

УДК 528.3

ОСОБЛИВОСТІ ЗАГАЛЬНОГО ВИРІВНЮВАННЯ ДЕРЖАВНОЇ ГЕОДЕЗИЧНОЇ МЕРЕЖІ УКРАЇНИ

І. Заєць

Департамент топографо-геодезичної і картографічної діяльності
Державного агентства земельних ресурсів України

Ключові слова: геодезична мережа, вирівнювання, метод найменших квадратів.

Постановка проблеми

Вирівнювання великої геодезичної мережі, якою є Державна геодезична мережа (ДГМ) України, належить до складних задач як в теоретичному, так і у практичному плані.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, які стосуються вирішення цієї проблеми

Ще у середині 70-х років ХХ ст. у більшості провідних країн світу розпочалися заходи з модернізації геодезичних мереж. Основними причинами, що спонукали до цих заходів, були [9]:

- проблеми в урівнюванні великих астрономо-геодезичних мереж, спричинені тодішнім станом обчислювальної техніки та незавершеністю побудови геодезичних мереж;
- значні локальні та регіональні спотворення через помилки редукування результатів вимірювань на поверхню еліпсоїда, методичні та технологічні помилки процесів вимірювань;
- недосконалість метрологічного забезпечення тощо.

На той час інтенсивно розроблялися підходи до удосконалення методів побудови геодезичних мереж, зокрема і з використанням космічних технологій, спрямовані на модернізацію геодезичних систем координат. Так, наприклад, роботи з перевирівнювання Американської мережі, координати якої визначено у системі NAD27, почалися у 1975 р. Нову систему NAD83 отримано з урівнювання 250 тис. пунктів (це більше як 1,75 млн. спостережень) в різних частинах США, Канади, Гренландії, Мексики, Центральної Америки та Карибів [3].

На основі наземних (класичних) та супутникових спостережень заново вирівнювано єдину геодезичну мережу країн Західної Європи, що привело до утворення геоцентричної системи координат ED87.

У 1983 р. проведено чергове урівнювання Східноєвропейської об'єднаної астрономо-геодезичної мережі, яке дало змогу утворити єдиний координатний простір країн колишньої Ради економічної взаємодопомоги.

У 80-ті роки ХХ ст. планувалося провести загальне вирівнювання астрономо-геодезичної мережі (АГМ) СРСР, побудованої класичними геодезичними технологіями, оскільки геодезична мережа СРСР свого часу була вирівнювана блоками (через нерівномірність її побудови у часі та просторі). Проте виконати цей задум тоді так і не вдалося. Лише на

початку 90-х років ХХ ст. вже Росія прийняла і втілила в життя рішення про загальне вирівнювання геодезичної мережі на всій пострадянській території. У результаті такого спільного вирівнювання отримано референцну систему координат СК-95. Точність визначення взаємного планового положення пунктів, отримана з остаточного вирівнювання АГМ на епоху 1995 р., характеризується середніми квадратичними похибками 2–80 см залежно від відстані між пунктами [1].

Отриману систему координат СК-95 у Росії досить серйозно критикувала наукова громадськість, проте з 2002 р. її введено як офіційну державною постановою.

Використання наприкінці ХХ ст. астрономо-геодезичних, супутникових даних, даних світового гравіметричного знімання і планетарних характеристик геопотенціалу уможливили високоточне визначення положення центра референц-еліпсоїда щодо центра маси Землі й орієнтування його осей у тілі Землі без визначення яких-небудь вихідних геодезичних дат. Тобто з появою супутникових технологій визначення місцеположення змінилася і технологія встановлення систем координат та побудови геодезичних мереж. Системи координат стали глобальними за природою, тобто загальноземними і геоцентричними. Всі ефекти, пов'язані негеоцентричністю, геодинамічними процесами, нерівномірністю обертання Землі тощо, тією чи іншою мірою почали враховувати.

