елементи єдиної, цілісної системи інститутів ринку житлової нерухомості, на основі чого побудувати структурну модель функціонування ринку житлової нерухомості та його інфраструктури.

**Основна частина.** З метою визначення особливостей структури ринку житлової нерухомості потрібно дослідити особливості структури його суб'єкта та об'єкта. З цією метою виконано аналіз функцій, які можуть бути притаманні житловій нерухомості як соціальній категорії та як об'єкту ринку, що й стало поштовхом до розроблення функціональної моделі впливу житла на розвиток життєдіяльності людини (рис. 1).

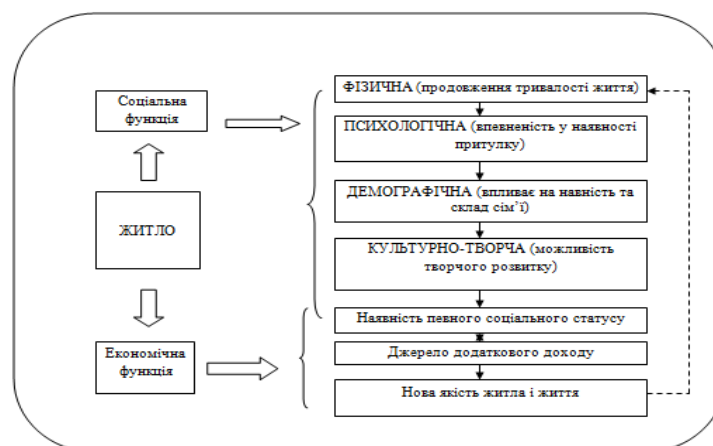


Рис.1. Функціональна модель впливу житла на розвиток життєдіяльності людини

Склад учасників ринку житлової нерухомості визначається процесами, які відбуваються на цьому ринку, зумовленими специфічними особливостями об'єктів житлової нерухомості та різноманіттям сфер діяльності, об'єктом яких може бути житлова нерухомість.

На підставі структурно-функціонального аналізу комплексно виділено інституції ринку житлової нерухомості. Суб'єкти ринку житлової нерухомості

укрупнено можна поділити на інституційних, котрі представляють інтереси держави і діють від її імені, та неінституційних учасників, що працюють на комерційній основі.

Ефективне регулювання фінансової діяльності на ринку житлової нерухомості забезпечують на рівні державної влади – уряд, Національний банк України, територіальні органи місцевого самоврядування, державні установи. Оціночна діяльність контролюється Наглядовою радою з питань оціночної діяльності Фонду державного майна України; виконання фіскальної функції забезпечують територіальні органи податкової служби; кредитування житла – Державна іпотечна установа, Державний фонд сприяння молодіжному житловому будівництву; контроль за страхуванням житлової нерухомості та життям власників іпотечних житлових кредитів здійснює Державна комісія з регулювання ринків фінансових послуг України, яка є держателем Єдиного державного реєстру страховиків (перестраховиків) України. Державне страхування представлене також державними і комерційними страховиками. Нині правонаступницею Держстраху СРСР в Україні є Національна акціонерна страхова компанія «Оранта», яка здійснює державні види обов'язкового страхування, зокрема страхування іпотеки. До неінституційних учасників належать інвестори (юридичні та фізичні особи), оціночні установи – суб'єкти підприємницької діяльності, що мають відповідні ліцензії, банки, кредитні організації, комерційні страхові компанії, а також особи, що є платниками податків.

Містобудівна функція суб'єктів ринку житлової нерухомості визначає всі етапи містобудівної діяльності і охоплює підфункції прогнозування, розвитку і планування територій під забудову, створення інженерної і транспортної інфраструктури для її обслуговування, проектування, будівництво, реконструкцію та реставрацію об'єктів житлової нерухомості. Землепорядна функція полягає у виконанні проектних і землепорядних робіт. Інституційними учасниками ринку за цією функцією є державні органи, органи місцевого самоврядування у сфері містобудування й архітектури, земельних ресурсів, а також комерційні учасники – будівельно-проектні організації, фірми-забудовники, інвестиційно-консалтингові фірми, інжинірингові організації, девелоперські організації, що мають ліцензії на проведення відповідної діяльності.

Правова функція покликана забезпечити повноцінний механізм обігу цивільно-правових угод. Виконують цю функцію інституційні учасники - Міністерство юстиції України, державні нотаріальні контори, до неінституційних належать приватні нотаріальні контори. Крім того, діяльність нотаріату характеризують такі поняття як територіальна та предметна компетенція. Територіальна компетенція пов'язана з розмежуванням кола дій між нотаріальними конторами відповідно до території її діяльності згідно зі статтею 41 [1].

Реєстраційна функція полягає в державній реєстрації прав на нерухоме майно – будівлі і споруди, земельні ділянки. Обліково-інвентаризаційна функція - в здійсненні обліку та інвентаризації об'єктів житлової нерухомості. Підприємствами комунальної власності, які здійснюють технічну інвентаризацію об'єктів нерухомого майна, оцінку та облік нерухомості (крім земельних ділянок), є бюро технічної інвентаризації.

Інформаційно-посередницька функція є надзвичайно великою і слугує інтересам суб'єктів ринку для обміну товарами, послугами та інформацією. Посередниками на ринку є комерційні структури – фірми, що виконують посередницькі функції під час укладання цивільно-правових угод з нерухомістю, яка не переходить у їх власність. До учасників також можуть належати агентства нерухомості, ріелторські фірми, аналітичні центри тощо. Особливістю діяльності таких структур є те, що чіткого законодавства стосовно її здійснення на теперішній час немає.

Статистична функція суб'єктів ринку полягає в отриманні всебічної й об'єктивної статистичної інформації щодо ситуації у сфері житлової нерухомості в Україні та регіонах і забезпечення нею держави та суспільства. Інституційними структурами у цій сфері є Державний комітет статистики України, міські та обласні управління статистики, комерційними представниками – агентства нерухомості, ріелторські фірми, аналітичні центри тощо, що збирають та систематизують інформацію про ринок, зокрема про цінову ситуацію на ньому, аналізують її та продають як опрацьовану аналітичну інформацію з метою отримання прибутку.

Управлінсько-адміністративна функція означає організацію управління процесами, потрібними для повноцінного функціонування ринку житлової нерухомості. Виконують цю функцію лише інституційні суб'єкти.

Соціальна функція полягає в реалізації конституційного права на житло громадян шляхом покращення їх житлових умов, надання відповідних пільг, субсидій [2]. Забезпечення цієї функції відбувається частково інституційними суб'єктами ринку житлової нерухомості – Державною іпотечною установою, а також структурними підрозділами виконавчих комітетів міських рад – відділами обліку, розподілу та приватизації житлового фонду [3]. До неінституційних учасників належать будівельні компанії, девелопери, що частково виконують соціальну функцію, оскільки зобов'язані сплачувати кошти у вигляді пайових внесків на розвиток інженерної інфраструктури населеного пункту, а також шляхом надання частини квартир у новобудовах для задоволення соціальних потреб у житлі [4; 5].

Юридично-судова функція у сфері відносин з об'єктами житлової нерухомості забезпечує захист порушених прав, свобод чи інтересів фізичних, юридичних осіб або держави щодо житлової нерухомості, а також відповідність правовим нормам документів, позовів, рішень, ухвал тощо. До інституційних учасників, що виконують зазначену функцію, належать суди загальної юрисдикції та Конституційний Суд України, до неінституційних – приватні адвокати, адвокатські бюро, колегії, фірми, контори та інші адвокатські об'єднання.

Експлуатаційно-обслуговувальна функція полягає у здійсненні господарської діяльності, спрямованої на забезпечення умов проживання та перебування осіб у жилих і нежилых приміщеннях, будинках і спорудах відповідно до нормативів, норм, стандартів, порядків і правил. Учасниками діяльності є Міністерство житлово-комунального господарства, житлово-експлуатаційні контори, територіальні житлові ремонтно-експлуатаційні об'єднання, а також житлово-ремонтно-експлуатаційні об'єднання на комерційній основі.

У сучасних умовах інституційно організованими суб'єктами сфери споживання нерухомості стають кондомініуми, що виникають через потребу у вирішенні суперечностей спільно-роздільного користування нерухомістю. Кожен вид власності має неоднакові можливості в управлінні й користуванні, але при цьому суб'єкти зацікавлені в ефективному привласненні з метою якнайкращого задоволення своїх потреб у житлі. Для ефективного розв'язання суперечностей кондомініуми створюють управлінські організації – сервісні фірми, що стають інститутом, суб'єкти якого професійно виконують свої функції, що дає їм переваги перед житлово-експлуатаційними конторами [6].

У сфері створення й розвитку нерухомості функціонують такі інституційно організовані суб'єкти, як девелопери, що беруть участь у процесі розвитку нерухомості, налагоджують координацію між усіма учасниками процесу девелопменту (інвестиційно-будівельного циклу), беруть на себе ризики реалізації проекту, несуть відповідальність перед окремими учасниками [7]. У сфері ринкового обороту діють оцінювачі, аналітики, іпотечні кредитори, страхувальники, ріелтери.

На підставі аналізу розроблено класифікацію суб'єктів ринку житлової нерухомості за тими функціями, які вони виконують для функціонування ринку житлової нерухомості (таблиця).

Таблиця

## Класифікація суб'єктів ринку житлової нерухомості

№ п/п	Функція/ суб'єкти ринку	Інституційні (державні)	Неінституційні (недержавні)		
			Комунальні	Комерційні	
1	фінансова	інвестиційна	уряд, Нацбанк України, територіальні органи місцевого самоврядування, державні установи	комунальні підприємства	інвестори (юридичні, фізичні особи)
		оціночна	контролюється Наглядовою радою з питань оціночної діяльності Фонду державного майна України	комунальні підприємства	юридичні оціночні установи та фізичні особи
		фіскальна	уряд, територіальні органи податкової служби	-	юридичні, фізичні особи, що є власниками нерухомості
		кредитна	Державна іпотечна установа, Державний фонд сприяння молодіжному житловому будівництву	комунальні банки	банки, кредитні організації
		страхова	Державна комісія з регулювання ринків фінансових послуг України є держателем Єдиного державного реєстру страховиків (перестраховиків) України, державні страхові компанії	-	комерційні страхові компанії
2	містобудівельна та земле-впорядна	прогнозування розвитку і планування територій	Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України (Мінрегіон України), місцеві органи містобудування й архітектури	-	-
		архітектурно-будівельна	Державна архітектурно-будівельна інспекція України та її територіальні органи	комунальні підприємства	архітектурно-будівельні компанії, майстерні, студії дизайну та архітектури, будівельно-проектні організації, фірми-забудовники, інвестиційно-консалтингові фірми, інжинірингові організації, девелопери
		землевопорядна	територіальні органи Держземагенства	комунальні підприємства	будівельні та юридичні організації, девелопери та фізичні особи – СПД
		екологічна	Міністерство екології та природних ресурсів України; Міністерство охорони здоров'я України; державні підприємства	комунальні підприємства	-

№ п/п	Функція/ суб'єкти ринку	Інституційні (державні)	Неінституційні (недержавні)	
			Комунальні	Комерційні
3	правова	Міністерство юстиції України, державні нотаріальні контори	-	приватні нотаріальні контори
4	реєстраційна	територіальні органи Держгемагенства (для земельної ділянки) – державний кадастровий реєстратор, Міністерство юстиції України (Укрдержреєстр)	територіальні комунальні підприємства БТІ	-
5	обліково-інвентаризаційна	Міністерство регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України ( БТІ підпорядковується в частині технічної інвентаризації об'єктів )	територіальні комунальні підприємства БТІ	-
6	інформаційно-посередницька	-	-	агентства нерухомості, ріелторські фірми, аналітичні центри тощо
7	статистична	Державний комітет статистики України, міські та обласні управління статистики	комунальні підприємства	-
8	управлінсько-адміністративна	органи законодавчої та виконавчої влади, Державний комітет України з питань житлово-комунального господарства, Фонд державного майна України та ін. міністерства та відомства, міські та обласні органи виконавчої влади	-	-
9	юридично-судова	суди загальної юрисдикції та Конституційний Суд України	-	приватні адвокати, адвокатські бюро, колегії, фірми, контори та інші адвокатські об'єднання
10	соціальна	Державна іпотечна установа, відділи приватизації, структурні підрозділи виконавчих комітетів міських рад - відділи обліку, розподілу та приватизації житлового фонду	комунальні підприємства	будівельні компанії, девелопери тощо
11	експлуатаційно-обслуговувальна	Міністерство житлово-комунального господарства, житлово-експлуатаційні контори, територіальні житлові ремонтно-експлуатаційні об'єднання тощо	житлово-експлуатаційні контори	житлово-ремонтно-експлуатаційні об'єднання на комерційній основі, фізичні, юридичні особи, ОСББ, ЖБК

Об'єкти житла на ринку нерухомості характеризуються великою неоднорідністю та нерівнозначністю з погляду планувальних, правових й економічних характеристик. Відповідно до чинного законодавства об'єктом продажу на ринку житла може бути як частина квартири (приміщення), так і цілісний майновий комплекс.

У результаті дослідження чинного законодавства структуровано об'єкти житлової нерухомості, які за різних обставин можуть бути об'єктами ринку житлової нерухомості [2]. Усі об'єкти житла утворюють так званий житловий фонд [8]. Державна статистика визначає три види об'єктів житла: будинок, квартира, кімната. Кожен із зазначених об'єктів може бути самостійним об'єктом на ринку житлової нерухомості. Оскільки земельна ділянка з цільовим призначенням для будівництва й експлуатації житлового будинку опосередковано є базою для створення об'єкта житлової нерухомості, запропоновано вважати її базовою одиницею житлової нерухомості. Земельна ділянка може бути з поліпшеннями або без них [9]. Об'єкт житлової нерухомості може бути як об'єктом незавершеного будівництва [10], так і завершеного будівництва, тобто введеним в експлуатацію житловим об'єктом. До об'єктів житлової нерухомості належать житловий комплекс як єдиний комплекс нерухомого майна [11] та садиба [12].

До складу житлового комплексу, як і до складу садиби або котеджу, належить житловий будинок, різниця лише в поверховості, але як перший, так і останній також можуть бути об'єктами на ринку житлової нерухомості. Крім того, об'єкти

житлової нерухомості поділяють на такі типи: а) житлові будинки капітального типу, серед яких розрізняють житлові будинки садибного типу та житлові будинки квартирного типу різної поверховості; б) житловий будинок садибного типу; в) прибудова до житлового будинку; г) квартира; д) котедж; е) кімната у комунальній квартирі; ж) садовий будинок; з) дачний будинок [13]. На підставі аналізу розроблено структуру об'єктів ринку житлової нерухомості (рис. 2).

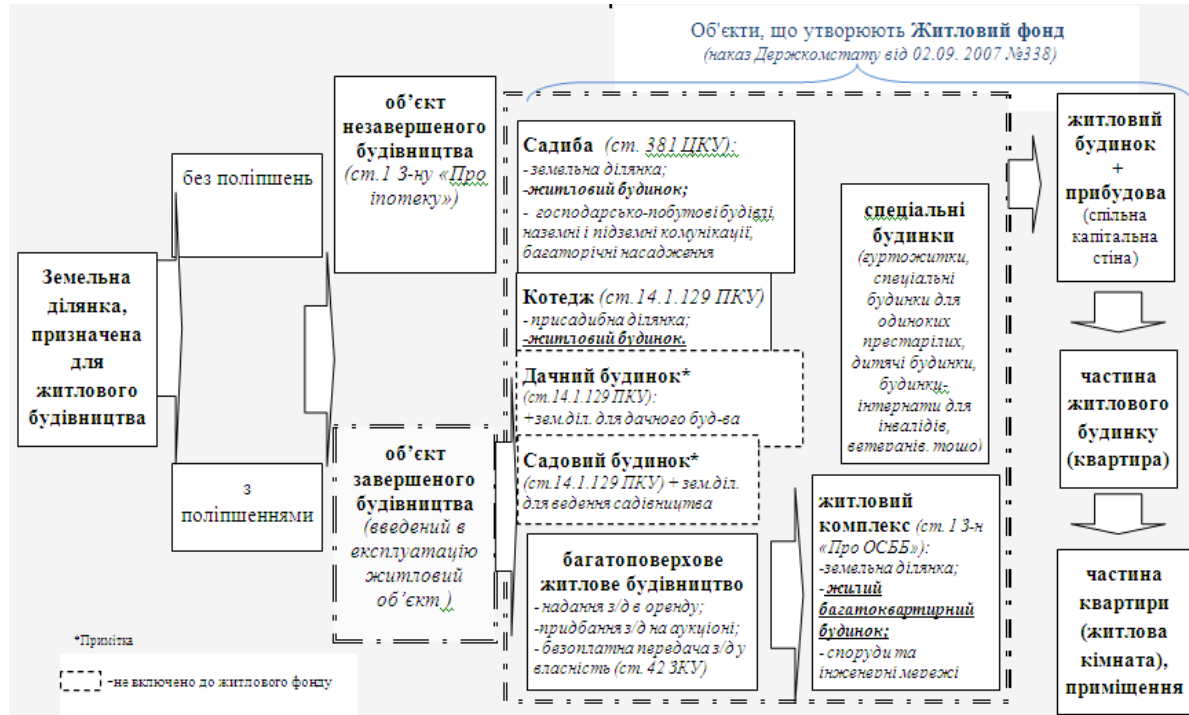


Рис. 2. Структура об'єктів ринку житлової нерухомості

Ринок є складним утворенням, що являє собою, з одного боку, сферу обміну, сукупність процесів купівлі-продажу, які здійснюють збалансування за рахунок цін, а з другого – забезпечує зв'язок між виробництвом і споживанням, безперервність процесу відтворень, його цілісність.

Для повноцінного, надійного функціонування ринку житлової нерухомості, обов'язковим є дотримання формальних і матеріальних гарантій власності й обігу, стабільності державної і місцевої політики щодо житлової, земельної та іншої нерухомості, формування ефективної системи просторового планування, ринкового обороту житлових об'єктів, тобто ринкові механізми не є самодостатніми і потребують організованого втручання як з боку учасників ринку житла, так і з боку держави.

На основі системного підходу організацію розглядають як систему в єдності частин, з яких вона складається, та зв'язків з її зовнішнім середовищем. Такий підхід дає змогу скласти цілісне уявлення про сутність управління. Об'єктом досліджень системного підходу є елементи внутрішнього та зовнішнього середовища організації. У пропонованому дослідженні до зовнішнього середовища віднесено фактори на державному та локальному рівнях, які мають суттєвий вплив як на розвиток ринку житла, так і на вирішення житлових проблем більшої частини населення. Усі чинники досліджено, узагальнено й об'єднано у дев'ять тематичних груп: політичні, нормативно-правові, економічні, адміністративні, соціально-демографічні, психологічні, екологічні, містобудівні та науково-технічні. До

внутрішнього середовища належать розглянуті вище суб'єкти ринку житла. Зовнішнє і внутрішнє середовище впливають на формування попиту та пропозиції, утворення ціни об'єкта житла, яка складається з собівартості будівництва, інвестиційного інтересу та земельної складової [2]. Зважаючи на це, запропоновано структурну модель функціонування ринку житлової нерухомості (рис.3).

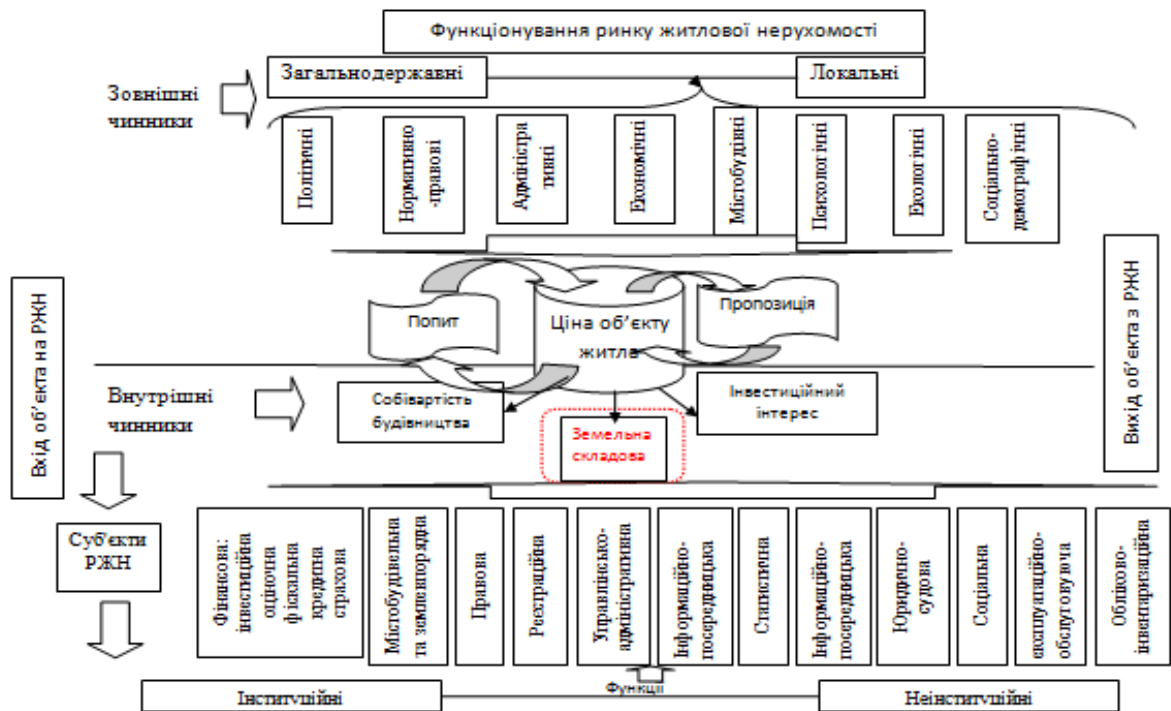


Рис. 3. Структурна модель функціонування системи ринку житлової нерухомості та його інфраструктури

Отже, ринок житлової нерухомості характеризує функціональне призначення нерухомості та охоплює об'єкти, суб'єкти, організаційну структуру, навколишнє середовище, джерела фінансування, які відображають ступінь соціально-економічного розвитку країни, її національні, географічні, кліматичні особливості, спосіб і якість життя населення.

**Висновки.** Діапазон правових характеристик на житлову нерухомість принципово відрізняється від інших сегментів ринку нерухомості і представлений державним, громадським, приватним фондами, а також житлово-будівельними кооперативами, фондом соціального призначення тощо. Специфічною особливістю об'єктів житлової нерухомості, яка виникла внаслідок приватизації, є той факт, що житловий будинок, квартири і допоміжні приміщення є власністю різних суб'єктів, що не відображено в правових категоріях. Водночас житлова нерухомість може бути об'єктом комерційного і некомерційного використання. Все це визначає і значно ускладнює структуру суб'єктів ринку. Виконане дослідження дає змогу запропонувати групування суб'єктів ринку житлової нерухомості за функціями, які вони виконують.

Зважаючи на те, що ринок житлової нерухомості як саморегульовальна в установленому правовому середовищі система складається з таких основних елементів, як попит, пропозиція, ціна, об'єкти та суб'єкти, зовнішнє та внутрішнє середовище, що забезпечує його функціонування, запропоновано структурну модель функціонування системи ринку житлової нерухомості та його інфраструктури.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ**

1. Закон України «Про нотаріат» – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.uazakon.com/documents/date\\_3q/pg\\_gmcoww/index.htm](http://www.uazakon.com/documents/date_3q/pg_gmcoww/index.htm). – Назва з екрана.
2. Дорошенко Ю.М. Закономірності формування та розвитку ринку житлової нерухомості в Україні: дис...канд.техн.наук: 05.24.04 / Дорошенко Юлія Миколаївна. – К., 2012. – 160 с.
3. Закон України «Про місцеве самоврядування в Україні» – Режим доступу: [http://uazakon.com/documents/date\\_31/pg\\_gmgssa/index.htm](http://uazakon.com/documents/date_31/pg_gmgssa/index.htm). – Назва з екрана.
4. Закон України «Про планування і забудову територій» – Режим доступу: [http://uazakon.com/documents/date\\_31/pg\\_gmgzxa/index.htm](http://uazakon.com/documents/date_31/pg_gmgzxa/index.htm). – Назва з екрана.
5. Закон України «Про регулювання містобудівної діяльності». – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/3038-17>. – Назва з екрана.
6. Єфіменко І.А. Інституціоналізація ринку нерухомості в трансформаційній економіці: дис..канд.екон.наук: 08.00.01/ Єфіменко Ірина Андріївна. – Харків, 2007. – 198с.
7. Reiser, Richard B., with Anne B. Frej. Professional Real Estate Development: The ULI Guide to the Business. Second Edition. Washington, D.C.: ULI – the Urban Land Institute, 2003.
8. Інструкція щодо заповнення форми державного статистичного спостереження №1-житлофонд (річна) «Житловий фонд»: наказ Держкомстату України – Режим доступу: [http://uazakon.com/documents/date\\_6k/pg\\_gvclsm.htm](http://uazakon.com/documents/date_6k/pg_gvclsm.htm). – Назва з екрана.
9. Петраковська О.С. Методологія управління системою землекористування великих міст: дис..д-ра техн. наук: 05.24.04// Петраковська Ольга Сергіївна. – К., 2007. – 270 с.
10. Закон України «Про іпотеку» – Режим доступу: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/898-15>. – Назва з екрана.
11. Закон України «Про оцінку майна, майнових прав та професійну оціночну діяльність в Україні» – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2658-14> - Назва з екрана.
12. Цивільний Кодекс України – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/435-iv>. – Назва з екрана.
13. Податковий кодекс України – Режим доступу: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2755-17>. – Назва з екрана.

**REFERENCES**

1. Zakon Ukrainy «Pro notariat» [The Low of Ukraine «On Notary»] (n.d.) [zakon.rada.gov.ua](http://zakon.rada.gov.ua). – Retrieved from:[http://www.uazakon.com/documents/date3q/pg\\_gmcoww/index.htm](http://www.uazakon.com/documents/date3q/pg_gmcoww/index.htm) [in Ukrainian].
2. Doroshenko J.M. (2012). Zakonomirnosti formuvannia ta rozvytku rynku zhytlovoi neruhomosti v Ukraini [Regularities of formation and development of residential real estate market in Ukraine]. *Candidate's thesis*. Sumy: SumSU [in Ukrainian].
3. Zakon Ukrainy «Pro mistseve samovriaduvannia v Ukraini» [The Low of Ukraine «On Local Self-Government in Ukraine»] (n.d.) [zakon.rada.gov.ua](http://zakon.rada.gov.ua). – Retrieved from: [http://uazakon.com/documents/date\\_31/pg\\_gmgssa/index.htm](http://uazakon.com/documents/date_31/pg_gmgssa/index.htm) [in Ukrainian].



4. Zakon Ukrainy «Pro planuvannia I zabudovu terytorii» [The Law of Ukraine «On Planning and Development of Territories»] (n.d.) *zakon.rada.gov.ua*. – Retrieved from: [http://uazakon.com/documents/date\\_31/pg\\_gmgzxa/index.htm](http://uazakon.com/documents/date_31/pg_gmgzxa/index.htm) [in Ukrainian].
5. Zakon Ukrainy «Pro reguliuvannia mistobudivnoi diialnosti» [The Law of Ukraine «On Regulation of City Planning Activity»] (n.d.) *zakon.rada.gov.ua*. – Retrieved from: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/3038-17> [in Ukrainian].
6. Yefimenko I.A. (2007) Instytutsionalizatsiia rynku neruhomosti v transformatsiinii ekonomitsi [Institutionalization of market of the real estate in the transformational economy]. *Candidate's thesis*. Sumy: SumSU [in Ukrainian].
7. Reiser Richard B. & Anne B. Frej. (2003) *Professional Real Estate Development: The ULI Guide to the Business*. Second Edition. Washington, D.C.: ULI – the Urban Land Institute [in English].
8. Instruksiiia shchodo zapovnennia formu derzhavnogo statystychnogo sposterezhennia №1-zhytlofond (richna) «Zhytlovyi fond» [Instructions for completing the form state's statistical observations №1-housing stock (annual) «Housing Fund»] (n.d.) State Statistics Service of Ukraine. – Retrieved from: [http://uazakon.com/documents/date\\_6k/pg\\_gvclsm.htm](http://uazakon.com/documents/date_6k/pg_gvclsm.htm) [in Ukrainian].
9. Petrakovska O.S. (2007) Metodologiiia upravlinnia systemou zemlekorystuvannia velykykh mist [The methodology of management of land use system at urban territory] *Doctor's thesis*. Sumy: SumSU [in Ukrainian].
10. Zakon Ukrainy «Pro ipoteku» [The Law of Ukraine «On Mortgage»] (n.d.) *zakon.rada.gov.ua*. – Retrieved from: <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/898-15> [in Ukrainian].
11. Zakon Ukrainy «Pro otsinku maina, mainovykh prav ta profesiinu otsinochnu diialnist v Ukraini» [The Law of Ukraine «On Appraisal of Property, Property Rights and Professional Appraisal Activity in Ukraine»] (n.d.) *zakon.rada.gov.ua*. – Retrieved from: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2658-14> [in Ukrainian].
12. Tsyvilniy kodeks Ukrainy [The Civil Code of Ukraine] (n.d.) *zakon.rada.gov.ua*. – Retrieved from: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/435-iv> [in Ukrainian].
13. Podatkovyiy kodeks Ukrainy [Tax Code of Ukraine] (n.d.) *zakon.rada.gov.ua*. – Retrieved from: <http://zakon4.rada.gov.ua/laws/show/2755-17> [in Ukrainian].

**Ю.Н. Чобану**

### **СТРУКТУРНАЯ МОДЕЛЬ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ РЫНКА ЖИЛОЙ НЕДВИЖИМОСТИ**

*На основании комплексного подхода к формированию рынка жилой недвижимости рассмотрено экономическую, правовую, административную, градостроительную, земельную, инженерную, социальную составляющие его инфраструктуры как взаимосвязанные и взаимодополняющие элементы единой, целостной системы институтов рынка жилой недвижимости. Согласно действующему законодательству структурированы объекты жилой недвижимости, которые могут выступать в разных обстоятельствах объектами*

*рынка жилой недвижимости. Предложено структурную модель функционирования рынка жилой недвижимости.*

**Ключевые слова:** *структурная модель, объекты и субъекты рынка жилой недвижимости, инфраструктура рынка жилой недвижимости.*

**Yu. Ciobanu**

## **THE STRUCTURAL MODEL OF FUNCTIONING OF THE RESIDENTIAL REAL ESTATE MARKET**

*On the basis of a comprehensive approach to the formation of the real estate market is reviewed the economic, legal, administrative, urban planning, land, engineering, social components of its infrastructure, as interrelated and complementary elements of a single, integrated system of institution's residential real estate market. Under current law is structured objects of residential real estate, which can act in different circumstances, objects residential real estate market.*

*It was determined that the subjects of the real estate market represented a large number of institutional and non-institutional parties that agreed accordantly to their basic functions are combined in the following 11 groups.*

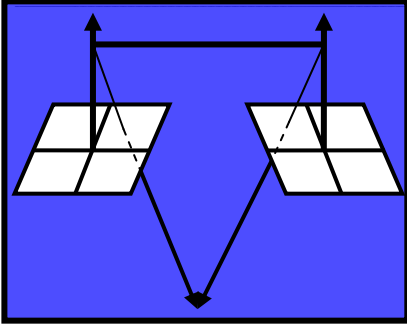
*Is reviewed the residential real estate market as a self-regulating in the established system of legal environment, which consists of the following elements: demand, supply, price, object and subject, external and internal environment that ensures its functioning. Proposed the structural model functioning of the residential real estate market.*

*It is established, what functions can be inherent residential real estate as a social category and as an object of the market, as a result is developed the functional model of the impact of property on the life of man.*

**Key words:** *a structural model, objects and subjects of the real estate market, infrastructure of the real estate market.*

Надійшла до редакції

08.06.2015



## **ФОТОГРАММЕТРІЯ ТА ДИСТАНЦІЙНЕ ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ**

УДК 528.067.4

**О.Є. Куліковська**, *д-р техн. наук, професор,*  
**Ю.Ю. Атаманенко**, *асп. кафедри геодезії,*  
*Криворізький національний університет*

### **ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМ ОБРОБКИ ДАНИХ ЛАЗЕРНОГО СКАНУВАННЯ В КАРТОГРАФУВАННІ ДТП**

*У статті розглянуто актуальні програмні комплекси лазерного сканування, які здатні задовольнити специфічні потреби геодезиста чи інженера у картографуванні дорожньо-транспортних пригод, оскільки стандартне програмне забезпечення, яке доставляється зі сканером, потрібне переважно для управління процесом сканування і виконання стандартних операцій з обробки даних. Наведено висновок про правомірність використання програм, запропоновано сфери їх застосування. Результати аналізу дадуть змогу вибрати належну програму, яка стане стандартом у розв'язанні завдань із задач картографування та аналізу дорожньо-транспортних пригод, буде вирізнятися високою швидкістю і точністю в процесі візуалізації, управління, вимірювання та моделювання тривимірних об'єктів.*

**Ключові слова:** *лазерне сканування, картографування дорожньо-транспортних пригод, програмне забезпечення, Cyclone, Trimble RealWorks Survey, ScanIMAGER, LFM.*

**Вступ.** Із лазерним скануванням не може зрівнятися жоден з раніше реалізованих методів знімання території. Він вирізняється неймовірною швидкістю роботи, більш високою точністю вимірювання та безпечністю під час зйомки важкодоступних і небезпечних об'єктів. Ще однією перевагою цього методу є те, що дистанційне знімання дає змогу збирати інформацію про досліджуваний об'єкт, отримуючи при цьому дані у вигляді координат точок поверхні, що значно розширює можливості подальшої комп'ютерної обробки результатів. Для опрацювання результатів наземного лазерного сканування застосовують велику кількість програмних комплексів, які потрібно дослідити і проаналізувати їх ефективність.

Слід зазначити, що пошкодження автомобілів та ситуація на місці пригоди швидко фіксується у цифровому вигляді, а обробка й оформлення відбуваються в умовах офісу. Результати створеної моделі передаються в програми САПР через формати dxf, dwg, txt та власний формат coe (Cloudworx Object Exchange). В

подальшому дані не можуть бути відредаговані або змінені. Після збору і обробки даних отримують закінчену тривимірну картину з місця пригоди, місцевості ДТП.

**Аналіз досліджень та публікацій.** За даними досліджень програмного забезпечення для обробки даних сканування виявлено, що найкраще підходить програмний комплекс RapidForm [1]. Автори вказують про те, що критерії програм можуть змінитись, якщо змінити мету використання програмного продукту. У публікації [1] розглянуто основні програмні продукти для оброблення даних сканування і складання 3D-моделей. Результати наведено в таблиці – рейтингу «Базове програмне забезпечення для обробки даних наземного сканування», яка була складена за найбільш важливими показниками. Здобутки науково-технічного прогресу – нові програмні комплекси – варто дослідити та проаналізувати їх ефективність.

**Постановка завдання.** Обґрунтувати перспективи використання програмного забезпечення, яке дасть змогу працювати з хмарами точок, отриманих із різних лазерних 3D-сканів, з максимальною швидкістю і точністю побудови тривимірної моделі об'єктів під час фіксації дорожньо-транспортних пригод.

**Основна частина.** Для дослідження вибрано декілька нині актуальних програмних комплексів: Cyclone, Trimble RealWorks Survey, ScanIMAGER, LFM.

Trimble RealWorks Survey – програмне забезпечення для візуалізації та обробки даних наземного лазерного сканування. Програма дає інженерам і геодезістам універсальний набір засобів і можливостей для роботи з тривимірними просторовими даними [2].

До основних характеристик програми належать: зіставлення фактичних даних з проектними; складання профілів і розрізів; вписування дво- і тривимірних примітивів у хмари точок; простота і швидкість розрахунків для підвищення продуктивності будівельних та гірничих робіт; зшивання сканів за характерними точками хмар, по марках з використанням геоприв'язки; перевірка і контроль якості в польових умовах.

Програмне забезпечення Trimble RealWorks Survey доступне у двох користувацьких версіях:

1) версія Standard дає користувачу можливість візуалізації, друку і часткового редагування дво- і тривимірних даних, складання звітної документації;

2) версія Advanced – користувач отримує доступ до всіх інструментів і функцій RealWorks Survey.

З одного боку, програма RealWorks Survey дає змогу оперувати великими обсягами даних, з другого боку – дає користувачеві простий та інтуїтивно зрозумілий покроковий механізм роботи для кожного інструмента. Результат роботи програми – повноцінна дво- і тривимірна звітна документація про фіксування дороги (рис. 1) [3], яку можна вивести на друк або експортувати в програмні пакети САПР, наприклад AutoCAD і MicroStation [4].

Cyclone – найбільш універсальна програма для обробки хмар точок й управління сканером [5]. Cyclone складається з окремих модулів, вбудованих в єдину програмну оболонку. Різні модулі призначені для вирішення окремих завдань загального

процесу обробки даних тривимірного лазерного сканування, які можуть бути використані у фіксуванні дорожньо-транспортних пригод.

Cyclone-Scan – це модуль для управління роботою сканера. Користувач може налаштовувати щільність сканування, фільтрацію даних, створювати власні макрокоманди. Cyclone-Register притаманні всі функції



Рис. 1. Тривимірна модель дороги

для швидкого і точного зрівнювання хмар точок, отриманих з різних пунктів знімання. Модуль автоматично розпізнає стандартні візирні марки, пов'язує скани з характерними сполучними точками без візирних марок. Cyclone-Model – найпотужніша в галузі обробки тривимірних лазерних вимірювань, найбільш повна автоматизована програма, що складається із засобів вимірювання, моделювання геометричних об'єктів для інженерних вишукувань, у геодезії, будівництві, а також для картографування ДТП. Модуль дає можливість обробляти хмари точок, перетворюючи їх на об'єкти для експорту та імпорту в програми САПР [6]. Cyclone-Survey – спрощена система обробки хмар точок, призначена для топографічних завдань. Cyclone-Cloud Work – програма, що дає величезні переваги під час обробки 3D-хмар точок у поширеному середовищі САПР.

Програмний продукт ScanIMAGER, розроблений НВП «Фотограмметрія» [7], орієнтований насамперед на завдання, пов'язані з виконанням архітектурних обмірів та мостів. Програмний комплекс реалізується за допомогою різних рівнів: Viewer, Lite, Standard, Standard Plus, Professional. Рівень ScanIMAGER Standard є самостійним програмним продуктом базової комплектації, який містить модуль Converter. Ця версія комплектується модулем Ortho, який має весь інструмент, необхідний для обробки ортофотопланів. Рівень ScanIMAGER Standard Plus – самостійний програмний продукт, що має весь функціонал рівня ScanIMAGER Standard, крім того, до модулів Converter і Ortho додається модуль Register, який дає змогу автоматизувати процес реєстрації сканів. Рівень ScanIMAGER Professional є складовою частиною технології, що дає можливість поєднувати методи тривимірного лазерного сканування і цифрової фотограмметричної зйомки. За допомогою цієї технології можна отримувати кольорові ортофотоплани найвищої дозвільної здатності, практично до масштабів 1:1, а також розфарбовувати хмари точок за набором цифрових фотознімків. Рівень ScanIMAGER Lite не є самостійним продуктом, який поставляють замовнику разом із даними тривимірного лазерного сканування. Програмний продукт містить потрібний функціонал для обробки даних сканування й отримання обмірної документації. Рівень ScanIMAGER Viewer також не є самостійним програмним продуктом, він поширюється вільно, призначений для демонстрації результатів тривимірного лазерного сканування. Функції рівнів наведено в таблиці [8].

## Функції рівнів програмного комплексу ScanIMAGER

Функції	Viewer	Lite	Standard	Standard Plus	Professional
Візуалізація точок тривимірного сканування	+	+	+	+	+
Отримання розмірів, перерізів, розрізів	+	+	+	+	+
Регістрація за загальними точками, довільний поворот сканів	-	+	+	+	+
Створення ортофотопланів, фільтрація, корекція	-	+	+	+	+
Псевдорозфарбовування ортофотопланів	-	+	+	+	+
Експорт даних в обмінні формати	-	+	+	+	+
Конвертація каталогу точок у внутрішній формат (SPF)	-	-	+	+	+
Побудова розгортки криволінійних об'єктів	-	-	+	+	+
Обчислення площ	-	-	+	+	+
Обчислення обсягів	-	-	+	+	+
Сегментація ортофотопланів	-	-	+	+	+
Авторегістрація	-	-	-	+	+
Розфарбовування хмар точок та ортофотопланів за набором знімків	-	-	-	-	+

Програмне забезпечення LFM складається із таких частин:

1) LFM Register – унікальний і дуже потужний програмний пакет, за допомогою якого скани з різних точок стояння швидко й ефективно зшиваються в єдину систему координат [9];

2) LFM Server – найбільш досконала сучасна система для сумісного доступу і роботи з раніше зареєстрованими даними лазерного сканування.

Використовуючи технологію InfiniteCore, можна зберігати необмежену кількість сканів, переглядати звіти за допомогою спеціального відображення LFM Register, експортувати дані в САПР Autodesk, AVEVA, Bentley.

LFM Modeller дає змогу складати 3D-моделі відзнятих об'єктів із досконалим співвідношенням швидкість/якість. До основних можливостей належать такі: інтуїтивно зрозумілий інтерфейс; швидке складання САПР-моделі фактичного стану об'єкта; розширені функції обробки і редагування елементів; потужний математичний апарат моделювання; функції попереднього обчислення елементів; весь функціонал

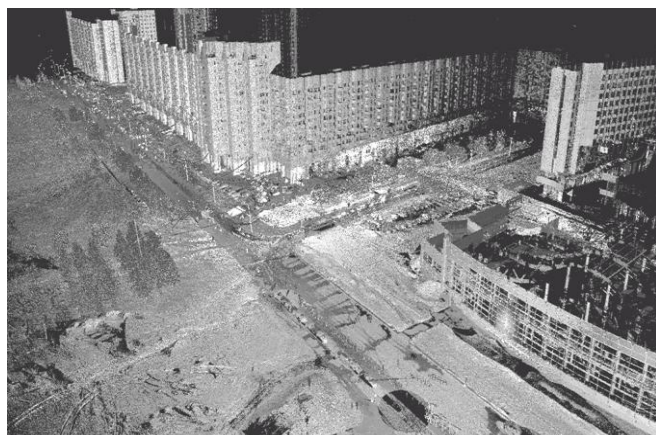


Рис. 2. Результат лазерного сканування

програмного забезпечення LFM Register, конструкцій, вимірювання ліній і діаметрів; швидке складання і експорт фактичних або проектних ключових точок; інтелектуальний експорт моделей і CADWORX; вибір моделі.

LFM View дає кінцевому користувачеві змогу отримувати безплатний доступ до великої бази даних, які мають необмежену кількість сканів.

Приклад результату лазерного сканування дороги, в зону якої потрапляє і ситуаційне середовище, показано на рис. 2 [10].

**Висновки.** Програмне забезпечення відіграє важливу роль у швидкій і ефективній обробці «хмар точок», отриманих у результаті зйомок високої дозвільної здатності.