Проблемою на шляху забезпечення спадкоємності традиційних, хоч і реконструйованих, координатних систем стала невідповідність у точностях побудови геодезичних мереж класичними і супутниковими технологіями. Одними з перших це відчули американські спеціалісти на прикладі нової Північноамериканської мережі. У 1987–1997 рр. Національна геодезична служба (NGS) за підтримки федерацій, штатів та локальних геодезичних служб провела переспостереження геодезичної мережі території США, використовуючи методи GPS та створюючи високоточні референцні мережі (High Accuracy Reference Networks (HARNs)). Внаслідок цього координати референцної системи NAD83, основані на мережі HARN, змінилися від 0.2 до 1.0 м відносно вирівнюваних у 1986 р. Безперервнн вдосконалення у технологіях GPS та створення постійнодіючих мереж GPS-станцій, а також структуровані вимоги користувачів до просторових даних потребували переходу до вдосконаленої глобальної референцної реалізації, яка базується на загальноземній концепції.

Ідея позбутися тягаря традиційних референсних систем, що асоціювалася з негомогенністю побудованих класичними технологіями геодезичних мереж (їх дисторсією), дуже приваблювала фахівців, особливо пов'язаних з фундаментальними дослідженнями у галузі наук про Землю. Проти такого кроку почали виступати спеціалісти, що займалися практичними питаннями у галузі топографо-геодезичного виробництва, картографування, земельного кадастру, ГІС, оборонного комплексу. Для них важливими були питання використання сучасних вимірювальних технологій без суттєвих змін координатної основи, адже втрачався взаємозв'язок з раніше напрацьованим матеріалом.

У цей час інтенсивно почали використовувати GPS-спостереження з метою визначення координат пунктів геодезичної мережі у загальноземній референсній системі WGS84. Характерною особливістю того періоду було те, що паралельно з розвитком та розширенням географії супутникових спостережень проходило становлення земної референсної системи ITRS з її реалізаціями ITRF88... ITRF2008 та ETRS89.

Проведення цілого ряду EUREF GPS-кампаній у період з 1989 р. і до 1997 р. мало за мету фактично територіальне згущення європейської супутникової мережі, що приводило до нових реалізацій референсної системи ETRS89. Паралельно з цим проходив етап становлення європейської перманентної мережі EPN, що згодом стала основним каркасом системи ETRS89. Національні етапи у становленні референсної системи ETRS89 закінчилися в основному до 2000 р. Реалізатором цієї референсної системи стали перманентні GPS-станції, кількість яких щороку збільшувалася і на кінець 2012 р. досягла 244.

Тож десь на кінець 2000 р. більше не було потреби долучати дані GPS-спостережень, виконаних на пунктах національних геодезичних мережах, до реалізації системи ETRS89. Методика проведення і програма спостережень та результати опрацювання у межах окремих GPS-кампаній лише погоджувалися з адміністративними органами EUREF і використовувалися вже у національних програмах. Таким шляхом вже пройшла більшість європейських країн.

Програмою топографо-геодезичного та картографічного забезпечення України, прийнятою у 1998 р., вперше було передбачено розробити проект Постанови Кабінету Міністрів про встановлення основних вихідних геодезичних параметрів для території України у [2]. Того ж року прийнято "Основні положення про створення ДГМ України" [10], де зазначено, що на перехідний період координати пунктів геодезичної мережі потрібно обчислювати у референсній системі 1942 р., а нова геодезична система вводиться в дію відповідним рішенням Кабінету Міністрів.

Нова концепція побудови геодезичної референсної системи координат, спрямована на реалізацію національної системи відліку, забезпечення функціонування та розвитку Державної геодезичної мережі з метою створення сучасної інфраструктури геопросторових даних для інтеграції України у міжнародні та

європейські структури, неодноразово обговорювалася та була схвалена Науково-технічною радою Укргеодезкартографії. Одним із пунктів цієї концепції і передбачалося загальне вирівнювання Державної геодезичної мережі України.

Постановка завдання

Одним з найактуальніших завдань є побудова національних високоточних геодезичних мереж у єдиній системі координат. У статті розглянуто питання загального вирівнювання ДГМ України 1, 2, 3 та 4 класів у геодезичній референсній системі координат України УСК-2000.