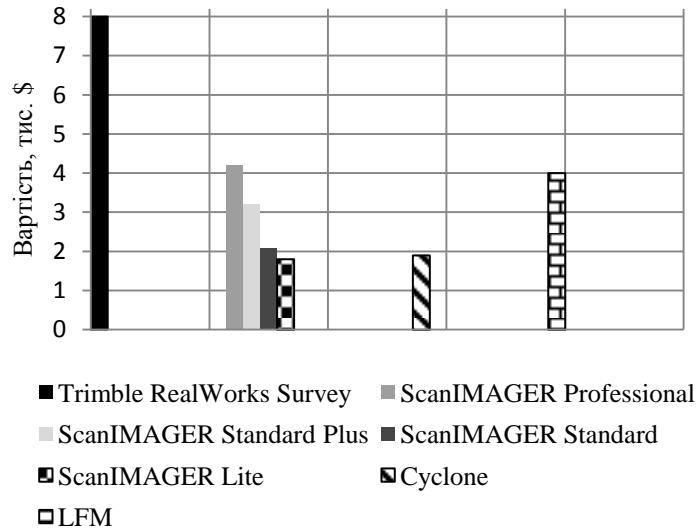


Рис. 3. Вартість програмного забезпечення

Проаналізувавши програмні комплекси, можна зауважити, що ScanIMAGER орієнтований більше на пам'ятки архітектури; LFM дає змогу створювати цифрову модель, структурні елементи механізмів; за допомогою Cyclone можна будувати як площини, так і поверхні. Можна запропонувати використання програмного забезпечення Trimble RealWorks Survey у розслідуванні кримінальних й адміністративних правопорушень, фіксуванні дорожньо-транспортних пригод, оскільки програма проста у використанні, відповідає необхідній точності та усім вимогам до картографування аварій. Водночас, зважаючи на досить високу кошторисну вартість розглянутих комп'ютерних комплексів (рис. 3), можна дійти висновку про те, що з огляду на несприятливі економічні обставини в країні використання таких програм органами державної автомобільної інспекції не є рентабельним. У нинішній ситуації рекомендується застосування програмного пакета Cyclone як оптимального варіанта.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Програмное обеспечение, используемое для обработки данных сканирования НПП «Фотограмметрия» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.photogrammetria.ru](http://www.photogrammetria.ru). – Название с экрана.
2. ГеоКонтинент – Trimble RealWorks Survey [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.geokontinent.ru](http://www.geokontinent.ru). – Название с экрана.
3. Хмара точок [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://ciber-sof.ru>. – Название с экрана.
4. Компания «КМС»4 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.kmcgeo.com>. – Название с экрана.

5. Середович В. А. Наземное лазерное сканирование: [монография] / В. А. Середович, А. В. Комиссаров, Д. В. Комиссаров, Т. А. Широкова // Новосибирск: СГГА, 2009. – С. 89 – 100.

6. ГИС Ассоциация [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gisa.ru>. – Название с экрана.

7. Фотограмметрия. Научно-производительное предприятие [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [www.scanimager.ru](http://www.scanimager.ru). – Название с экрана.

8. Функції рівнів програмного комплексу ScanIMAGER [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ciber-sof.ru> - Назва з екрану.

9. УкрГеоПроект. Геодезичні прилади та інструменти [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://ukrgeo.com.ua>. – Названіє з екрану.

10. Лазерне сканування автодоріг у Санк-Петербурзі [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://scbist.com>. – Названіє з екрану.

## REFERENCES

1. Programmное obespechenie, ispolzuemoe dlya obrabotki dannyh skanirovaniya NPP «Fotogrammetriya». [Software used for processing the scan data SPE «Photogrammetry»]. [www.photogrammetria.ru](http://www.photogrammetria.ru). Retrieved from [www.photogrammetria.ru](http://www.photogrammetria.ru) [in Russian].

2. GeoKontinent – Trimble RealWorks Survey [Geocontent - Trimble RealWorks Survey]. [www.geokontinent.ru](http://www.geokontinent.ru). Retrieved from [www.geokontinent.ru](http://www.geokontinent.ru) [in Russian].

3. Hmara tochok [The point cloud] <http://ciber-sof.ru> Retrieved from <http://ciber-sof.ru> [in Russian].

4. Kompaniya «KMS»4 [The company «CCM»4] <http://www.kmcgeo.com>. Retrieved from <http://www.kmcgeo.com> [in Ukrainian].

5. Seredovich V. A., Komissarov A. V., Komissarov V. D., & Shirokova T. A. (2009). Nazemnoe lazernoe skanirovanie: [monografiya] [Ground-based laser scanning: monograph]. Novosibirsk: SGGGA [in Russian].

6. GIS Assotsiatsiya [GIS Association]. <http://gisa.ru> Retrieved from <http://gisa.ru/9698.html> [in Russian].

7. Fotogrammetriya. Nauchno-proizvoditelnoe predpriyatie [Photogrammetry. Scientific-production enterprise] [www.scanimager.ru](http://www.scanimager.ru). Retrieved from [www.scanimager.ru](http://www.scanimager.ru) [in Russian].

8. Funktsiyi rivniv programnogo kompleksu ScanIMAGER [Functions of the software complex ScanIMAGER] <http://ciber-sof.ru> Retrieved from <http://ciber-sof.ru> [in Russian].

9. UkrGeoProekt. Geodezichni priladi ta instrumenti [Ukrheoproekt. Surveying instruments and tools] <http://ukrgeo.com.ua>. Retrieved from <http://ukrgeo.com.ua> [in Ukrainian].

10. Lazerne skanuvannya avtodorog u Sank-Peterburzi [Laser scanning of roads in St. Petersburg] <http://scbist.com> Retrieved from <http://scbist.com> [in Russian].



## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ЛАЗЕРНОГО СКАНИРОВАНИЯ В КАРТОГРАФИРОВАНИИ ДТП

*В статье рассмотрены актуальные программные комплексы лазерного сканирования, способные удовлетворить специфические потребности геодезиста или инженера в картографировании дорожно-транспортных происшествий, так как стандартное программное обеспечение, доставляемое со сканером, в основном, необходимо для управления процессом сканирования и выполнения стандартных операций по обработке данных. Сделан вывод о правомерности использования программ, предложены сферы их применения. Результаты анализа дадут возможность выбрать соответствующую программу, которая станет стандартом решения задач картографирования и анализа дорожно-транспортных происшествий, будет отличаться высокой скоростью и точностью при визуализации, управлении, измерении и моделировании трёхмерных объектов.*

**Ключевые слова:** *лазерное сканирование, картографирование дорожно-транспортных происшествий, программное обеспечение, Cyclone, Trimble RealWorks Survey, ScanIMAGER, LFM.*

## PERSPECTIVES OF DATA PROCESSING PROGRAMS OF LASER SCANNING IN MAPPING OF ROAD TRAFFIC ACCIDENTS

*Software systems of laser scanning that are relevant for now and can meet the specific needs of the surveyor or engineer in the mapping of traffic accidents are considered in the article, as standard software delivered with the scanner is mainly required for controlling the process of scanning and regular performance of data processing. The features, capabilities, functions and levels of software for Cyclone, Trimble RealWorks Survey, ScanIMAGER, LFM, which can be used for processing of terrestrial laser scanning data were considered. We described each of the levels and presented the results of three-dimensional objects modeling. It was determined that almost all tested programs include a set of tools targeted to meet the challenges of industrial, civil engineering, topography, geodesy, restoration of criminal investigations and other geospatial problems. The conclusion about the legality of the software products use was made, its scope is offered. The analysis of capabilities allow you to select the appropriate program, which will become the standard problem solving of mapping and analysis of accidents will be different speed and accuracy in imaging, management, measurement and modeling of three-dimensional objects.*

**Keywords:** *laser scanning, mapping of road traffic accidents, software, Cyclone, Trimble RealWorks Survey, ScanIMAGER, LFM.*

**А. Л. Дорожинский**, д-р техн. наук, профессор,  
зав. кафедрой фотограмметрии и геоинформатики,  
**Р. А. Абдаллах**, асп. кафедры фотограмметрии и геоинформатики,  
Национальный университет «Львовская политехника»

## МЕТОДИКА АВТОМАТИЧЕСКОГО ВЫДЕЛЕНИЯ ДОРОГ НА СПУТНИКОВЫХ СНИМКАХ

*Выделение дорог на спутниковых снимках является одним из этапов обновления топографической карты по данным такого снимка. В статье приведена схема автоматического обновления карты, сформулирована задача локализации элементов дорожной сети на спутниковом снимке, выполнен анализ исследований в данной области. Описывается модифицированный алгоритм выделения элементов дорожной сети, предложенный автором. Приведены результаты экспериментов, которые показали, что выделяется до 76% дорожной сети.*

**Ключевые слова:** обновление топографических карт, спутниковый снимок, автоматические выделения дорожной сети, сканирующий алгоритм, сегментация спутникового снимка.

**Введение.** Выделение дорожной сети на спутниковых снимках является важнейшим этапом обновления топографических карт. Даже частичная автоматизация выполнения данного этапа позволила бы ускорить процесс обновления и снизить его стоимость. Задача обновления топографических карт актуальна для многих местностей в связи с постоянным изменением инфраструктуры территорий. В настоящее время в связи с оцифровкой имеющихся топографических карт и появлением спутниковых снимков, отражающих текущее состояние местностей, возникает необходимость в решении задачи автоматического обновления топографических карт по данным спутниковых снимков. Автоматическое выделение дорожных сетей на аэрокосмических снимках является одним из этапов решения этой задачи.

**Анализ исследований и публикаций.** Выделение дорожной сети на растровых спутниковых снимках является предметом исследований ряда ученых в различных странах мира и описано в соответствующих источниках.

Так, в работе А. Гроте [1] используются аэрофотоснимки окрестностей города Грейнджмут (Шотландия) и Vaihingen (Германия). Для сегментации изображений автор представляет изображение в виде графа и использует метод нормализованных разрезов. Дорожные фрагменты извлекаются из сегментированных изображений и объединяются для формирования дорожной сети P.N. Anil и другие авторы [2] предложили статистическое слияние областей для сегментации изображений. Дорожная сеть извлекается в виде скелета методом обрезки на основе контура. В работе [3] предлагается методика извлечения дорог на основе алгоритма динамического программирования в пространстве объектов вместо пространства изображения. Кроме того, различные методы обсуждаются в работах [4; 5; 6]. Все подходы характеризуются одной общей особенностью – полуавтоматической сегментацией изображений. Это означает, что оператор выбирает начальные точки

для извлечения дорог. Ни в одной работе не описан подход, позволяющий выделить дорожную сеть абсолютно правильно. Например, в работе [4] в лучшем случае выделяется 73% дорог. Подход, описанный в работе [6], позволяет выделить почти 58% дорог.

В работе [7] предложен и обоснован автоматический метод извлечения дорожной сети на аэрокосмических снимках. Проблема извлечения дорог решается после бинаризации изображения, при этом используются два подхода – отслеживание и сканирование. Отслеживающие алгоритмы [11] предполагают, что обнаруживается одна точка объекта, после чего определяется контур. Преимуществом этих алгоритмов является их простота, недостатками – медленная реализация последовательного выполнения и некоторая сложность поиска и обработки внутреннего контура.

Алгоритмы сканирования [10; 12] основаны на сканировании изображений в целом и извлечении граничных точек без отслеживания контуров. Бинаризацию космического снимка выполняют путем его сегментации, в результате которой все пиксели делятся на два сегмента: «дорога» и «не дорога». Основными проблемами в решении этой задачи является недостаточная точность, которая проявляется как в избыточном выделении элементов, не принадлежащих дорожной сети, так и в «пропуске» элементов, которые должны быть выделены. Методы, применяемые для сегментации произвольных изображений, описаны в литературе [8], наиболее популярны среди них методы выделения контуров и построения кластеров [8]. Однако, как показано в научной работе [7], применительно к космическим снимкам описанные методы обладают недостаточной точностью.

**Постановка задачи.** Целью статьи является описание предложенного авторами модифицированного метода выделения элементов дорожной сети и анализ полученных результатов с точки зрения их достоверности.

**Основная часть.** Обновление топографической карты по данным спутниковых снимков выполняется следующим образом. Имеются растровая карта и растровый снимок, полученный позже, чем формировалась карта, и известны процедуры, позволяющие выделить для карты и снимка множество их элементов. Задача обновления карты по снимку может быть решена путем нахождения двух наборов элементов. Первый набор - это элементы, которые есть на снимке, но которых нет на карте (то есть более новые объекты, которые появились на местности после создания карты); эти элементы должны быть нанесены на карту. Второй набор - элементы, которые есть на карте, но отсутствуют на снимке (то есть объекты, которые исчезли после создания карты); эти элементы должны быть удалены с карты [8].

Таким образом, процесс автоматического обновления карты по спутниковому снимку может быть описан в виде схемы, представленной на рис. 1 [13].

При выделении элементов дорожной сети на топографической карте ключевым элементом идентификации является цвет [13]. В случае космического снимка, как показано в работе [1], цвет в таком качестве использовать нельзя. В этой работе идентифицирующим параметром в выделении городских и загородных дорог является яркость точек.

Целевым слоем выделения являются элементы дорожной сети, обладающие следующими свойствами [7]: значительная протяженность на прямолинейном

участке; одинаковая ширина участка; равномерное распределение яркости в пределах объекта; четкие контуры дорожного полотна.

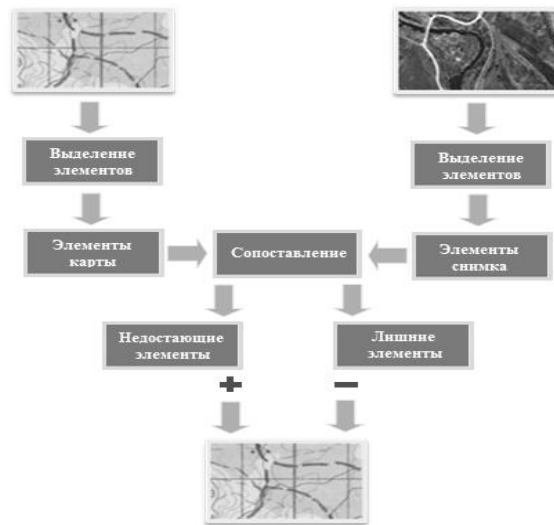


Рис. 1. Общая схема обновления карты по снимку

Процесс выделения элементов дорожной сети на аэрокосмическом снимке показан на рис.2.

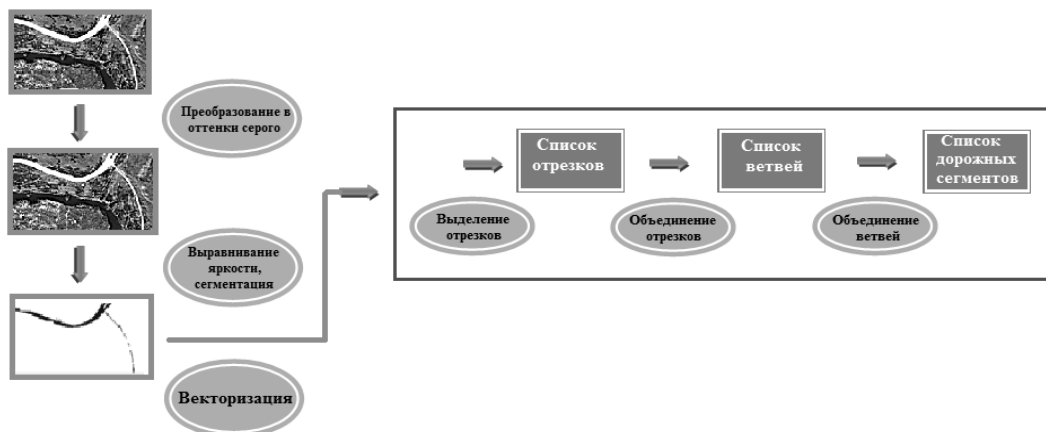


Рис.2. Этапы выделения дорожной сети на снимке

Для локализации объектов дорожной сети с учетом описанных свойств в качестве базового использован метод, предполагающий использование фильтра с конечной импульсной характеристикой (КИХ-фильтр) [7]. Модификации внесены на этапе нахождения значения яркости точек, принадлежащих окну фильтра. В алгоритме, выбранном в качестве базового, координаты точек фильтра в узлах дискретной сетки исходного космического изображения рассчитываются путем объединения уравнения прямой, которую образует окно фильтра в выбранной системе координат, и уравнения окружности, описываемой окном фильтра при вращении относительно исследуемой точки. Однако показано [9], что описываемый подход обладает недостаточной точностью при разложении в растр. Для повышения точности авторами использован растровый алгоритм Брезенхема [9] для получения точек окрестности заданного радиуса и для генерации точек окна фильтра.

Таким образом, процесс выделения целевого слоя (элементов дорожной сети) состоит из следующих этапов:

1. Чтение снимка. Исходными данными для этого шага является растровый файл со снимком, результатом выполнения – битовая карта изображения (24 бита на пиксель).

2. Преобразование снимка в оттенки серого по формуле [8]:

$$Y=0.299R+0.587G+0.114B,$$

где R,G,B – цветовые составляющие точки исходного изображения, Y – яркостная составляющая.

3. Выделение линейных фрагментов с равномерной яркостью и четким контуром, у которых длина значительно больше ширины (волновая сегментация). В результате выполнения этого этапа формируется матрица бинарного представления, размер матрицы равен размеру исходного снимка, каждый элемент хранит значение «1» для точек, принадлежащих линейным фрагментам, и «0» – для остальных.

4. Векторизация полученного представления для описания геометрических параметров элементов дорожной сети.

Рассмотрим более подробно этап волновой сегментации. Первым шагом является выделение точек в R-окрестности текущей точки. Авторы работы [7] используют для определения координат точек такой окрестности уравнение окружности  $x^2+y^2=R^2$ . Авторами же настоящей работы предлагается генерировать точки окрестности с помощью растрового алгоритма Брезенхема, так как использование уравнения окружности в растровом представлении не дает равномерного распределения точек и, следовательно, снижает точность результатов [9].

Вторым шагом рассматриваемого этапа является определение координат точек линейного фильтра. В базовом алгоритме используется уравнение прямой в виде  $y = kx + b$ . Авторы и на этом этапе применяют для генерации точек отрезка прямой растровый алгоритм Брезенхема: как и в случае генерации точек окружности, он обладает лучшими характеристиками с точки зрения быстродействия и точности.

Третьим шагом является проверка принадлежности точек в окне фильтра объекту, обладающему свойствами элемента дорожной сети, перечисленными выше. Для этого вычисляется среднеквадратичное отклонение яркости точек в окне фильтра.

Четвертый шаг - анализ среднеквадратичного отклонения и принятие решения о принадлежности точки элементу дорожной сети [7].

Для экспериментов использовался фрагмент космического снимка окрестностей г.Сулеймания, показанный на рис.3. Космический снимок, полученный съёмочной системой спутника GeoEye-1 в 2013 г., имеет пространственное разрешение 2,8 м, радиометрическое разрешение – 11 бит, уменьшенное до 8 бит.



Рис. 3. Фрагмент космического снимка окрестностей г. Сулеймания (Ирак)

Размер фрагмента космического снимка – 2500\*1500 пикселей. На территории, представленной на снимке, расположены река, элементы малоэтажной застройки, дорожная сеть, состоящая из городских и загородных дорог.

На рис. 4, *а* – приведен фрагмент, для которого анализировалась эффективность описываемого подхода (данный фрагмент выделен на рис.3 прямоугольной рамкой 1), на рис. 4, *б* – результат сегментации этого изображения с использованием метода, разработанного авторами.



Рис. 4. Результаты сегментации фрагмента спутникового снимка

Исходный фрагмент снимка содержит два слоя, которые могут быть описаны как линейные протяженные объекты: фрагменты дорожной сети (светлый объект) и река (темный объект). Река, запечатленная на снимке, тоже выделяется как дорога. Данная ситуация вполне естественна, так как с точки зрения геометрических и яркостных характеристик изображения реки и дороги на снимке практически не отличаются. Река, как и дорога, - линейный протяженный объект, у которого длина значительно больше ширины, а яркость точек – равномерна. Чтобы различить их, нужны либо дополнительные сведения о местности, либо корректировка результатов выделения вручную.

На рис. 5, *а*, *б*, показаны результаты сегментации другого фрагмента снимка (выделен на рис. 3 прямоугольной рамкой 2), на котором также представлены река и фрагмент дорожной сети. В этом случае в силу некоторых причин (значительная ширина реки по сравнению с шириной дорожного полотна) путем фильтрации выделяется не все русло реки, а только его границы. Для устранения этого недостатка также может быть привлечен эксперт.

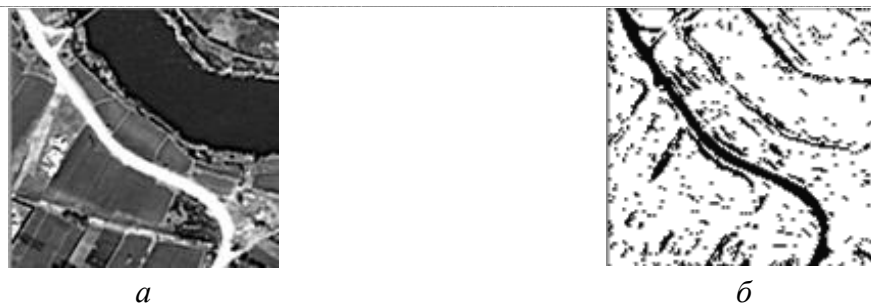


Рис. 5. Результаты сегментации фрагмента спутникового снимка

Если рассматривать сегментацию снимка в целом, то следует отметить, что на нем представлены различные типы местности, для каждого типа стоит выполнять сегментацию с разными значениями параметров. Так, путем подбора параметров сегментации получены приемлемые результаты, показанные на рис.6. Анализ результатов свидетельствует о том, что приемлемые результаты получаются для тех районов, где все дороги имеют примерно равную ширину и придорожная территория однородна. На рис. 7 приведены примеры ошибочной сегментации, обусловленной характером местности. Указаны значения параметров сегментации, для которых получены результаты:  $R$  – радиус сегментации в пикселях,  $K$  – минимальное соотношение яркостей между точками интереса и окрестностью. Выделение избыточных элементов и проблемы с выделением дорог небольшой ширины говорят о необходимости корректирования результатов оператором.

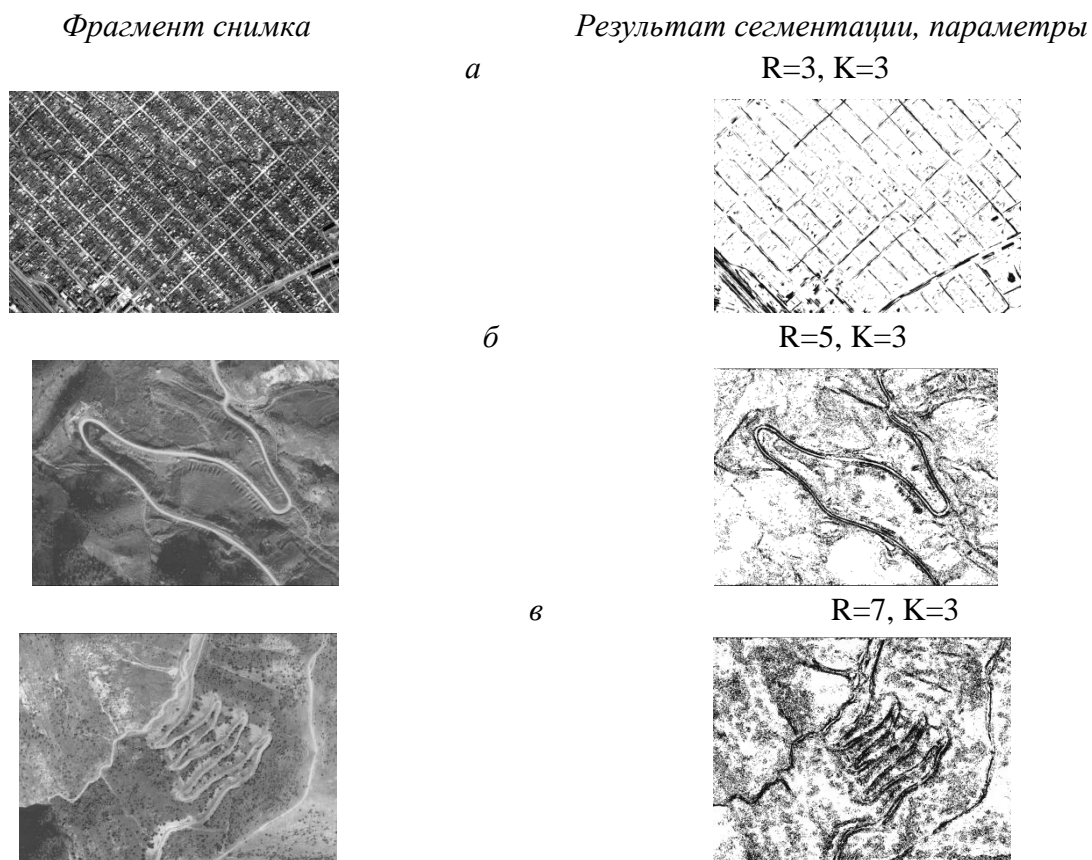


Рис. 6. Фрагменты, для которых получены приемлемые результаты сегментации

*Фрагмент снимка*

*Результат сегментации*



*a*



*б*



Рис. 7. Неудовлетворительные результаты сегментации

Для анализа эффективности алгоритма была выполнена обработка различных фрагментов спутникового снимка г. Сулеймания и его окрестностей.

В результате сегментации снимков выделены фрагменты дорожной сети (рис. 6). Результаты выделения оценивались экспертом (табл. 1). Процесс сегментации усложняется за счет таких свойств местности: дорога проходит близко к протяжённому строению прямоугольной формы; местами деревья и тень закрывают дорогу; слишком узкая дорога.

*Таблица 1*

**Результаты сегментации спутниковых снимков**

	Виды дорог	Общая протяженность дорог (км)	Протяженность дорог, выделенных в результате сегментации (км)	Эффективность выделения, %
а	Городские	5.1	3.4	67
б	Загородные	1.1	0.85	77
в	Горные	1.3	1.1	85
г	Сельские	1.0	0.75	75

Результаты экспериментов говорят о том, что необходима дополнительная обработка сегментированного изображения оператором, поскольку некоторые элементы, имеющие яркие характеристики, схожие с характеристиками дорожной сети, выделяются неправильно. Кроме того, в ряде случаев дорожная сеть выделяется неполностью.

Для определения геометрических параметров элементов дорожной сети используют сканирующий алгоритм, который ранее позволил получить приемлемые результаты для топографических карт [13].



Сканирующий алгоритм [10] основан на схеме хранения полосы изображения в памяти ЭВМ и нахождении контурных точек в процессе движения полосы по всему изображению. Для обработки информации в полосе различают два случая: выявление ситуации в полосе изображения и ее разрешение. В полосе одновременно хранятся две строки изображения (текущая и предыдущая). Анализируются х-координаты черных серий обеих строк в порядке их возрастания (слева направо) и выявляются пять ситуаций, которые могут возникнуть. При анализе отдельно обрабатываются ситуации «начало», «продолжение», «ветвление», «слияние» и «конец».

Результатом работы процедуры выделения отрезков являются список отрезков и список образуемых отрезками ветвей. Оба списка представляют собой массивы, элементы которых описывают выделенные отрезки и образуемые ими ветви. Для каждого отрезка в ходе работы процедуры вычисляют координаты  $X$  и  $Y$  начальной и конечной точек, толщину отрезка, количество образующих его точек, номер ветви, к которой отрезок принадлежит.

Список ветвей – это массив, каждый элемент которого содержит номер ветви, количество образующих ее отрезков, номера начального и конечного отрезков ветви. Количество отрезков, выделяемых на данном шаге, достаточно велико, полученный список может включать изолированные короткие отрезки, не являющиеся фрагментами дорожной сети, а также фрагменты одной прямой, поэтому сформированный список отрезков подвергают дальнейшей обработке.

Первым шагом такой обработки является объединение пар отрезков, начальная и конечная точки которых расположены достаточно близко друг от друга. Следующим этапом является объединение ветвей. Также удаляются короткие изолированные отрезки.

На рис. 8, *а* приведено изображение, полученное в результате сегментации фрагмента снимка (см. рис. 4) и ручной обработки оператором, на рис. 8, *б* – результат его обработки сканирующим алгоритмом (осевые линии выделенных элементов дорожной сети показаны светлым цветом).



Рис. 8. Результаты работы сканирующего алгоритма

Анализ эффективности применения сканирующего алгоритма позволяет утверждать, что при качественной подготовке сегментированного изображения геометрические параметры дорожной сети определяются достаточно точно.

**Выводы.** В работе авторами представлен подход к выделению элементов дорожной сети на космических снимках. В этом подходе использован модифицированный метод волновой сегментации для кластеризации, а для формирования описания дорожной сети применены сканирующие алгоритмы. Эксперименты показали приемлемые результаты выделения.

**СПИСОК ЛІТЕРАТУРЫ**

1. *Grote A.* Automatic road network extraction in suburban areas from aerial images / A.Grote – DGK, Reihe C, Heft № 663, 2011. – 96 p.
2. *Anil P.N., Natarajan S.* Automatic Road Extraction from High Resolution Imagery Based On Statistical Region Merging and Skeletonization / P.N.Anil, S.Natarajan // International Journal of Engineering Science and Technology/ – Vol. 2(3). – 2010. – P.165-171.
3. *Dal Poz A. P.* Semiautomatic road extraction by dynamic programming optimisation in the object space: single image case./ A. P.Dal Poz, R. A.Gallis, J. F. C.da Silva // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. 34, Part XXX. – P.34-40.
4. *Qiaoping Zhang.* Automated Road Network Extraction from High Spatial Resolution Multi-Spectral Imagery. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department Of Geomatics Engineering, University Of Calgary, APRIL, 2006.
5. *Ziems M.* Multiple-model based verification of road data. / M.Ziems, U.Breitkopf, C.Heipke, F.Rottensteiner // ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Volume I-3. – 2012. – P. 329-334.
6. *Ziems M.* Multiple-model based verification of Japanese road data. / M.Ziems, H.Fujimura, C.Heipke, F.Rottensteiner, // IntArchPhRS. – Vol. XXXVIII-4-8-2/W9, Haifa. – 2010. – P. 13-19.
7. *Лавриненко А.А.* Методы, алгоритмы и системы обработки растровых аэрокосмических изображений объектов дорожной сети: дис... канд. техн. наук: 05.13.01/ А.А. Лавриненко. – Курск, 2014. – 90 с.
8. *Гонсалес Р.* Цифровая обработка изображений./ Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2000. – 1072 с.
9. *Роджерс Д.* Алгоритмические основы машинной графики: пер. с англ. / Д. Роджерс. – М.: Мир, 1989. – 512 с.
10. *Форсайт Д.А.* Компьютерное зрение: современный поход / Д.А. Форсайт, Д.М. Понс. – Вильямс, 2004. – 928 с.
11. *Шапиро Л.* Компьютерное зрение. / Л. Шапиро, Дж. Стокман. – М.: Бином. Лаборатория знаний, 2006. – 752 с.
12. *ZheltoV S.Yu.* Robust Computer Image Analysis for Flight Vehicles Navigation. / S.Yu.ZheltoV, Yu.V. Vizilter // 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. – Vol.2. - St.Petersburg, 2004. – P. 164-167.
13. *Rang A.* Geometric characteristics of Iraq"s raster topographic maps used for automatic updating the road network. / A.Rang // Geomatics, Landmanagement and Landscape. – № 3. – Poland, University of Agriculture Krakow. – 2015. - P.14 -19.

**REFERENCES**

1. Grote A. (2011) Automatic road network extraction in suburban areas from aerial images. DGK, Reihe C, Heft № 663, 96 p.
2. Anil P.N., Natarajan S. (2010) Automatic Road Extraction from High Resolution Imagery Based On Statistical Region Merging and Skeletonization. International Journal of Engineering Science and Technology. (Vols. 2(3)), (p.165-171).

3. Dal Poz A. P. Gallis R. A., J. F. C. da Silva Semiautomatic road extraction by dynamic programming optimisation in the object space: single image case. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (Vols. 34, Part XXX), (p.34-40).
4. Qiaoping Zhang (2006) Automated Road Network Extraction from High Spatial Resolution Multi-Spectral Imagery. A thesis submitted to the faculty of graduate studies in partial fulfilment of the requirements for the degree of doctor of philosophy, Department Of Geomatics Engineering, University Of Calgary.
5. Ziems M. Breitkopf U., Heipke C., Rottensteiner F. (2012) Multiple-model based verification of road data. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. (Vols I-3), (p. 329-334).
6. Ziems M., Fujimura H., Heipke C., Rottensteiner F., (2010) Multiple-model based verification of Japanese road data., IntArchPhRS. (Vol. XXXVIII-4-8-2/W9), (p. 13-19).
7. Lavrinenko, A.A. (2014). Metody, algoritmy i sistemy obrabotki rastrovyyih aerokosmicheskikh izobrazheniy ob'ektov dorozhnoy seti [The methods and algorithms of aerospace image processing raster objects of the road network]. *Candidate's thesis*. Kursk [in Russian].
8. Gonsales, R. (2000). *Tsifrovaya obrabotka izobrazheniy [Digital Image Processing]*. Moskva [in Russian].
9. Rodzhers, D. (1989) *Algoritmicheskie osnovyi mashinnoy grafiki [Algorithmic foundations of computer graphics]*. Moskva: Mir [in Russian].
10. Forsayt D.A. & Pons D.M. (2004) *Kompyuternoe zrenie. Sovremennyiy podhod [Computer vision. Modern Approach]*. [in Russian]
11. Shapiro L. & Stokman Dzh. (2006) *Kompyuternoe zrenie [Computer vision]* Moskva [in Russian].
12. Zheltov S.Yu. (2004) Robust Computer Image Analysis for Flight Vehicles Navigation. 16th IFAC Symposium on Automatic Control in Aerospace. - Vol.2. - St.Petersburg, (p. 164-167).
13. Rang A. (2015) Geometric characteristics of Iraq"s raster topographic maps used for automatic updating the road network. Geomatics, Landmanagement and Landscape. 3, (p.14 -19). Poland, University of Agriculture Krakow.

**О.Л. Дорожинський,**

**Р.А. Абдаллах**

### **МЕТОДИКА АВТОМАТИЧНОГО ВИДІЛЕННЯ ДОРІГ НА СУПУТНИКОВИХ ЗНІМКАХ**

*Виділення доріг на супутникових знімках є одним з етапів оновлення топографічної карти за даними такого знімка. У статті наведено схему автоматичного оновлення карти, сформульовано задачу з локалізації елементів дорожньої мережі на супутниковому знімку, виконано аналіз досліджень у цій галузі. Описано модифікований алгоритм виділення елементів дорожньої мережі, запропонований автором. Наведено результати експериментів, які засвідчили, що виділяється близько 76% дорожньої мережі.*

**Ключові слова:** оновлення топографічних карт, супутниковий знімок, автоматичне виділення дорожньої мережі, скануючий алгоритм, сегментація супутникового знімка.

O.L. Dorozhynskyy,

R.A. Abdallah

**METHOD OF AUTOMATIC SELECTION OF ROADS ON THE  
SATELLITE IMAGES**

*Isolation of the road network on satellite images is an important step in updating topographic maps. Even partial automation of the present stage would allow to speed up the upgrade process and reduce its cost. The updating process of topographic maps is relevant to many areas due to the constant changes in the infrastructure area. Nowadays, digitizing existing topographic maps, and the advent of satellite imagery, reflecting the current state of the areas, there is a need to address the problem of automatic updating of topographic maps from satellite images. Automatic extraction of road networks in the aerospace images is one of the stages of solving the problem of updating topographic maps from satellite images. Road selection on satellite images is one of the stages of topographic map updating. In this paper the scheme of automatic map updating is described, the problem of road network elements localization on the satellite image is formulated, researches in this area are analyzed. Proposed by author modified algorithm for road network elements detection is described. The results of the experiments showed that 76% of road network are selected.*

**Keywords:** *renovation of topographical maps, satellite image, automatic selection of the road network, the scanning algorithm, the segmentation of satellite image.*

Надійшла до редакції

09.11.2015

УДК 621.397.6

**В.И. Кортунов**, *д-р техн.наук, професор,*  
**А.А. Молчанов**, *ассист.*  
**И.А. Гергель**, *ассист.,*  
*Национальный аэрокосмический*  
*университет им. Н.Е. Жуковского*

**3D-РЕКОНСТРУКЦИЯ ОБЪЕКТОВ С ПОМОЩЬЮ  
БЕСПИЛОТНЫХ СИСТЕМ**

*В статье представлены различные методы 3D-реконструкции объектов по снимкам стереосъемки или серии снимков, приведены преимущества и недостатки предложенных методов. Большое внимание в статье отведено факторам рассогласования стереокамер и методам их калибровки. Представлен также метод ускорения просчета карт глубины путем использования многопоточности графического процессора, что позволит выполнять 3D-реконструкцию в режиме реального времени с помощью видеопотока.*

**Ключевые слова:** *3D-реконструкция, калибровка, карта глубины.*

**Вступление.** Задача восстановления трехмерных объектов в настоящее время интенсивно разрабатывается многими исследователями и фирмами (Autodesk, Eos Systems Inc, Image Master, Massachusetts Institute of technology, AgiSoft LLC, КБ «Панорама»). Методы 3D-реконструкции объектов в последнее время находят широкое применение также в аэрокосмической отрасли, робототехнике, ландшафтном дизайне, горной добыче, строительстве и других сферах. [1]. Большой спрос на эту технологию получения трехмерных моделей вызван доступностью фотокамер высокого разрешения, производительными вычислительными средствами в обработке и средствами аэрофотосъемки (малыми беспилотными системами - МБС) для охвата крупноразмерных или площадных объектов. В отличие от лазерных средств сканирования средства аэрофотосъемки с МБС дешевле, допускают возможность работы с крупными объектами (горные карьеры, протяженные линии электропередачи). Технология 3D-реконструкции в задачах постобработки и реального времени имеет некоторые различия, что рассмотрено далее.

**Постановка задания.** Целью статьи является анализ современных методов 3D-реконструкции объектов на основании стереоизображений, полученных с борта МБС, и их применение для решения конкретных задач.

Методы восстановления объекта или формы сцены на основании стереоизображений делятся на три класса: методы для геометрических особенностей, основанные на поиске характерных точек (feature-based approaches), методы для областей (area-based approaches) [2], а также смешанные методы (miscellaneous approaches) [3].

Методы, основанные на поиске характерных точек, состоят в поиске точки со значительными перепадами яркости или какого-либо признака изображения (например, текстуры или цветового тона) на стереопаре. Часто ищут не точки, а линии, в том числе те, которые могут получаться путем сегментации обоих изображений и выбора границ сегментов в качестве характерных линий. Между найденными на двух изображениях точками устанавливается взаимно однозначное соответствие путем вычисления корреляции фрагментов изображений в окрестности этих точек или, в случае сегментации, путем сравнения интегральных характеристик сегментов. Для точек, в которых взаимно однозначное соответствие установлено, вычисляют расстояние до них методом триангуляции. Расстояние до остальных точек объекта получают посредством интерполяции. Математически такие методы принадлежат к широкому классу алгоритмов формирования модели объекта по серии снимков (Shape from Motion) [2].

Алгоритмы для областей базируются на поиске расстояния до всех точек изображения. Существует несколько смешанных методов, таких как стохастический алгоритм Бернарда [3]. Этот метод плохо работает при недостатке пространственной структуры. Его суть заключается в вычислении карты смещений (disparity) для каждой точки изображения путем минимизации функционала, соответствующего критериям близких интенсивностей и гладкости:

$$E = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \left( \| I_L(i, j) - I_R(i + D_i(i, j), j + D_j(i, j)) \| + \lambda \| \nabla D(i, j) \| \right),$$

где  $I_L(i,j)$ ,  $I_R(i,j)$  – значения пикселей левого и правого изображений;  $D(i,j)$  – карта смещений;  $D_i(i,j)$  – смещение в направлении  $i$ ;  $D_j(i,j)$  – смещение в направлении  $j$ ;  $\lambda$  – константа; оператор  $\nabla$  вычисляет сумму абсолютных разностей между смещением  $D(i,j)$  и его восемь ближайшими соседями.

Большинство алгоритмов формирования модели объекта по стереоснимкам (Shape from Stereo) находят только грубые детали формы объекта, особенно при недостатке пространственной структуры. В то же время, по сравнению с алгоритмом формирования модели объекта по серии снимков (Shape from Shading), пространственная локализация крупных деталей, особенно их ребер, и контрастных границ, происходит существенно точнее, а расстояния могут быть восстановлены в абсолютных величинах.

Разнообразие методов диктует необходимость выбора таких, которые стали бы результативными для фотоснимков с МБС. Далее представлены результаты применения рассмотренных методов для реконструкции одиночно стоящего объекта и рекомендации относительно как работы со стереокамерой, предварительной настройки, калибровки, отладки и компенсации оптических и механических искажений, так и особенностей, связанных с эксплуатацией устройства на борту.

**Основная часть.** Для практической реализации алгоритмов формирования 3D-изображения применяются стандартные программные средства. Одним из таких средств является библиотека компьютерного зрения с открытым исходным кодом OpenCV [5], реализованная с помощью языков программирования C и C++ и способная работать со многими популярными операционными системами (Linux, Windows и Mac OS X). Эта библиотека содержит более 500 функций, охватывающих различные области визуализации, безопасности, пользовательских интерфейсов, калибровки камер, зрения для робототехники. В библиотеках OpenCV камера моделируется обычной камерой-обскура, а взаимосвязь между 3D-точкой с координатами  $[X,Y,Z]$  и изображением ее проекции с координатами  $[x_{screen}, y_{screen}]$  устанавливается следующим выражением:

$$s \cdot [x_{screen}, y_{screen}, 1]^T = A [R \ t] [X, Y, Z, 1]^T,$$

где  $s$  – произвольный масштабирующий коэффициент;  $[R \ t]$  – внешние параметры, представляющие собой вращение и перенос, которые связывают систему координат сцены с системой координат камеры;  $A$  – матрица внутренних параметров камеры вида:

$$A = \begin{bmatrix} f_x & \gamma & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

где  $(c_x, c_y)$  – координаты главной точки;  $f$  – фокусное расстояние камеры;  $\gamma$  – параметр, описывающий асимметрию осей изображения.

Рассмотрим последовательно шаги реализации восстановления объекта с помощью модулей библиотеки OpenCV.

*Калибровка стереокамеры.* Процедура калибровки камеры (рис.1) основана на обработке серии снимков шахматной доски (ChessBoards) [6]. С помощью этой

процедуры оценивают внутренние параметры камеры, внешние параметры для каждого снимка, а также коэффициенты искажения радиальной и тангенциальной дисторсии. По внешним параметрам видеокамеры определяют преобразование координат, переводящее координаты точек сцены из системы координат сцены в систему координат, связанную с камерой. Результатом калибровки считается снижение искажений у изображений, которые получают с камер.