Виклад основного матеріалу

Державна геодезична мережа України побудована відповідно до вимог [2], а також "Основних положень про державну геодезичну мережу СРСР" 1954–1961 рр. і об'єднувала: 1) Українську постійнодіючу мережу спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС); 2) геодезичну мережу 1 класу, побудовану супутниковими методами; 3) заповнюючі мережі триангуляції і полігонометрії 2 класу; 4) геодезичні мережі згущення 3 і 4 класів.

Класична Державна геодезична мережа, побудована на території України традиційними геодезичними технологіями, має такі показники: а) точність вимірювань горизонтальних кутів у мережах 1, 2, 3 та 4 класів, обчислена за нев'язками трикутників, характеризується середньоквадратичними похибками 0.64", 0.83", 1.19" і 1.54" відповідно, а точність кутових вимірювань, обчислена за нев'язками замкнених фігур у полігонометрії, дорівнює 1.4" і 1.7" відповідно для мереж 3 і 4 класу; б) точність лінійних вимірювань у геодезичній мережі згущення 3 і 4 класів характеризується відносними середньоквадратичними похибками 1:46 000 – 1:158 000 та 1:46 000 – 1:130 000 відповідно; в) точність визначення взаємного положення пунктів ДГМ характеризується середньоквадратичною похибкою 0,196 м.

На території України побудована Українська постійнодіюча мережа спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС) із 17 пунктів.

За результатами опрацювання даних спостережень отримані такі характеристики постійнодіючої GPS-мережі України:

– середня квадратична похибка взаємного положення пунктів мережі $\pm 1 - \pm 2$ см;

– середня квадратична похибка узгодження із загальноземною системою ITRF2000 на епоху 2005 становить $\pm 1 - \pm 2$ см.

Схема УПМ ГНСС, побудованої за проектом EUREF-UKR95 [5], наведена на рис. 1. У 2004 р. виконано спостереження на всіх пунктах УПМ ГНСС у межах проекту з побудови Державної геодезичної мережі 1 класу для впровадження високоточної референсної системи координат УСК2000, яка створювалася в Україні згідно з "Державною науково-технічною програмою розвитку топографо-геодезичної діяльності та національного картографування на 2003–2010 роки", затвердженої Постановою Кабінету Міністрів України

№ 37 від 16 січня 2003 р., та Постанови Кабінету Міністрів України № 1259 від 22 вересня 2004 р. “Деякі питання застосування геодезичної системи координат”.

Для створення геодезичної мережі 1-го класу, на якій мали відбуватися супутникові спостереження, було відібрано 760 пунктів нинішньої Державної геодезичної мережі 1 та 2 класів.

Щільність пунктів ДГМ-1 становила один пункт на 1000–1300 км².

Схему створення супутникової геодезичної мережі 1 класу на території України наведено на рис. 2.

За результатами опрацювання даних супутникових спостережень отримано такі характеристики геодезичної мережі 1-го класу:

– середня квадратична похибка взаємного положення пунктів мережі $\pm 1 - \pm 2$ см;

– середня квадратична похибка узгодження із загальноземною системою ITRF2000 на епоху 2005.0 становить $\pm 1 - \pm 2$ см.

Загальна характеристика виконаних у 1995–2005 рр. супутникових радіонавігаційних спостережень наведена у табл. 1.

Таблиця 1

Перелік об’єктів, на яких виконано супутникові радіонавігаційні спостереження

Номер роботи	Шифр об’єкта	Назва району робіт	Назва організації, що виконала роботи, рік виконання	Статус мережі	Кількість пунктів
1	EUREF-UKR95	Україна	УкрДАГП*, 1995	УПМ ГНСС	16
2	ДАГ.01.0001	Україна	УкрДАГП, 2000	1 клас	43
3	ДАГ.01.0031	Україна	УкрДАГП, 2001	УПМ ГНСС	16
4	ДАГ.01.07.0060-II	Українсько-молдовський кордон	УкрДАГП, 2003	1 клас	15
5	НДІ.01.0360	ДГМ України	НДІГК**, 2004-2005	УПМ ГНСС Перманентні станції 1 клас	17 3 760

* Українське державне аерогеодезичне підприємство.