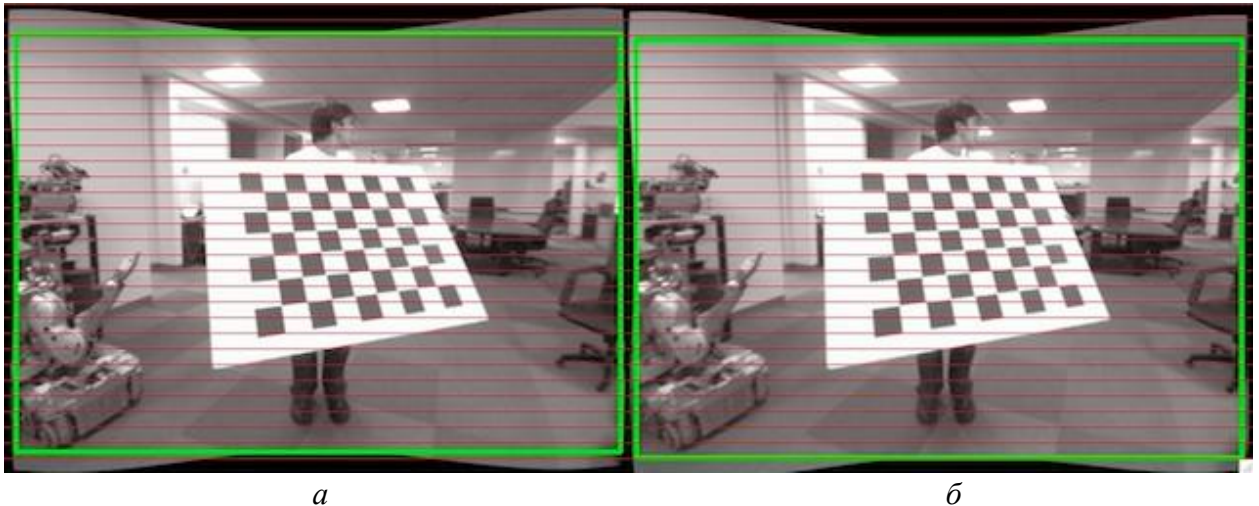


Рис. 1. Результат процедуры калибровки и ректификации изображений:  
*а* – изображение с левой камеры; *б* – изображение с правой камеры

*Процедура вычисления рассогласования каждого кадра стереокамеры (функция stereoRectify).* С помощью этой функции вычисляют матрицы вращения для каждой камеры, выравнивают и перепроецируют к одной плоскости изображения стереосистемы. Изображения выравнивают так, что бы все эпиполярные линии были параллельны горизонтальным сторонам изображения [7]. Функция в качестве входных данных использует внутренние параметры камеры, полученные ранее. Результатом процедуры являются две матрицы вращения, а также две проекционные матрицы в новых координатах.

*Пространственно-временная обработка кадров видеопоследовательности.* Используется для подавления цифрового шума на видеопоследовательностях стереосистемы. Шумоподавление имеет решающее значение для общего функционирования системы стереозрения, так как наличие шумов в кадрах не только ухудшает качество изображения, но и влияет на последующие процессы обработки [8]. Такой шаг обработки позволяет получить качественное изображение в неблагоприятных условиях освещенности.

*Вычисление карты смещений – disparity.* Карта смещений строится по стереопаре изображений. Для каждой точки на одном изображении выполняется поиск соответствующей точки на другом изображении стереосистемы. Смещение точки на изображении соответствует расстоянию этой точки до камеры (третья координата). Существует несколько основных групп методов определения смещения: дифференциальные методы, метод фазовой корреляции, метод сопоставления блоков. Наиболее широко на практике применяются методы сопоставления блоков StereoBM и StereoSGBM [9]. Это обусловлено

универсальностью, невысокой вычислительной сложностью и высокой эффективностью. Каждому пикселю с координатами  $(i, j)$  соответствует смещение на другом изображении стереокамеры  $D = D(i, j)$ .

*Стереорекострукция отдельных точек сцены.* Визуальную интерпретацию стереорекострукции представлено на рис. 2. Оптические центры камер  $O'$ ,  $O''$  и наблюдаемая точка  $M$  образуют плоскость  $P$ , которая пересекает плоскости изображения камер по прямым  $e'm'$  и  $e''m''$ .

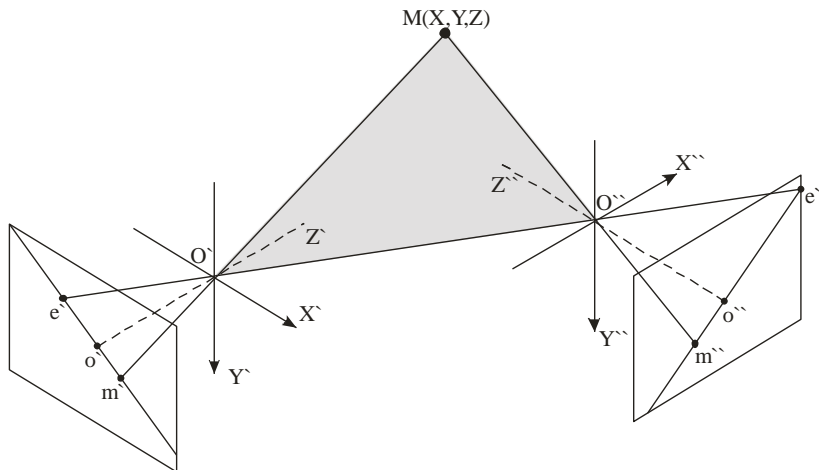


Рис. 2. Геометрическая интерпретация стереорекострукции

По паре соответствующих точек можно определить координаты образа в трехмерном пространстве:

$$[X \ Y \ Z \ W]^T = Q \cdot [x \ y \ D(i, j) \ 1]^T,$$

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -c_x \\ 0 & 1 & 0 & -c_y \\ 0 & 0 & 0 & f \\ 0 & 0 & -1/T & (cx - cx')/T \end{bmatrix},$$

где  $T$  – расстояние между камерами на оси  $X$  (камеры расположены горизонтально и координаты  $Y$  одинаковы).

Для этого используется функция вычисления карты глубины (ReprojectImageTo3D), а в качестве входных данных используется карта смещений, а также матрица  $Q$  перспективного преобразования [10].

*Использование GPU в задаче стереозрения.* Универсальные центральные процессоры (CPU) оптимизированы для исполнения одного потока последовательных задач, в то время как GPU оптимизированы для быстрого исполнения большого количества параллельно выполняемых потоков задач [11]. Модуль GPU в OpenCV содержит в себе несколько уровней функциональности. На нижнем уровне находятся реализации служебных операций, таких как инициализация и управление GPU, работа с памятью, механизм асинхронных вызовов. Уровнем выше реализован широкий набор базовых функций обработки изображений: различные методы фильтрации, поиск максимума, аффинные преобразования, вычисление разности изображений в различных нормах и др. Использование модуля GPU позволяет эффективно распараллеливать и выполнять с



высокой скоростью алгоритм формирования 3D-изображения сцены, что является основополагающим критерием для исполнения задач стереозрения в режиме реального времени [12].

**Практическая реализация.** В качестве практической реализации изложенного метода была использована серия из более чем ста фотографий карьера площадью 1 км<sup>2</sup>, выполненных с борта МБС типа квадрокоптер с высоты 70 метров (рис. 3).

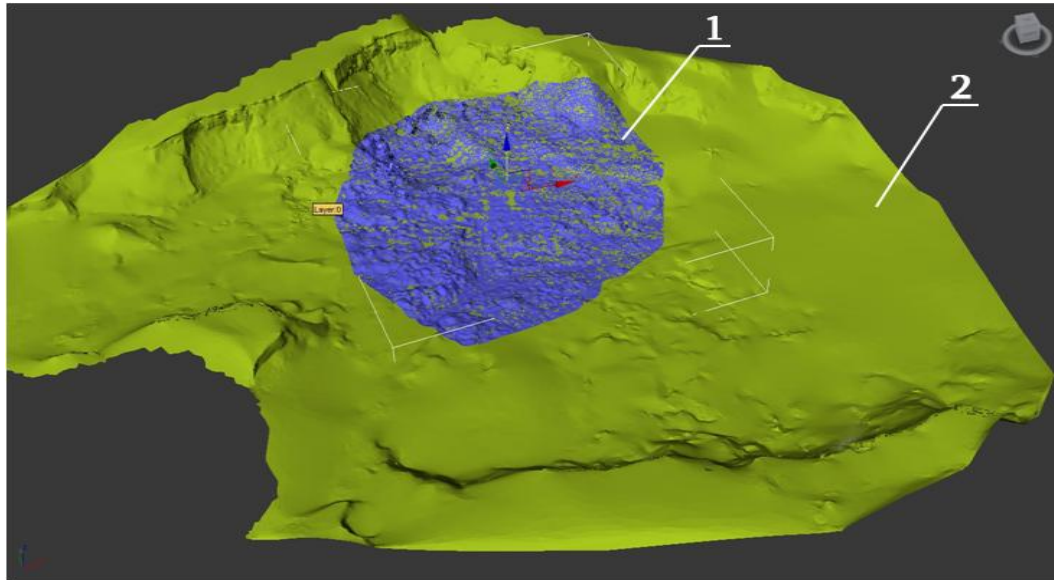


Рис. 3. Трехмерные модели карьера, реконструированные посредством лазерного сканирования (1) и с помощью методов 3D-реконструкции (2)

Перекрытие кадров колебалось от 50 до 70% на одном маршруте и от 20 до 30% между маршрутами. В качестве сравнительного образца была использована 3D-модель карьера, реконструированная с применением лазерного сканера, погрешность которого значительно превосходит даже разрешающую способность пикселя фотокамеры на поверхности объекта (GSD-ground sample distance) снимков. Занятая территория съемки составила приблизительно 1 км<sup>2</sup>. Сравнение после совмещения двух моделей показало, что максимальное рассогласование по высоте между моделями не превышало 23 см.

**Выводы.** В статье проанализированы современные методы 3D-реконструкции объектов, в которых можно использовать снимки, полученные с борта МБС. Перед установкой стереокамеры на борт МБС требуется выполнение калибровочных работ, связанных с уточнением внутренних параметров камеры, определением оптических искажений изображений и их минимизацией, подавлением цифровых шумов. По полученным с МБС изображениям проводится вычисление карты смещений и 3D-реконструкция точек сцены. Практическая реализация показала, что с помощью камеры с разрешением 10 мегапикселей и фокусным расстоянием 60 мм при съемке с высоты 70 метров можно получить 3D-модель с максимально возможным отклонением реконструированных точек, не превышающим 23 см. Приведенные результаты аэрофотосъемки и их обработка свидетельствует о возможности применения технологии 3D-реконструкции с МБС для решения широкого круга практических задач.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Совместный* российско-американский проект РАМОС [Электронный ресурс] / В.А. Maxwell. – Режим доступа: <http://lenta.ru/russia/2004/>. – 2004.
2. *Experiments* with a new area-based stereo algorithm [Text]: In International Conference on Image Analysis 1997 Florence / V. Roberto A. Fusiello. – Florence, 1997. – 1123 p.
3. *A stochastic* approach to stereo vision [Text]: In Proc. 5th National Conference AI, August 1986 Philadelphia, Pennsylvania / S.T. Bernard – Pennsylvania: 1986. – pp. 676 – 680.
4. *Cryer J.E.* Integration of shape from shading and stereo [Text] / J. E. Cryer, Ping Sing Tsai and Mubarak Shah // Pattern Recognition. – 1995. – № 28(7). – pp. 1033—1043.
5. *Bradski G.* Learning OpenCV Computer. Vision with the OpenCV Library [Текст]: G. Bradski, A. Kaehler, - O'Reilly Media. 2008. - 580 p.
6. *Zhang Z.* A flexible new technique for camera calibration [Текст] / Z. Zhang // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence – 2000. – Vol.22, No.11. – pp. 1330-1334.
7. *Geometry* of Vanishing Points and its Application to External Calibration and Realtime Pose [Текст]: Research Reports / Z. Kim – Estimation Institute of Transportation Studies, Paper UCB-ITS-RR-2006-5. – July 1, 2006. – 90 p.
8. *Грузман, И. С.* Цифровая обработка изображений в информационных системах [Текст]: учеб. пособие / И.С. Грузман – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2002. – 352 с.
9. *Hirschmuller H.* Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information [Text] / H. Hirschmuller // PAMI(30) – 2008. - No. 2, – pp. 328-341.
10. *Computing* Euler angles from a rotation matrix [Электронный ресурс] / G.G. Slabaugh. – Режим доступа: <http://www soi.city.ac.uk/~> – Загл. с экрана.
11. *Using* mobile GPU for general-purpose computing-a case study of face recognition on smartphones [Text]: In International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT) / K.T. Cheng and Y. Wang - April 2011, - pp. 1-4.
12. *Pulli K.* Real-time computer vision with OpenCV [Текст] / K. Pulli, A. Baksheev, K. Korniyakov, and V. Eruhimov // Communications of the ACM – 2012. - Vol. 55, No. 6. pp. 61-69.

**REFERENCES**

1. Maxwell, B.A. (2004). Sovmestnyj Rossijsko–Amerikanskij proekt RAMOS [The joint Russian-American project]. [www.lenta.ru](http://lenta.ru/russia/2004/). Retrieved from <http://lenta.ru/russia/2004/>.
2. Roberto, V., & Fusiello, A. (1997). Experiments with a new area-based stereo algorithm. International Conference on Image Analysis, 1123-1128 [in Italy].
3. Bernard, S.T. (1986). A stochastic approach to stereo vision. National Conference AI, 5, 676-680.
4. Cryer, J.E. (1995). Integration of shape from shading and stereo. Pattern Recognition, 28(7), 1033—1043.
5. Bradski, G., & Kaehler, A. (2008). Learning OpenCV Computer. Vision with the OpenCV Library. Sebastopol: O'Reilly Media.
6. Zhang, Z. (2000). A flexible new technique for camera calibration. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 22(11), 1330-1334.

7. Kim, Z. (2006). Geometry of Vanishing Points and its Application to External Calibration and Realtime Pose. Estimation Institute of Transportation Studies, 2006-5, 90.
8. Gruzman, I. S. (2002). Cifrovaja obrabotka izobrazhenij v informacionnyh sistemah [Digital image processing in information systems]. Novosibirsk: NSTU [in Russian].
9. Hirschmuller, H. (2008). Stereo Processing by Semiglobal Matching and Mutual Information. PAMI(30), 2, 328-341.
10. Slabaugh, G.G. (2015). Computing Euler angles from a rotation matrix. www.soi.city.ac.uk. Retrieved from <http://www.city.ac.uk/mathematics-computer-science-engineering>
11. Cheng, K.T., & Wang Y. (2011). Using mobile GPU for general-purpose computing-a case study of face recognition on smartphones. In International Symposium on VLSI Design, Automation and Test (VLSI-DAT), April 2011, 1-4.
12. Pulli, K., Baksheev, A., Korniyakov, K., & Eruhimov, V. (2012). Real-time computer vision with OpenCV. Communications of the ACM, 55(6), 61-69.

**В.І. Кортунів,  
А.О. Молчанов,  
І.А. Гергель**

### **3D-РЕКОНСТРУКЦІЯ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ БЕЗПЛОТНИХ СИСТЕМ**

*У статті описано різноманітні методи 3D-реконструкції об'єктів за знімками стереознімання або серії знімків; наведено переваги та недоліки запропонованих методів. Велику увагу в статті приділено факторам неузгодженості стереокамер і методам їх калібрування. Представлено також метод прискорення прорахунку карт глибини шляхом використання багатопотоковості графічного процесора, що дасть змогу виконувати 3D-реконструкцію в режимі реального часу за допомогою відеопотоку.*

**Ключові слова:** 3D-реконструкція, калібрування, карта глибини.

**V.I. Kortunov,  
A.O. Molchanov,  
I.A. Gergel**

### **3D-RECONSTRUCTION OF OBJECTS USING UNMANNED SYSTEMS**

*Currently, there are many methods to reconstruct a three-dimensional model of objects in proximity ways. The most common methods steel such as simulation by hand in various 3D-editors, 3D-laser scanning and 3D-reconstruction of objects using images. The article describes the various methods of 3D-reconstruction of objects from images or series of stereo images, advantages and disadvantages of the proposed methods. There are several stages of preparation of a stereo camera for shooting the object: stereo camera calibration (identify internal camera parameters, external parameters for each picture and*

*the distortion coefficients of radial and tangential distortion); rectification of images (the calculation of disagreement of each frame from stereo camera); spatio-temporal filtering of images (frames of a video sequence processing for digital noise suppression). Much attention is given to factors mismatch stereo cameras and methods of calibration. Also presented a method for accelerating the rendering of depth maps by using threading GPU, which enables the 3D-reconstruction in real time using the video stream.*

**Key words:** 3D-reconstruction, calibration, depth map.

Надійшла до редакції

27.11.2015

UDC 528.7

**BEZBORODOVA K.**

*Student of the faculty of geoinformation systems and territory management,  
Kyiv National University of Construction and Architecture*

### **THE USE OF UAVS FOR GEOSPATIAL DATA COLLECTION**

*In this article, the use of UAVs for geospatial data collection was analyzed. Nowadays, inexpensive UAVs equipped with high-resolution cameras, laser scanners, GNSS/RTK receivers and sensors are capable of making sophisticated and spatially correct maps of survey-grade accuracy with minimum human control. UAVs are bringing the revolution to cartography making it truly real-time. This article contains the information about the workflow, analysis of factors, which influence accuracy, accuracy assessment of one of the most popular drones, comparison of GPS ground topographic survey and aerial UAV topographic survey, suggested improvements to the modern civilian drones and skills that professionals in GIS, geodesy and cartography have to acquire nowadays.*

**Keywords:** UAV, drone, accuracy, GIS, cartography, geodesy

**Introduction.** Nowadays, inexpensive UAVs equipped with high-resolution cameras, laser scanners, GNSS/RTK receivers and sensors are capable of making sophisticated and spatially correct maps of survey-grade accuracy with minimum human control. Mapmaking takes much less time than ever before. UAVs are bringing the revolution to cartography making it truly real-time.

**The Analysis Of Recent Research And Publications.** The most recent research and publications about UAV technology were analyzed in this article. The analysis shows that UAVs are already widely used in various fields. Their high accuracy was tested and proved not only by vendors, but also by companies that specialize in surveying. Their time- and cost-efficiency was proved by comparison of the ground topographic survey and UAV topographic survey of the same land parcel.

**Statement of the problem.** The aim of this article is to present the workflow, the accuracy assessment of one of the most popular UAVs and to show that the provided accuracy allows us to use UAVs for topographic surveys in Ukraine, which are regulated

by legal acts, compare the accuracy of UAV aerial topographic survey and GPS ground topographic survey of the same land parcel, suggest extraordinary applications of UAVs including those applications which became possible with the occurrence of real-time cartography, to suggest improvements to modern civilian drones and to analyze new skills, which professionals have to acquire nowadays.

**The exposition of research results.** Working with UAVs is relatively easy and fast. The first step is flight planning. A first-order decision is whether the flight will be done under autonomous control or will be controlled manually. Manual control is generally more useful for inspections (say beneath a bridge) that aim to react to information in real time, while autonomous control is, as a rule, more useful when one is trying to fly in a systematic pattern to create a map. Using an autopilot is in fact safer because it reduces the possibility of human error and of radio interference disrupting the signal between a manual controller on the ground and the drone. In either case, it is important to analyze the area to be mapped before liftoff. It is good practice to use existing satellite imagery to plot out a flight before takeoff [5].

The design of flight paths is an important component of UAV mapping. This is typically done using software packages. UAV mapping missions are usually flown in a specific pattern of parallel lines, commonly described as “transects,” which are connected to a series of “waypoints”—think of a connect-the-dots pattern of parallel lines, or the pattern in which you might mow the lawn. A transect flight pattern is a method of ensuring that the UAV captures an adequate quantity of images that overlap to the degree required for the processing software to create a high-quality and accurate map. For maximum quality, some UAV mappers suggest flying two different overlapping patterns over the same area but at different heights. The pilot opens the software and defines an area to be mapped with a polygon, then specifies the desired operational altitude, image overlap and other parameters. When complete, the mission file is saved to the computer and can also be saved to the UAV’s flight controller. If there is a working Internet connection available, missions can be planned at the site of the anticipated fieldwork [5].

UAV flight paths or mapping projects should be designed to ensure a sufficient amount of both forward and lateral photographic overlap, which will better allow postprocessing software to identify common points between each image. There is no universally accepted overlap standard. As an example, Walter Volkmann of Micro Aerial Projects suggests overlaps of 80 percent (forward) and 70 percent (lateral/side). Pix4D on its website suggests at least 75 percent forward overlap and 60 percent lateral/side overlap. To achieve a certain image overlap, pilots need to balance the speed of flight with the interval at which the camera is taking pictures, as well as the altitude of the flight. Today’s flight planning software will automatically calculate all these figures [5].

Image resolution is an extremely important consideration. Achieving good resolution in UAV photography depends on how high the drone is flying and camera settings. Resolution in aerial photography is measured as ground sampling distance (GSD)—the length on the ground corresponding to the side of one pixel in the image, or the distance between pixel centers measured on the ground (these are equivalent) [5].

Of course, image quality is not purely a function of the theoretical resolution. A higher altitude will not be useful if there are clouds between the camera and the ground. Also, images can be made blurry by the motion of the drone. Another negative factor is

turbulence, which can be ameliorated by gimbal systems that stabilize the camera's motion with respect to that of the airframe [5].

Collected imagery must be processed on a computer to generate a map. Processing big batches of high-definition aerial imagery can be slow, and depending on how many images are being used, this can require a powerful computer processor. Some field workers will do low-quality image processing in the field to check that they have shot an adequate number of images with adequate overlap, then create a higher-quality model when they return to their computing workstations. Factoring in the time required to process data is an important consideration for fieldwork, as processing presents a technical barrier to projects that require a swift turnaround. To avoid unpleasant surprises, it is best to get a clear sense of how long processing will take with the computing equipment available before heading into the field. Some companies now offer UAV mapping software that carries out real-time image processing on their servers, such as DroneDeploy, DroneMapper, and Airware. Outsourcing the computing power to process detailed UAV imagery lessens the lengthy processing time required by other photogrammetry software, and it can also provide output quickly while a team is still in the field. However, using these services requires access to mobile data or the Internet, which is often unavailable in remote areas or during disasters. Some services, such as DroneDeploy, require the purchase of a separate unit that is mounted on the UAV to function [5]. The technology will change and the processors will be fast enough.

The accuracy assessment of the senseFly's eBee RTK supplied with PostFlight Terra 3D post-processing software was completed by senseFly team. To calculate the accuracy the Root Mean Square Error (RMSE) was used. RMSE is the standard error measure used in geo-correction. The team set out 19 reference points spread over the 0.20 km<sup>2</sup> area. The references were taken by surveying the zone with the double-frequency GPS/GLONASS receiver taking RTK corrections from swisstopo's Automated GNSS network for Switzerland (AGNES). The team did two flights using eBee RTK along with eMotion for the flight planning and monitoring, and PostFlight Terra 3D for image post-processing. Accuracy of point cloud, orthomosaic and DSM were studied. During the first flight RTK corrections were provided by the VRS, GSD was 2.5 cm, altitude was set to 81 m and image overlap was 80 %. The weather conditions: bright sunny day. The analysis first focused on the point cloud accuracy. The eBee RTK achieved high level of accuracy both horizontally ( $RSME_{XY} = 2.6$  cm) and vertically ( $RMSE_Z = 3.1$  cm). The accuracy of all the points is within the range of 1 to 3 times the GSD. Second, analysis focused on the orthomosaic and the DSM. The quality of both was checked by using ESRI ArcMap 10.1 software to compare the horizontal distances and the vertical offsets between the verification points, computed by Postflight Terra 3D, and the original position of the these points in the field. For the orthomosaic  $RSME_{XY} = 3.3$  cm and for the DSM  $RSME_Z = 3.5$  cm. The next analysis focused on the conditions when the uplink between the base station and the eBee RTK is lost for short periods, preventing RTK corrections from reaching eMotion. The GPS positions of 10% of the images were edited. Incorrect geotags were entered randomly. In this way, the SenseFly's team validated Postflight Terra 3D's ability to correct such positions. The accuracy of the entire dataset was still maintained:  $RSME_{XY} = 2.8$  cm and  $RSME_Z = 4.8$  cm. The last analysis focused on the ability of eBee RTK to maintain the accuracy in bad weather conditions. Even in windy, low light

conditions eBee achieved one to three GSD accuracy:  $RSME_{XY} = 8.9$  cm and  $RSME_Z = 7.0$  cm [1].

Topographic surveys are one of the most common surveys in Ukraine and their accuracy is regulated by legal acts. Based on the accuracy assessment, which was described previously, I can make a conclusion that surveying with UAVs provides the required accuracy.

The company “Geocom” in Charkov, Ukraine conducts geodetic surveys using UAVs “Tornado”. They also offer postprocessing of the acquired images into orthophoto maps of the following scales: 1:500, 1:1000, 1:2000 and into digital models. The company offers to conduct a survey at any location within Ukraine. They promise that their UAV can stay in the air up to two hours. Surveys can be conducted at hard-to-reach areas.

So, can UAV topographic surveying replace ground topographic surveys? McIntosh Perry Surveying Inc. collaborated with UKKO to conduct a test of an eBee. The purpose of the test was to compare the accuracies of horizontal positions and vertical elevations against a topographic and site detail survey. First, the farmland set on 40 hectares was surveyed with Trimble R8 base station and rover RTK GPS units. The survey of the site was completed by visually identifying and taking RTK GPS observations at break lines and physical features. The field topographic survey resulted in the acquisition of approximately 1800 data points with x, y, z coordinates. A digital terrain model was prepared using CAD software. Field accuracies were observed to provide results between 3 and 8 cm in each of the three axes over 95%+ of the observations, with combined accuracies averaging 5 to 6 cm. These results were achieved by using a fixed base station. Later, the same farmland was surveyed with an eBee RTK UAV. A Trimble R10 RTK GPS unit set on a point with known coordinates was used as base station for that survey. The known latitude, longitude and ellipsoid height were entered through the eMotion software on the laptop controller, and the base was connected to the UAV through the laptop, where real-time corrections could be pushed to the UAV during the flight. The onboard GPS receiver in the aircraft constantly updated the laptop with the calculated deviation of its ‘fix’ from the base station, a value which averaged <2 cm throughout the flight. For accuracy comparisons, McIntosh Perry had previously set 6 GCPs, which were not used in the post-processing, but were used only as a check on the accuracy of the positioning determined by processing the data acquired by the UAV. The photographs were taken with a lateral overlap of 70% and a longitudinal overlap of 85%. The maximum altitude for the mission was 100 meters. Resolution was 3 cm/pixel. Setup took 10 minutes. The eBee was simply hand-launched and flew a predefined path in 28 minutes. The camera took 314 photographs in total. The highest wind speed during the flight peaked 18 km/hour, but the UAV managed to adjust its track using RTK GPS unit and its attitude using its accelerometer. The post-processing software PostFlight Terra 3D generated a point cloud at a density of 115 points/m<sup>3</sup>. 31 million individual observations in total. Accuracy comparison between eBee observations and ground control against 6 GCPs resulted in the following: mean error (X) equals 1.6 cm, mean error (Y) equals 2.8 cm, mean error (Z) equals 0.3 cm,  $RSME_X = 4.7$  cm,  $RSME_Y = 3.7$  cm,  $RSME_Z = 5.5$  cm. It means that using the eBee platform can successfully compete in accuracy with a conventional ground topographic survey completed using RTK GNSS receivers, comprising a base and rover. The time required to complete a ground survey in the field is

4 days while the aerial survey took only one hour. Post-processing time is similar in both cases, although there are more options available using the PostFlight Terra 3D software than there are using CAD software. The amount of data acquired is tremendous. The paradigm that surveying is done in the field and processing is done in the office will change to one where data acquisition is done in the field and surveying is done in the office. It allows us to have the parcel and surveyed objects in virtual form and makes it available for us at any moment of time without leaving our desks [2].

However, the real value of the UAV technology is time-efficiency. The UAVs are bringing a big revolution to cartography making it truly real-time. It is twice important for search and rescue operations when every second counts and delay can result in human deaths. While planes and helicopters require some time to be ready for deployment, a microdrone UAS can be put into action immediately. Drones equipped with sensors and GNSS/RTK receivers can fly over the area of interest, perform sensory operations to collect evidence of the victim presence, and report their information about the location of victims to a remote ground station right away. UAVs give real-time map of the site and help rescue teams to find a very accurate position of victims, plan the optimal path, evaluate the potential risks for the victims and people coming to their rescue, choose the optimal equipment and at the same time the evaluation of damage can be done using up-to-date maps provided by UAVs. UAVs can carry different payloads including GPS trackers for victims.

UAV technology significantly advances GIS and cartography. It found many extraordinary applications.

Drones provide critical support after big disasters. After the Haiti earthquake struck, un-updated maps made it difficult for aid agencies to deliver food, water and medicine to those in desperate need. A team of engineers sent three UAVs over Haiti for 10 days, correlating with Google Maps to create up-to-date, 3-D maps that covered 45 square kilometers. This allowed for humanitarian agencies to distribute supplies quickly [7].

In Japan, drones guide robot trucks at construction sites. Komatsu recently paired with American drone maker Skycatch with a plan to have drones survey and map construction sites, and then have unmanned bulldozers and other vehicles go to work. First, drones fly over a construction site, taking pictures of the ground below. Software then stitches these pictures into 3D maps, and site planners add in the information about what earth they want moved, which areas they want left intact, and what the next stage of construction should look like [8].

UAVs can be used to track crime. Since late 2006, the FBI has conducted surveillance using UAVs in eight criminal cases and two national security cases [9]. UAVs equipped with GNSS/RTK, sensors and infrared cameras can monitor areas where the crime rates are high. They will be able to track criminals and provide high-accuracy real-time maps with the current position of suspects. Regular flights over the most dangerous parts of cities would make a significant dent in the number of burglaries, robberies and murders. It will provide the police with a continuous stream of images covering the most dangerous parts. In a very ideal scenario of data collection, here's how it would work: data from sensors (cameras, drones, gunshot detectors and license-plate readers) would be collected from thousands of spots in the city. Data analysts would then scan data in real-time to locate felons or provide reports to first responders [6].



UAVs are a great help when there is a need to inspect the areas where the presence of people is not possible or not safe. Industry is one of the examples. There might be the cases when a person cannot enter some parts of the factory or when it is necessary to stop the industrial process for a surveyor to do the job, which can result in huge money losses.

The inspection of complex infrastructure will benefit from regular aerial monitoring. The ability to sense in three dimensions, take thermal readings, and to detect metal strain will greatly improve infrastructure inspection. Small and unmanned platforms that can hover and get close and surround infrastructure, such as a bridge or plant, will provide a new level of detail to improve performance [4].

In my opinion, to make UAVs capable of constantly providing real-time maps, a few improvements have to be considered. The energy limitations should be decreased. The average flight time of civilian UAVs is 30-40 minutes. If a drone never had to land, it could act as an auxiliary GPS and be a geostationary satellite without the expense of going to space. The solar power can extend the durability of drone battery. Such companies as titan Aerospace, Airbus with its Zephyr are already using solar energy to extend durability. The solar panels can be paper-thin so they do not add weight.

The UAV technology will change the way we see GIS, geodesy and cartography. That is why it is necessary to make changes in the education. Nowadays, professionals can get tremendous volume of information and it takes little time and effort. That is why they have to be able to filter the information and to 'calculate' the minimum volume of data that is needed to solve problems and to maintain required accuracy, because the more information we get, the more time we spend processing it. Professionals should know the correlation between the weather conditions, height of the flight, image overlap and other parameters and accuracy. The schools should teach students how to use software for flight planning and introduce them to photogrammetric software. Students should study the flight route design, flight planning (autonomous and manual) for image quality.

**Conclusion.** In this article, the accuracy of surveys completed with modern UAVs was assessed and it was proved that UAV topographic surveying can successfully compete with ground topographic surveys. The volumes of information collected is much bigger, even though the time spent in the field is significantly decreased. Modern post-processing software gives more options when working with acquired data. Nowadays surveying is done not in the field but in the office. Collecting data has never been easier and faster. This allows us to get real-time maps. Because UAV technology significantly advances GIS and cartography, it found many extraordinary applications. But new technology requires professionals to acquire new skills.

Do drones have a future? UAV technology has already become an essential in various fields. Professionals around the world are realizing its effectiveness and convenience. Thanks to this new technology, we can get tremendous volumes of data in real time. The up-to-date and spatially accurate maps can be produced in fast and cheap ways. UAVs do have a big future. And this is not only my personal opinion, but also an opinion of Embry-Riddle Aeronautical University, Oklahoma State University, Indiana

State University which have drone degrees now. New professions and trade that use just UAVs might arise. In the future, unmanned aircraft will need to be more autonomous and more cooperative, allowing one person to control a swarm of vehicles.

**REFERENCES**

1. A. Roze, J-C. Zufferey, A. Beyeler, A. McClellan. eBee RTK Accuracy Assessment. [www.sensefly.com](http://www.sensefly.com). Retrieved from [https://www.sensefly.com/fileadmin/user\\_upload/sensefly/documents/eBee-RTK-Accuracy-Assessment.pdf](https://www.sensefly.com/fileadmin/user_upload/sensefly/documents/eBee-RTK-Accuracy-Assessment.pdf)
2. Brian Kerr, Jean-Francois Dionne. UAV Aerial topographic Surveying Can it Replace GPS Ground Topographic Surveys? [www.sensefly.com](http://www.sensefly.com). Retrieved from [publications.aols.org/OPS-Magazine/2015-Summer/Files19.html](http://publications.aols.org/OPS-Magazine/2015-Summer/Files19.html)
3. Sonia Waharte, Niki Trigoni. Supporting Search and Rescue Operations with UAVs. [www.cs.ox.ac.uk](http://www.cs.ox.ac.uk). Retrieved from [https://www.cs.ox.ac.uk/files/3198/submission\\_waharte.pdf](https://www.cs.ox.ac.uk/files/3198/submission_waharte.pdf)
4. Matt Ball. What Are The Top Ten Civilian Uses Of Civilian Drones That Don't Impinge Privacy? [www.sensorsandsystems.com](http://www.sensorsandsystems.com). Retrieved from [https://www.sensorsandsystems.com/dialog/perspective/30861-what-are-the-top-ten-uses-of-civilian-drones-that-don't-impin](https://www.sensorsandsystems.com/dialog/perspective/30861-what-are-the-top-ten-uses-of-civilian-drones-that-don-t-impin)
5. Faine Greenwood. CHAPTER 4: HOW TO MAKE MAPS WITH DRONES. [drones.newamerica.org](http://drones.newamerica.org). Retrieved from: [drones.newamerica.org/primer/Chapter%204.pdf](http://drones.newamerica.org/primer/Chapter%204.pdf)
6. Jessica Ruane. Could spy drones be the future of crime fighting? [Pando.com](http://pando.com). Retrieved from <https://pando.com/2014/01/31/could-spy-drones-be-the-future-of-crime-fighting/>
7. Emma Barker. 5 UNEXPECTED USES FOR DRONES. [aerial.swarmuav.com.au](http://aerial.swarmuav.com.au). Retrieved from [aerial.swarmuav.com.au/blog/5-unexpected-uses-for-drones](http://aerial.swarmuav.com.au/blog/5-unexpected-uses-for-drones)
8. Kelsey D. Atherton. IN JAPAN, DRONES GUIDE ROBOT TRUCKS AT CONSTRUCTION SITES. [www.popsci.com](http://www.popsci.com). Retrieved from [www.popsci.com/in-japan-drones-guide-robot-trucks-at-construction-sites](http://www.popsci.com/in-japan-drones-guide-robot-trucks-at-construction-sites)
9. Matt Alderton. To the Rescue! Why Drones in Police Work Are the Future of Crime Fighting. [Lineshapespace.com](http://lineshapespace.com). Retrieved from <http://lineshapespace.com/drones-in-police-work-future-crime-fighting/>

**Х.О. Безбородова**

**ВИКОРИСТАННЯ БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ  
АПАРАТІВ ДЛЯ ЗБОРУ ГЕОПРОСТОРОВИХ ДАНИХ**

*У статті висвітлено використання безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для збору геопросторових даних. У наш час використання недорогих БПЛА, оснащених камерами, лазерними сканерами та GNSS/RTK-приймачами, дають змогу складати мапи високої точності з мінімальними витратами часу та мінімальним втручанням з боку людини. Дрони уможливають картографію у реальному часі. Стаття містить опис процесу виконання зйомки з БПЛА та характеристику факторів, що впливають на точність. Проаналізовано точність БПЛА за різних погодних умов. У статті наведено СКП для хмари точок, цифрової моделі рельєфу та ортофотоплану. Виконано порівняльний аналіз наземної топографічної зйомки та топографічної зйомки з БПЛА, визначені переваги використання дронів.*

*Досліджено використання БПЛА в Україні, наведено опис послуг стосовно зйомок з БПЛА, які надаються однією з українських компаній. Стаття містить також приклад та аналіз нових сфер використання БПЛА, таких як будівництво, моніторинг споруд, пошуково-рятувальні операції, моніторинг злочинності. Запропоновано деякі удосконалення цивільних дронів. Уміщено висновки щодо нових навичок, якими повинні володіти сучасні фахівці у сфері ГІС, картографії та геодезії, а також доведено перспективність використання БПЛА.*

**Ключові слова:** БПЛА, дрон, точність, ГІС, картографія, геодезія

**К.А. Безбородова**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ СБОРА ГЕОПРОСТРАНСТВЕННЫХ ДАННЫХ**

*В наше время использования недорогих БПЛА, оснащенных камерами, лазерными сканерами и GNSS / RTK-приемниками, дает возможность составлять карты высокой точности с минимальными затратами времени и минимальным вмешательством со стороны человека. Дроны делают возможной картографию в реальном времени. Статья содержит описание процесса выполнения съемки с БПЛА и характеристику факторов, влияющих на точность. Проанализированы точности БПЛА при различных погодных условиях. В статье приведены СКО для облака точек, цифровой модели рельефа и ортофотоплана. Выполнен сравнительный анализ наземной топографической съемки и топографической съемки с БПЛА, определены преимущества использования дронов. Исследовано использование БПЛА в Украине, описаны услуги по съемкам с БПЛА, которые предоставляются одной из украинских компаний. Статья также содержит пример и анализ новых сфер использования БПЛА, таких как строительство, мониторинг сооружений, поисково-спасательные операции, мониторинг преступности. Предложены некоторые усовершенствования для гражданских дронов. Сделаны выводы относительно новых навыков, которыми должны обладать современные специалисты в сфере ГИС, картографии и геодезии, а также доказана перспективность использования БПЛА.*

**Ключевые слова:** БПЛА, дрон, точность, ГИС, картография, геодезия.

Надійшла до редакції

03.12.2015

**Р.В. Шульц**, *д-р техн. наук, професор,*  
**С.П. Войтенко**, *д-р техн. наук, професор,*  
**П.Д. Крельштейн**, *канд. техн. наук, доцент,*  
*Київський національний університет*  
*будівництва і архітектури*  
**І.А. Маліна**, *канд. техн. наук, доцент,*  
*Одеська державна академія*  
*будівництва і архітектури*

## **ДО ПИТАННЯ РОЗРАХУНКУ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ КООРДИНАТ ТОЧОК ПІД ЧАС АЕРОФОТОЗНІМАННЯ З БЕЗПЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АППАРАТІВ**

*У роботі розглянуто питання виконання попереднього розрахунку точності визначення координат точок за матеріалами аерофотознімання з використанням безпілотних літальних апаратів (БПЛА). Наведено математичну модель визначення координат за парою аерофотознімків. Математична модель враховує використання даних GNSS для визначення координат центрів фотографування та корегування інерціальної навігаційної системи (INS). Куткові елементи зовнішнього орієнтування у наведеній математичній моделі визначають за допомогою INS. Використовуючи алгоритм перетворення кореляційних матриць отримано строгий вираз для виконання попереднього розрахунку точності. Методом варіювання отримано вираз для розрахунку впливу систематичних похибок. За отриманими виразами виконано дослідження апріорної точності визначення координат для різних умов аерофотознімання. Експериментально розраховано точність аерофотознімання для БПЛА з типовими характеристиками, для створення топографічних карт і планів.*

**Ключові слова:** *безпілотний літальний апарат, розрахунок точності, інерціальна навігаційна система, кореляційна матриця, аерофотознімання.*

**Постановка проблеми.** Технологія аерофотознімання із використанням БПЛА нині набула значного поширення. БПЛА використовують для вирішення завдань з топографічного картографування, моніторингу, інвентаризації та спеціалізованих військових завдань [10; 15; 17; 19]. Значної популярності ця технологія набула серед геодезистів і фотограмметристів для створення топографічних планів і карт за матеріалами аерофотознімання об'єктів невеликої площі. Завдяки своїм особливостям знімання з БПЛА впевнено займає нішу між традиційним аерофотозніманням та наземним топографічним зніманням. Основна особливість та відмінність аерофотознімання з БПЛА, порівнянно з традиційним аерофотозніманням, полягає у якості даних. Обмежені габарити та низькі тактико-технічні характеристики БПЛА [2; 13] не дають змоги встановлювати на них високоякісну навігаційну та знімальну апаратуру, тому якість даних з БПЛА є

набагато гіршою від матеріалів аерофотознімання. Матеріали знімання із БПЛА характеризуються значними кутами нахилу, різномасштабністю знімків, а геометрія маршрутів – відхиленнями від попереднього проекту, що потребує використання не тільки строгих методів оброблення, а й залучення робастих методів [1; 14]. Проектуючи традиційне аерофотознімання, спираються на вимоги до кінцевої точності отримання координат контурів та висот точок на топографічному плані або карті. При цьому використовують загальновідомі спрощені вирази для попереднього розрахунку точності. У разі аерофотознімання з БПЛА для розрахунку слід використовувати строгі вирази, у яких відобразатиметься вплив факторів, що знижують точність аерофотознімання. Отримання таких виразів є необхідним й актуальним завданням цифрової фотограмметрії, розв'язання якої дасть змогу більш якісно виконувати проектування аерофотознімання з БПЛА та правильно обирати параметри фотографування.

**Огляд попередніх публікацій.** Оскільки основною метою роботи є отримання строгих виразів для попереднього розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА, то ми не будемо аналізувати результати, отримані у класичній фотограмметрії для традиційного аерофотознімання. Отримані досить давно прості вирази для попереднього розрахунку добре себе зарекомендували і до теперішнього часу використовуються у традиційній фотограмметрії.

Аналізуючи відомі роботи з використання БПЛА, відмітимо, що найчастіше попередній розрахунок точності виконують за найпростішою схемою, в якій основним фактором вважають роздільну здатність цифрової камери [16; 18]. За кінцеву точність фактично беруть роздільну здатність на місцевості, що є абсолютно неприпустимим. У виборі параметрів фотографування з БПЛА, на відміну від звичайного аерофотознімання, доводиться враховувати велику кількість додаткових умов, зокрема стан атмосфери, можливу висоту і швидкість фотографування, час роботи, аеродинамічні характеристики БПЛА та ін. Найбільш детальний огляд всіх факторів та розрахунок їх впливу наведено в роботі [7], проте точність знову-таки розраховано за дуже наближеними виразами.