** Науково-дослідний інститут геодезії і картографії.

У НДІГК зібрано дані про пункти Державної геодезичної мережі, а саме назви пунктів, їх клас, тип закладених центрів та встановлених знаків, рік виконання робіт, назви організацій, що їх виконали. Дані зібрано із 153 каталогів геодезичних пунктів у системі координат СК-42, які складені на аркушах карт масштабу 1:200 000 на території України. Такі дані отримано на 21 768 пунктах Державної геодезичної мережі 1, 2, 3, 4 класів. До цих даних було долучено ще 1 739 пунктів геодезичної мережі 2, 3, 4 класів, які не увійшли у зазначені каталоги, оскільки роботи на них були завершені дещо пізніше, а також приблизно 1200 пунктів, визначених у різні роки, переважно в кінці ХХ ст. на окремих об’єктах [4, 5].

Для проведення робіт зі збирання та оформлення даних про лінійно-кутові вимірювання на пунктах ДГМ всю мережу України було поділено на декілька великих регіонів. Розмежування виконувалося по рамках трапецій масштабу 1:1 000 000.

Для автоматизованого опрацювання інформації про виміри введено єдину систему індексації пунктів ДГМ. Кожному пункту присвоєний унікальний десятизначний індекс, в якому враховується приналежність пункту трапеції масштабу 1:200 000 і класу геодезичної мережі, наприклад: M362210010, де

M36 – номенклатура трапеції масштабу 1:1 000 000;

22 – номер трапеції масштабу 1:200 000;

1 – клас пункту;

001 – номер пункту певного класу на трапеції масштабу 1:200 000;

0 – номери пунктів супутників, знесених центрів.

Інформацію для банку геодезичних даних сформовано за такими масивами інформації:

– інформація про роботи, яка містить дані, що необхідні для складання пояснень до каталогів та введення довідкової інформації;

– описова інформація про пункти, потрібна для складання каталогів координат геодезичних пунктів;

– інформація про вимірювання на пункті, необхідна для вирівнювання ДГМ та складання каталогів координат геодезичних пунктів.

За вихідні пункти для вирівнювання ДГМ 1, 2, 3 та 4 класів прийнято пункти УПМ ГНСС та супутникової геодезичної мережі 1 класу, які суміщені в плановому положенні з пунктами ДГМ. У табл. 2 наведено загальну статистику таких вихідних пунктів.

Просторові координати пунктів та середні квадратичні похибки їх визначення, обчислені в процесі виконання робіт у системі ITRS/ITRF2000 на епоху 2005.0, були трансформовані у систему координат УСК-2000 за заданими параметрами зв’язку.

Трансформування між просторовими координатами референцних систем ITRS/ITRF2000 та УСК-2000 виконано із застосуванням стандартного алгоритму Гельмерта лише за трьома параметрами, оскільки решта параметрів трансформування, згідно із умовами розробки УСК-2000, дорівнюють нулю [12].

Таблиця 2

Вихідні пункти для вирівнювання ДГМ України

УПМ ГНСС (постійнодіючі станції)	12 станцій
УПМ ГНСС (пункти періодичних спостережень)	4 пункти
Пункти супутникової мережі 1 класу	813 пунктів
Загалом	839 пунктів

Оскільки пункти УПМ ГНСС та супутникової мережі 1 класу використано як вихідні для вирівнювання ДГМ, то для їх коректного використання було проведено дослідження щодо суміщення центрів пунктів, до яких віднесені GPS-спостереження, і центрів пунктів існуючої ДГМ, до яких віднесені лінійно-кутові вимірювання. Дослідження виконувались за різницями координат суміщених пунктів у системі УСК-2000 та у системі СК-42. Побудовано поле різниць координат вихідних пунктів Δx і Δy , кожне поле різниць координат візуалізовано через ізолінії різниць координат з перерізом 0,1–0,2 м. Всі пункти, на яких було виявлено “аномалію” поля, детально проаналізовано на предмет типів центрів, збігу номерів марок тощо, після чого приймалося рішення про відбракування таких пунктів, як ненадійно суміщених або грубо суміщених у плані. Ретельніша перевірка коректності планового суміщення виконана під час апробації мережі – за величинами поправок у координати вихідних пунктів та наявністю при цьому великих значень поправок у прилеглі кути та сторони. Так було відбраковано 13 пунктів.