За параметрами й обладнанням (швидкість знімання, фотографічна і навігаційна апаратура) найближчим аналогом до знімання з БПЛА є мобільне картографічне знімання [3]. В дослідженнях цього напрямку за тривалий час отримано ряд виразів для попереднього розрахунку точності. Наприклад, у роботі [21] наведено вирази для розрахунку впливу точності визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування на точність мобільного знімання. Детальний аналіз багатьох факторів виконано в іншій роботі [4], зокрема шляхом математичного моделювання досліджено вплив різних факторів на точність мобільного знімання. Найбільш вдалий підхід до виконання попереднього розрахунку наведено у статті [5], у якій вплив похибок калібрування між INS та цифровою камерою подано у строгому вигляді через кореляційні матриці. Однак повного розрахунку в цій роботі,

на жаль, не наведено. Загалом строгих математичних виразів для розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА дотепер не отримано.

**Постановка завдання** Метою роботи є отримання строгих математичних виразів для розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА і виконання на основі цих виразів попереднього розрахунку для знімання з БПЛА, що має типові характеристики для вирішення топографічних завдань.

**Методика дослідження.** Отримаємо вирази для попереднього розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА. Модифікуємо математичну модель, яку використовують у мобільному зніманні [4], до випадку аерофотознімання. Попередньо зауважимо, що для визначення координат центрів фотографування передбачено застосування GNSS, а для визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування – мікроелектромеханічна INS [9; 11; 12; 20]. В такому разі обов’язково потрібно брати до уваги той факт, що GNSS та INS використовують для отримання інтегрованого рішення про місцезположення та орієнтацію, що, з одного боку, покращує навігаційне рішення, а з другого – призводить до появи специфічних джерел похибок (похибки орієнтування між GNSS та INS, похибки синхронізації) [4; 5; 6; 8]. Для запису математичної моделі наведемо основні геометричні зв’язки між основними засобами вимірювання під час аерофотознімання з БПЛА (рис. 1):

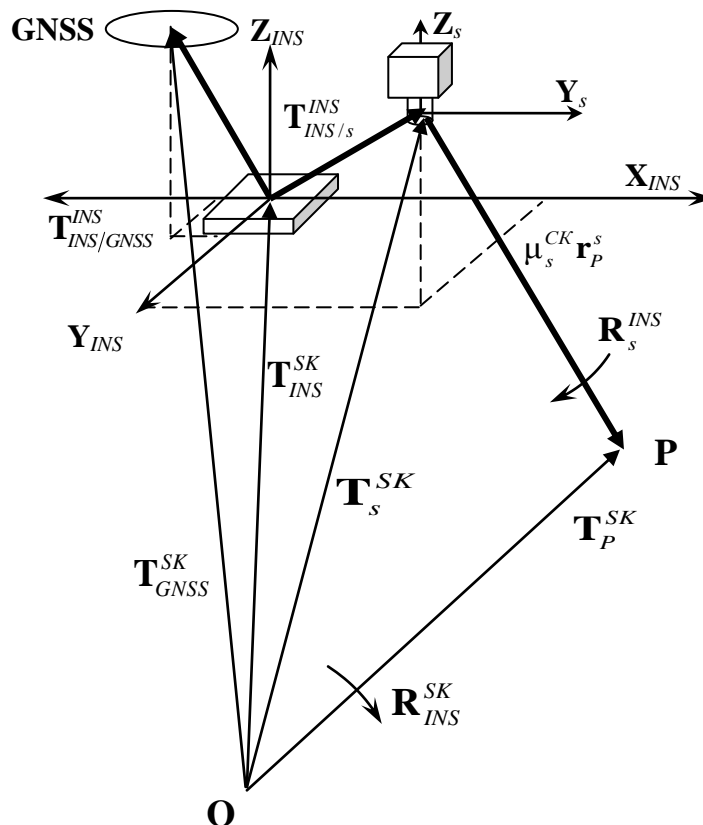


Рис. 1. Основні геометричні зв’язки між засобами вимірювання БПЛА

Основною формулою для визначення координат об’єктів за фотографічним зображенням є рівняння, яке пов’язує координати об’єкта на фотографічному

зображенні  $\mathbf{r}_p^s$  з координатами об'єкта у вибраній прямокутній геодезичній системі координат  $\mathbf{T}_p^{SK}$ . Представимо цей зв'язок у матричному вигляді [4]:

$$\mathbf{T}_p^{SK} = \mathbf{T}_s^{SK} + \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{SK} \mathbf{r}_p^s, \quad (1)$$

де  $\mathbf{T}_s^{SK}$  – вектор місцеположення центра проекції S фотокамери у вибраній системі координат;  $\mu_s^{SK}$  – масштабний коефіцієнт, який визначають з прямої фотограмметричної засічки і  $\mathbf{R}_s^{SK}$  – матриця розвороту між координатною системою камери та прямокутною геодезичною системою.

Під час аерофотознімання з БПЛА всі три параметри не вимірюють, а визначають. Фактично вимірюють місцеположення GNSS-антени та кути орієнтування INS відносно системи координат, що прийнята за інерціальну. В такому разі рівняння (1) модифікують для відображення складових, які визначають безпосередньо під час вимірювання.

У рівнянні (1) вектор  $\mathbf{T}_s^{SK}$  безпосередньо не вимірюють. З рис. 1 видно, що вектор  $\mathbf{T}_s^{SK}$  можна представити як суму векторів  $\mathbf{T}_{GNSS}^{SK} - \mathbf{T}_{INS/GNSS}^{SK} + \mathbf{T}_{INS/s}^{SK}$ . У цьому виразі  $\mathbf{T}_{GNSS}^{SK}$  – вектор координат GNSS-приймача;  $\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{SK}$  – вектор відхилення між фазовим центром GNSS-антени та математичним центром INS,  $\mathbf{T}_{INS/s}^{SK}$  – вектор відхилення між центром INS та центром фотографування цифрової камери. До того ж зауважимо, що матрицю повороту  $\mathbf{R}_s^{SK}$  можна представити як добуток двох послідовних поворотів з системи цифрової камери S до INS системи та з INS системи до прийнятої геодезичної системи SK. Остаточо рівняння визначення координат записують в такому вигляді:

$$\mathbf{T}_p^{SK} = \mathbf{T}(t)_{GNSS}^{SK} + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \left( \mathbf{T}_{INS/s}^{INS} - \mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS} + \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_p^s \right), \quad (2)$$

де  $\mathbf{T}_p^{SK}$  – вектор місцеположення точки, в геодезичній системі – **невідомий**;  $\mathbf{r}_p^s$  – вектор місцеположення точки на фотознімку – **вимірний**;  $\mathbf{T}(t)_{GNSS}^{SK}$  – вектор місцеположення GNSS-приймача – **вимірний** в геодезичній системі;  $\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}$  – матриця повороту з INS системи в SK геодезичну систему – **вимірня**;  $\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}$  – вектор відхилення між INS системою та S системою цифрової камери, визначений через **калібрування** в системі координат INS;  $\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}$  – вектор відхилення між INS системою та GNSS-антеною, визначений через **калібрування** в системі координат INS;  $\mu_s^{SK}$  – масштабний коефіцієнт між S системою камери та SK системою, **визначений** за допомогою стереовимірювань;  $\mathbf{R}_s^{INS}$  – матриця повороту між INS системою та S системою камери, визначена через **калібрування**.

Вираз  $\mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_p^s$  можна представити відомими рівняннями аналітичної фотограмметрії. Ці рівняння пов'язують виміряні координати на знімку з просторовими фотограмметричними координатами:

$$Y_p^s = \frac{B_t y_t}{P_t}; \quad X_p^s = \frac{B_t x_t}{P_t}; \quad Z_p^s = \frac{B_t f}{P_t}.$$

У цих рівняннях індекс  $t$  вказує на трансформовані значення базису, координат та повздовжнього паралакса. Відмінність цих рівнянь від класичних в тому, що кути в напрямних косинусах являють собою постійні величини для кожного моменту фотографування. Це кути розвороту між системою координат цифрової камери та системою координат, реалізованою за допомогою INS. Загалом величини цих кутів не перевищують 1-2°. У кінцевому вигляді рівняння (2) запишемо так:

$$\mathbf{T}_P^{SK} = \mathbf{T}(t)_{GNSS}^{SK} + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{T}_P^{INS}, \quad (3)$$

де  $\mathbf{T}_P^{INS} = \mathbf{T}_{INS/s}^{INS} - \mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS} + \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_P^s$ .

Аналізуючи рівняння (3), можна дійти таких висновків:

- точність знімання залежать від точності всіх складових вимірювальної системи, неможливо однозначно виділити групу похибок, що домінують;
- певна група похибок виникає через калібрування окремих зв'язків між вимірювальними елементами і має як випадковий, так і систематичний характер;
- у процесі використання вимірювальних систем, показання яких змінюються з часом, виникають похибки синхронізації.

Для того щоб врахувати всі джерела похибок та отримати рівняння похибок, скористаємося стандартною процедурою перетворення кореляційних матриць. За вихідне рівняння беремо вираз (3). Після певних перетворень отримаємо рівняння похибок у визначенні координат точок за матеріалами аерофотознімання з БПЛА у матричній формі.

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^{SK}} = & \mathbf{M}_{\mathbf{T}_{GNSS}^{SK}} + \frac{\partial(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{T}_P^{INS})}{\partial angle} \mathbf{M}_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}} \left( \frac{\partial(\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{T}_P^{INS})}{\partial angle} \right)^T + \\ & + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}} \left( \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}} \left( \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^{INS}} \left( \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T + \\ & + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \left[ \mathbf{v} + \omega(t) (\mathbf{T}_P^{INS}) \right] m_t^2 \left[ \mathbf{v} + \omega(t) (\mathbf{T}_P^{INS}) \right]^T \left( \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \right)^T \end{aligned} \quad (4)$$

Кореляційна матриця  $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^s}$  також може бути представлена як

$$\mathbf{M}_{\mathbf{T}_P^s} = (\mu_s^{SK})^2 \frac{\partial(\mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_P^s)}{\partial angle} \mathbf{M}_{\mathbf{R}_s^{INS}} \left( \frac{\partial(\mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{r}_P^s)}{\partial angle} \right)^T + (\mu_s^{SK})^2 \mathbf{R}_s^{INS} \mathbf{M}_{\mathbf{r}_P^s} \left( \mathbf{R}_s^{INS} \right)^T. \quad (5)$$

Таким чином, основними складовими рівняння похибок є такі кореляційні матриці:  $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_{GNSS}^{SK}}$  – матриця похибок визначення координат GNSS-приймачем;  $\mathbf{M}_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}}$  – матриця похибок вимірювання кутів орієнтування між INS системою та SK



системою;  $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}}$  – матриця похибок калібрування вектора між центром INS системи та центром фотографування;  $\mathbf{M}_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}}$  – матриця похибок калібрування вектора між центром INS системи та фазовим центром GNSS-антени;  $\mathbf{M}_{\mathbf{R}_s^{INS}}$  – матриця похибок калібрування кутів розвороту між осями системи координат INS та цифрової камери;  $\mathbf{M}_{\mathbf{r}_p^s}$  – матриця похибок вимірювання координат точки на знімку;  $m_t$  – похибка синхронізації GNSS та INS.

Рівняння впливу систематичних похибок отримаємо з рівняння (3) простим варіюванням.

$$\begin{aligned} \delta_{\mathbf{T}_P^{SK}} = & \delta_{\mathbf{T}(t)_{INS}^{SK}} + \mathbf{T}_P^{INS} \delta_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}} + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \delta_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}} - \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \delta_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}} + \\ & + \mathbf{R}(t)_{INS}^{SK} \delta_{\mathbf{T}_P^s} + \left[ v(t) + \omega(t) (\mathbf{T}_P^{INS}) \right] \delta_t \end{aligned} \quad (6)$$

Похибка  $\delta_{\mathbf{T}_P^s}$  також може бути представлена як

$$\delta_{\mathbf{T}_P^s} = \delta_{\mathbf{R}_s^{INS}} \left( \mu_s^{SK} \mathbf{r}_P^s \right) + \left( \mu_s^{SK} \mathbf{R}_s^{INS} \right) \delta_{\mathbf{r}_P^s}. \quad (7)$$

Отже, основними складовими рівняння систематичних похибок є такі:  $\delta_{\mathbf{T}(t)_{INS}^{SK}}$  – вектор систематичних похибок визначення координат INS;  $\delta_{\mathbf{R}(t)_{INS}^{SK}}$  – вектор систематичних похибок вимірювання кутів орієнтування між INS системою та SK системою;  $\delta_{\mathbf{T}_{INS/s}^{INS}}$  – вектор систематичних похибок вектора між центром INS системи та центром фотографування;  $\delta_{\mathbf{T}_{INS/GNSS}^{INS}}$  – вектор систематичних похибок вектора між центром INS системи та фазовим центром GNSS антени;  $\delta_{\mathbf{R}_s^{INS}}$  – вектор систематичних похибок кутів розвороту між осями системи координат INS та цифрової камери;  $\delta_{\mathbf{r}_P^s}$  – вектор систематичних похибок вимірювання координат точки на знімку;  $\delta_t$  – систематична похибка синхронізації GNSS та INS.

Рівняння (4) та (6) є основними в аналізі точності аерофотознімання з БПЛА. Для нас важливим є насамперед визначити очікувану точність визначення координат. Тому використаємо вираз (4) і виконаємо дослідження, як змінюється похибка визначення координат залежно від висоти фотографування та поздовжнього перекриття. Для дослідження візьмемо характеристики БПЛА та знімальної апаратури, наведені у таблиці.

Використаємо наведені в таблиці дані для побудови графіків зміни точності визначення місцеположення залежно від вказаних раніше характеристик.

Таблиця

## Параметри БПЛА та знімальної апаратури

Параметр	Величина
Розмір пікселя цифрової камери, мкм	5
Розмір матриці цифрової камери, пкс	7200x4800
Фокусна відстань, мм	15, 25, 35
Точність визначення планових координат центра проєкції, м	0,02
Точність визначення висотної координати центра проєкції, м	0,03
Точність визначення кутових елементів зовнішнього орієнтування, градус	0,01

Перш за все побудуємо графіки зміни роздільної здатності на місцевості. Всі подальші розрахунки виконано для трьох значень фокусної відстані 15 мм, 25 мм, 35 мм. Графіки зміни роздільної здатності на місцевості наведено на рис. 2.

Ці графіки використаємо у подальшому для порівняння з результатами попереднього розрахунку точності за отриманими строгими виразами. Скористаємося виразами (4), (5), виконуючи попередні розрахунки точності для різних значень висот фотографування та різної величини повздовжнього перекриття знімків. Результати розрахунків наведено на рис. 3-6.

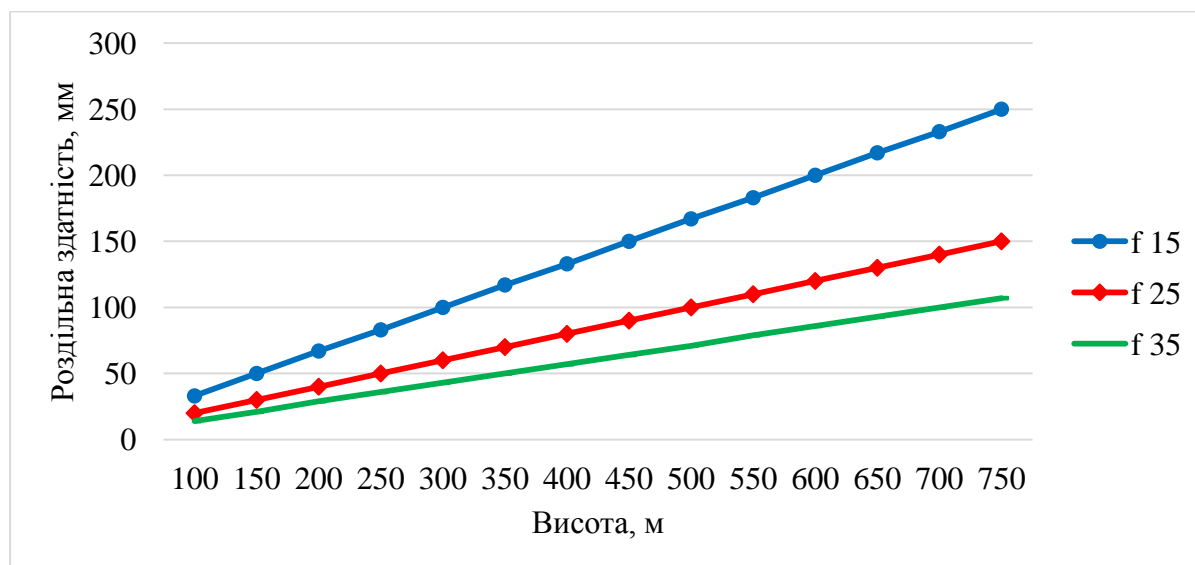


Рис. 2. Роздільна здатність на місцевості

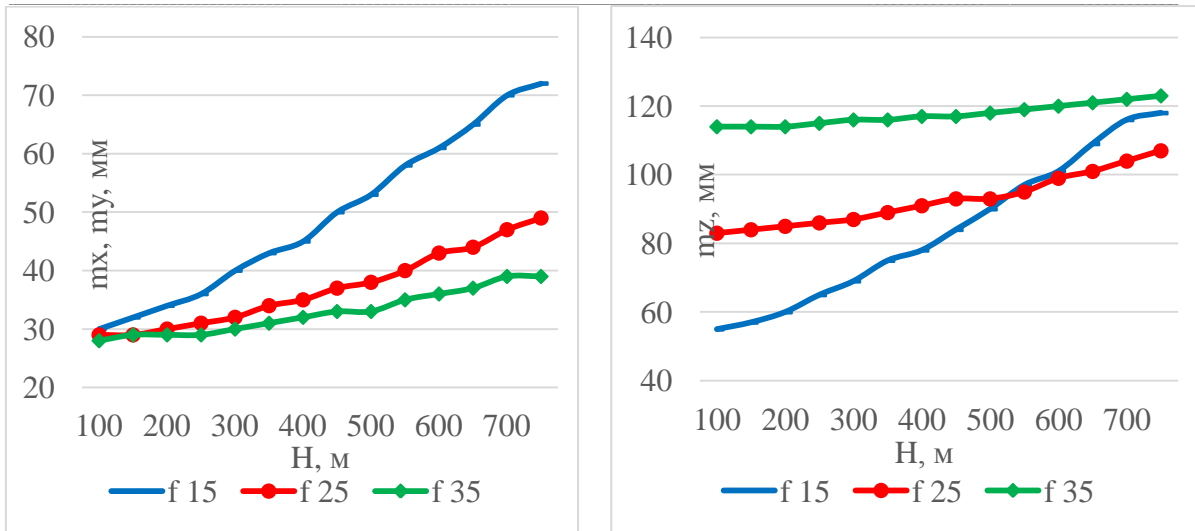


Рис. 3. Точність визначення координат (перекриття 60%)

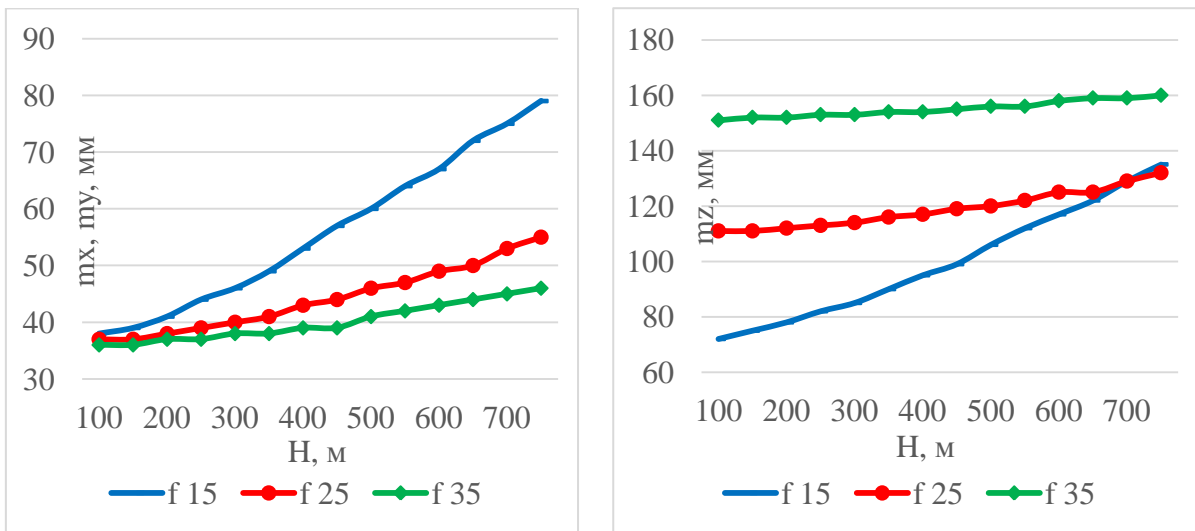


Рис. 4. Точність визначення координат (перекриття 70%)

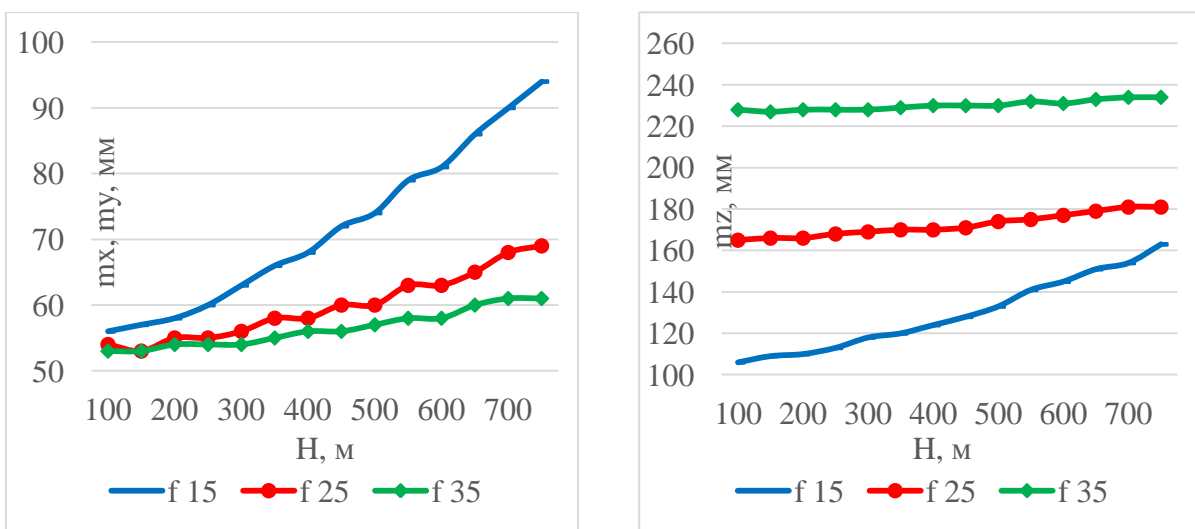


Рис. 5. Точність визначення координат (перекриття 80%)

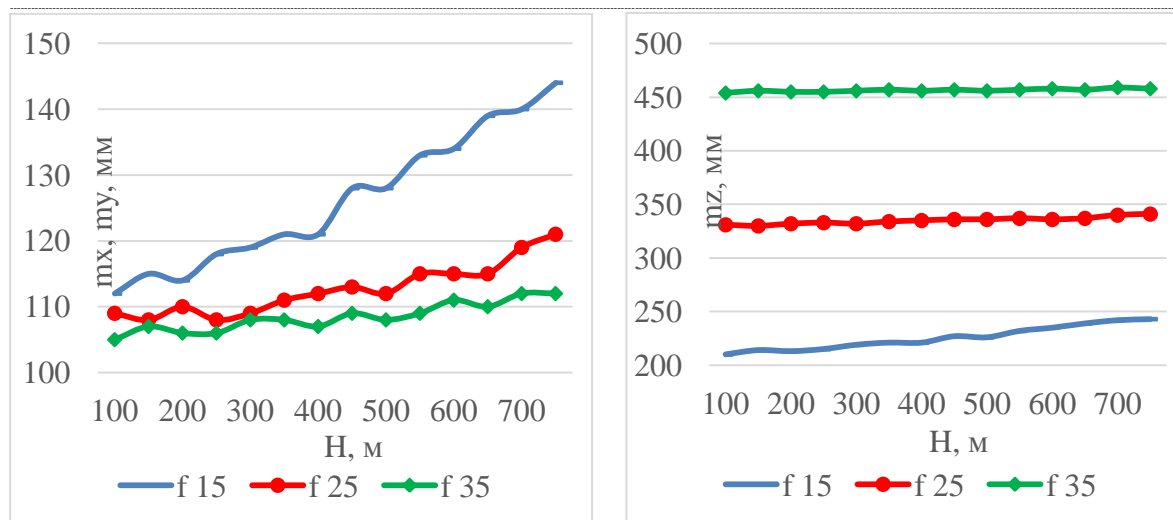


Рис. 6. Точність визначення координат (перекриття 90%)

Отримані результати доцільно проаналізувати з декількох позицій. Одразу зауважимо, що ототожнювання точності та роздільної здатності на місцевості є неприпустимими. Загалом для БПЛА, як і для традиційного аерофотознімання, залишається справедливою теза про доцільність використання короткофокусних камер з погляду точності визначення висотної складової, і навпаки, у визначенні планових координат доцільним є використання короткофокусних камер. При цьому точність планової складової змінюється за параболічним законом, а точність висотної складової – за лінійним законом. Важливим фактором є величина поздовжнього перекриття. Оптимальним для аерофотознімання з БПЛА є перекриття, що дорівнює 60% - 70%.

**Висновки.** У роботі отримано строгі математичні вирази для виконання розрахунку точності аерофотознімання з БПЛА. На підставі цих виразів виконано попередній розрахунок точності для знімання з БПЛА, що має типові характеристики для вирішення топографічних завдань. Досліджено характер зміни точності визначення планової і висотної складової залежно від висоти фотографування та величини поздовжнього перекриття. Результати цих досліджень можуть бути використані в проектуванні аерофотознімання з БПЛА. У подальших дослідженнях планується дослідити вплив похибок кутових елементів зовнішнього орієнтування та зміни перевищень між центрами фотографування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Ai, M. A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images [Text] / M. Ai, Q. Hu, J. Li, M. Wang, H. Yuan, S. Wang // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7 – P. 2302–2333. doi:10.3390/rs70302302.
2. Colomina, I. Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review [Text] / I. Colomina, P. Molina // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2014. – Vol. 92 – P. 79–97. dx.doi.org/10.1015/j.isprsjprs.2014.02.013.
3. Ellum, C. M. The Development of a Backpack Mobile Mapping System [Text]: A Thesis for the Degree of Master of Science / C. M. Ellum. – Calgary, 2001. – 172 p.

4. *El-Sheimy N.* The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Calgary. Department of Geomatics Engineering. Calgary, Alberta, September 1996, p. 198.
5. *Grejner-Brzezinska D.A.* High-Accuracy Direct Aerial Platform Orientation with Tightly Coupled GPS/INS System [Text]: Project / D.A. Grejner-Brzezinska, C.K. Toth. – Ohio Department of Transportation, Office of Aerial Engineering, Federal Highway Administration, 2004.
6. *Salytcheva, A.O.* Medium Accuracy INS/GPS Integration in Various GPS Environments [Text]: A Thesis for the Degree of Master of Science / A.O. Salytcheva. – Calgary, 2004. – 247 p.
7. *Secrets of UAV photomapping* [Електронний ресурс] / Режим доступу: [http://s3.amazonaws.com/DroneMapper\\_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf](http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf).
8. *Shin, E.-H.* Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation [Text]: A Thesis for the Degree Doctor of Philosophy / E.-H. Shin. – Calgary, 2005. – 206 p.
9. *Бекмачев А.* МЭМС-гироскопы и акселерометры Silicon Sensing: английские традиции, японские технологии [Текст] / А. Бекмачев // Компоненты и технологии. – 2014. – № 4. – С. 18–26.
10. *Беспилотные летательные аппараты: методика сравнительной оценки боевых возможностей* [Текст] / М.М. Митрахович, В.И. Силков, А.В. Самков и др.; под общ. ред. В.И. Силкова. – К.: ЦНИИ ВВТ ВС Украины, 2012. – 288 с.
11. *Дмитриенко А. Г.* Об исследовании возможности создания инерциальных модулей на основе отечественных технологий объемной микромеханики [Текст] / А. Г. Дмитриенко, А. А. Папко, С. И. Торгашин, И. В. Кирянина // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2013. – № 3(5). – С. 45–53.
12. *Желтова Н. Н.* Применение микромеханических гироскопов в навигационных системах [Текст] / Н. Н. Желтова, В. И. Обухов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2015. – № 1(108). – С. 269–273.
13. *Иноземцев Д.П.* Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 1. Обзор технических средств [Текст] / Д. П. Иноземцев // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2(49). – С. 50–54.
14. *Иноземцев Д.П.* Беспилотные летательные аппараты: теория и практика. Часть 1. Модель обработки аэрофотоснимков в среде AGISOFT PHOTOSCAN [Текст] / Д. П. Иноземцев // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3(50). – С. 48–51.
15. *Кобелев Г. П.* Применение беспилотных авиационных комплексов в картографических целях. [Текст] / Г. П. Кобелев, Д. В. Мишута, И. Б. Страшко // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 2(49). – С. 55–57.
16. *Костюк А. С.* Навигационное обеспечение аэрофотосъемки с беспилотных летательных аппаратов [Текст] / А. С. Костюк // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3(50). – С. 52–55.
17. *Курков В.М.* Опыт использования БЛА при проведении практики студентов на «Заокском полигоне» МИИГАиК [Текст] / В. М. Курков, А.В. Смирнов, Д.П. Иноземцев // Геопрофи. – 2014. – № 4. – С. 55–61.

18. Михайлов А.П. Еще раз о выборе цифровых фотокамер для выполнения аэрофотосъемки с беспилотных аппаратов / А.П. Михайлов // Тезисы 12-й Международной научно-технической конференции «От снимка к карте: цифровые фотограмметрические технологии», Альгарве, Португалия, 2012. – С. 34.

19. Сечин А.Ю. Беспилотный летательный аппарат: применение в аэрофотосъемке для картографирования [Текст] / А. Ю. Сечин, М.А. Дракин, А.С. Киселева // Автоматизированные технологии изысканий и проектирования. – 2013. – № 3(50). – С. 56–58.

20. Сысоева, С. Тенденции рынка High-end МЭМС-датчиков инерции. Новые уровни характеристик и исполнения [Текст] / С. Сысоева // Компоненты и технологии. – 2014. – № 6. – С. 40–46.

21. Шульц Р.В. Вплив похибок інерціального навігаційного комплексу на точність мобільного знімання [Текст] / Р.В. Шульц // Вісник геодезії та картографії. – 2003. – №4. – С. 42-46.

#### REFERENCES

1. Ai, M., Hu, Q., Li, J., Wang, M., Yuan, H., Wang, S. (2015). A Robust Photogrammetric Processing Method of Low-Altitude UAV Images. *Remote Sensing*, 7, 2302–2333. doi:10.3390/rs70302302.

2. Colomina, I., Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. dx.doi.org/10.1015/j.isprsjprs.2014.02.013.

3. Ellum, C. M. (2001). *The Development of a Backpack Mobile Mapping System*. Calgary, – 172 p.

4. El-Sheimy N. *The Development of VISAT – A Mobile Survey System for GIS Applications*. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy. The University of Calgary. Department of Geomatics Engineering. Calgary, Alberta, September 1996, p. 198.

5. Grejner-Brzezinska D.A., Toth C.K. (2004) *High-Accuracy Direct Aerial Platform Orientation with Tightly Coupled GPS/INS System*. Project, Ohio Department of Transportation, Office of Aerial Engineering, Federal Highway Administration.

6. Salytcheva, A.O. (2004). *Medium Accuracy INS/GPS Integration in Various GPS Environments*. Calgary, – 247 p.

7. *Secrets of UAV photomapping*: [http://s3.amazonaws.com/DroneMapper\\_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf](http://s3.amazonaws.com/DroneMapper_US/documentation/pteryx-mapping-secrets.pdf).

8. Shin, E.-H. (2005). *Estimation Techniques for Low Cost Inertial Navigation*. Calgary, – 206 p.

9. Bekmachev, A. (2014). MEMS-giroskopyi i akselerometryi Silicon Sensing: angliyskie traditsii, yaponskie tehnologii [MEMS gyroscopes and accelerometers Silicon Sensing: the British tradition, the Japanese technology]. *Journal Components and Technologies*, № 4, 18–26.

10. Silkov, V. I. ed. (2012). *Bespilotnyie letatelnyie apparaty: Metodika sravnitelnoy otsenki boevyih vozmozhnostey* [Unmanned Aerial Vehicles: Methods of comparative assessment of the combat capabilities]. Kiev: TsNII VVT VS Ukrainy, 288.

11. Dmitrienko, A. G., Papko A. A., Torgashin S. I., Kiryanina I. V. (2013) Ob issledovanii vozmozhnosti sozdaniya inertsiyalnyih moduley na osnove otechestvennyih tehnologiy ob'emnoy mikromehaniki [On the investigation of the possibility of creating inertial modules based on domestic technology bulk micromechanics]. Measurement. Monitoring. Management. Control, № 3(5), 45–53.
12. Zheltova, N. N., Obuhov V. I. (2015). Primenenie mikromechanicheskikh giroskopov v navigatsionnyih sistemah [Application of micromechanical gyroscopes for navigation systems]. Proceedings of the Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University, № 1(108), 269–273.
13. Inozemtsev, D.P. (2013) Bepilotnyie letalnyie apparaty: teoriya i praktika. Chast 1. Obzor tehniceskikh sredstv [Unmanned aerial vehicles: Theory and Practice. Part 1: Overview of hardware]. Automated technology research and design, № 2(49), 50–54.
14. Inozemtsev, D.P. (2013) Unmanned aerial vehicles: Theory and Practice. Part 1: Model processing of aerial photographs in the AGISOFT PHOTOSCAN AGISOFT PHOTOSCAN [Bepilotnyie letalnyie apparaty: teoriya i praktika. Chast 1. Model obrabotki aerofotosnimkov v srede AGISOFT PHOTOSCAN]. Automated technology research and design, № 3(50), 48–51.
15. Kobelev, G. P., Mishuta, D. V., Strashko, I. B. (2013) The use of unmanned aircraft systems in order to map [Primenenie bespilotnyih aviatsionnyih kompleksov v kartograficheskikh tselyah]. Automated technology research and design, № 2(49), 55–57.
16. Kostyuk, A.S. (2013) The navigation maintenance of aerial with unmanned aerial vehicles [Navigatsionnoe obespechenie aerofotos'emki s bespilotnyih letalnyih apparatov]. Automated technology research and design, № 3(50), 52–55.
17. Kurkov, V. M., Smirnov, A.V., Inozemtsev, D. P. (2014) Experience in the use of UAVs during practice for students to "Zaoksky polygon" MIIGAiK [Opyit ispolzovaniya BLA pri provedenii praktiki studentov na «Zaokskom poligone» MIIGAiK]. Geoprofi, № 4, 55–61.
18. Mihaylov, A.P. (2012) Again about the choice of digital cameras to perform aerial survey with unmanned vehicles [Esche raz o vyibore tsifrovyyih fotokamer dlya vyipolneniya aerofotos'emki s bespilotnyih apparatov]. Proceedings the 12th International Scientific and Technical Conference "From imagery to map: digital photogrammetric technologies", Algarve, Portugal, 34.
19. Sechin, A. Yu., Drakin, M.A., Kiseleva, A.S. (2013) UAV: used in aerial photography for mapping [Bepilotnyiy letatelnyiy apparat: primeneniye v aerofotos'emke dlya kartografirovaniya]. Automated technology research and design, № 3(50), 56–58.
20. Syisoeva, S. (2014). Tendentsii ryinka High-end MEMS-datchikov inertsi. Novyie urovni harakteristik i ispolneniya [Trends High-end MEMS inertial sensors. New levels of performance and characteristics]. Journal Components and Technologies, № 6, 40–46.
21. Shul'cz, R.V. (2003) Effect of error of inertial navigation system on mobile mapping accuracy [Vplyv poxybok inercialnogo navigacijnogo kompleksu na tochnist mobil'nogo znimannya]. Journal of Geodesy and Cartography, №4, 42-46.

**Р. В. Шульц,  
С. П. Войтенко,  
П. Д. Крельштейн,  
И. А. Малина,**

### **К ВОПРОСУ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КООРДИНАТ ТОЧЕК ПРИ АЭРОФОТОСЪЕМКЕ С БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*В работе рассмотрены вопросы выполнения предварительного расчета точности определения координат точек по материалам аэрофотосъемки с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Приведена математическая модель определения координат по паре аэрофотоснимков. Математическая модель учитывает использование данных GNSS для определения координат центров фотографирования и корректировки инерциальной навигационной системы (INS). Угловые элементы внешнего ориентирования в приведенной математической модели определяются с помощью INS. С использованием алгоритма преобразования корреляционных матриц получено строгое выражение для выполнения предварительного расчета точности. Методом варьирования получено выражение для расчета влияния систематических погрешностей. По полученным выражениям выполнено исследование априорной точности определения координат для различных условий аэрофотосъемки. В качестве эксперимента была рассчитана точность аэрофотосъемки для БПЛА с типичными характеристиками, которые используются для создания топографических карт и планов.*

**Ключевые слова:** беспилотный летательный аппарат, расчет точности, инерциальная навигационная система, корреляционная матрица, аэрофотосъемка.

**R.V. Schultz,  
S.P. Voytenko,  
P.D. Krelshteinn,  
I.A. Malina**

### **THE ISSUE OF CALCULATING POINTS POSITIONING ACCURACY FOR AERIAL PHOTOGRAPHS FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES**

*The paper discusses the questions of preliminary accuracy calculation of the points coordinates on aerial photographs using unmanned aerial vehicles (UAVs). The mathematical model for determining the point coordinates of a pair of aerial photos are presented. The mathematical model takes into account the use of GNSS data to determine the coordinates of the photographing centers and correction of inertial navigation system (INS). The angular exterior orientation in the above mathematical model determined by INS. The main factors that effect on the accuracy of aerial photography are discussed. Using the algorithm for converting the correlation matrices obtained strict expression to perform preliminary accuracy calculation. By the method of variation, the expression obtained for calculation of the effect of systematic errors. The obtained expressions used to study a priori accuracy of the coordinates for different aerial survey conditions. Accuracy of aerial photography for a variety of shooting options are researched. Preliminary accuracy are researched for different heights of photographing and longitudinal overlapping. As an experiment, it was calculated for the accuracy of UAV with typical characteristics are used to create topographic maps and plans. These expressions better able to carry out the design of aerial photography with the help of UAV.*

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, accuracy calculation, inertial navigation system, correlation matrix, aerial photography.



## ДО ВІДОМА АВТОРІВ

### Вимоги до оформлення матеріалів, які подаються до науково-технічного збірника «Інженерна геодезія»

У науково-технічному збірнику «Інженерна геодезія» публікуються статті, які становлять науковий і практичний інтерес.

Статті подаються українською, російською або англійською мовами, підписані кожним з авторів.

Відповідно до постанови ВАК України від 15.01.2003 №7-05/1 **наукові статті мають містити такі елементи:** постановку проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями; аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання певної проблеми і на які спирається автор; виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, висвітлених у статті; формулювання мети статті: виклад основного матеріалу дослідження з докладним обґрунтуванням отриманих наукових результатів; висновки за результатами дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі.

**До статті додаються:** відомості про авторів (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, звання, місце роботи, посада, службова адреса, адреса електронної пошти та контактні телефони).

### ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

- До розгляду приймають статті, надруковані в одному примірнику на аркушах паперу формату А4 (текст, таблиці, бібліографію друкувати так: поля зверху, знизу та праворуч – 20 мм, зліва – 25 мм; інтервал «Множитель» 1,15; кегль 12; розмір шрифту анотації – 12; шрифт Times New Roman). Обов'язково слід подати електронну копію статті у форматі Microsoft Word (\*.doc).
- Рекомендується, щоб площа, зайнята рисунками, становила 20-25% загального обсягу статті. Всі рисунки слід подавати чорним кольором та обов'язково з підписами.
- На першій сторінці статті у лівому верхньому куті ставиться УДК ..., а праворуч, рядком нижче, вказують ініціали та прізвище автора (грубим шрифтом) разом з інформацією про автора (науковий ступінь, звання, місце роботи, посада), нижче по центру – назва статті грубими великими буквами, потім анотація (мовою статті) курсивом, далі сам текст.
- Обсяг **анотації** українською та російською мовами становить 50 – 100 слів, англійською – 150 – 200 слів. Після кожної анотації наводять ключові слова у називному відмінку мовою анотації через кому (не менше трьох слів кожною мовою).
- Текст статті має містити розділи із заголовками: **«Вступ»**, **«Аналіз досліджень і публікацій»**, **«Постановка завдання»**, **«Основна частина»**, **«Висновки»**, **«Список літератури»**.
- Список літератури слід виділяти підзаголовком **«Список літератури»** та оформити згідно з міждержавним стандартом ДСТУ ГОСТ 7.1:2006.
- Окремим блоком слід навести всі бібліографічні посилання (**References**) англійською мовою з транслітерацією оригінальних назв у романському алфавіті (латиницею). Транслітерація, залежно від мови оригіналу джерела, виконується відповідно до постанови Кабінету Міністрів України від 27 січня 2010 року № 55 «Про впорядкування транслітерації українського алфавіту латиницею» (для української мови) або вимогам BGN/PCGN (для російської мови). Для оформлення списку літератури англійською мовою слід застосовувати стиль APA ([www.apastyle.org/](http://www.apastyle.org/)).
- Після списку літератури до статті додають двома мовами **анотацію українською (російською)** та **анотацію (Abstract)** англійською мовою (розширену, структуровану за текстом статті). Кожна анотація супроводжується назвою статті та прізвищами авторів мовою анотації.
- Заповнення останньої сторінки повинно бути не менш як 80%.

Наукове видання

# ІНЖЕНЕРНА ГЕОДЕЗІЯ

НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЗБІРНИК

Випуск 62

Редагування та коректура *Г.В. Кобриної*

Комп'ютерне верстання *І. С. Аршинкіної*

Дизайн обкладинки: *В.С. Стрілець*  
*Д.В. Горковчук*

Підписано до друку 25.12.2015. Формат 60 × 84 <sup>1/16</sup>  
Ум. друк. арк. 15,34. Обл.-вид. арк. 16,5.  
Тираж 200 прим. Вид. № 10/П-14. Зам. №

Видавець і виготовлювач

Київський національний університет будівництва і архітектури

Повітрофлотський проспект, 31, Київ, Україна, 03680

E-mail: red-isdar@ukr.net, тел. (044)241-54-22, 241-54-87

Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
Видавничої справи ДК № 808 від 13.02.2002 р.