Вирівнюючи геодезичні мережі безпосередньо за результатами вимірювань, необхідно ввести поправки, які враховують незбіг нормалей до референц-еліпсоїда і прямовисних ліній, а також поправки за висоту над поверхнею референц-еліпсоїда. Для обчислення цих поправок необхідно знати складові астрономіо-геодезичних відхилень прямовисної лінії та геодезичні висоти.

Обчислення складових прямовисних ліній на пунктах ДГМ було виконано ще у 1985–1987 рр. відповідно до плану заходів вирівнювання АГМ СРСР. У результаті виконаних робіт визначено складові відхилень прямовисних ліній ξ^{az} , η^{az} на пунктах ДГМ у системі СК-42 та внесено в банк геодезичних даних [11].

Оскільки за умовами моделювання референцної системи УСК-2000 зміни в її координатах відносно координат системи СК-42 не перевищують 3 м, що становить у дуговій мірі $0''.1$, то така зміна у складових ξ^{az} , η^{az} практично не впливає на величини поправок у кутові виміри [13].

Під час моделювання системи координат УСК-2000 було змінено орієнтацію референц-еліпсоїда Красовського в тілі Землі, що привело до змін висот квазігеоїда до 7–8 м. Тому для редукування лінійних вимірів використано карту висот квазігеоїда у системі УСК-2000.

Для розроблення такої карти побудовано локальну модель квазігеоїда для території України, яка отримала назву UG2006. Середня точність визначення висот цього квазігеоїда досягає 7 см [8].

Загалом зазначено, що використання супутникової мережі 1 класу із середніми сторонами 30–45 км дало змогу виключити чи суттєво послабити вплив складових відхилень прямовисних ліній та аномалій висот на результати лінійно-кутових вимірів ДГМ.

Подальші кроки на шляху вирівнювання ДГМ пов'язані із проведенням досліджень на сумісність

різних типів геодезичних вимірів і вихідних даних, а також наявність всіх геодезичних зв'язків між пунктами.

Дослідження даних і апробацію геодезичних мереж виконували з метою перевірки сумісності різних типів геодезичних вимірів та вихідних даних.

Під час перевірки даних і апробації ДГМ виконано такі процеси:

- перевірка коректності схеми геодезичної мережі, тобто наявності пунктів та повноти вимірів між суміжними геодезичними пунктами;

- перевірка суміщення центрів на вихідних пунктах та пунктах ДГМ 1, 2, 3, 4 класів, на яких виконано спостереження в різних групах на різних об'єктах;

- обчислення величин вільних членів та їхніх допустимих значень у триангуляції і полігонометрії;

- порівняння вимірних кутів з обчисленими;

- визначення грубих похибок вимірювань за поправками, отриманими з першої ітерації;

- контроль якості вихідних пунктів;

- апробація за значеннями поправок у виміряні величини;

- перевірка гіпотези про нормальний закон розподілу вимірних величин.

Всі перевірки виконано за результатами локального вирівнювання, в межах однієї чи кількох трапецій масштабу 1:200 000, за вибраними із банку даних пунктами та вимірами на них, на основі пунктів супутникової мережі 1 класу, які приймалися за вихідні.

Перевірка схеми геодезичної мережі виконувалась для встановлення повноти геодезичних пунктів мережі, наявності всіх геодезичних зв'язків (горизонтальних напрямків, ліній) між пунктами.

Перевірка виконувалась за схемами геодезичних мереж масштабу 1:200 000. З банку геодезичних даних були вибрані всі геодезичні пункти та виміри на них по трапеціях масштабу 1:200 000. За незначної кількості пунктів вибірка виконувалась по здвоєних трапеціях з перекриттям між трапеціями на 1' (близько 20 км), при великій кількості пунктів вибірка виконувалась по одній трапеції з необхідним перекриттям.

У результаті перевірки мережі для кожної трапеції складено коректурний лист, в якому вказано всі елементи мережі, яких немає, а потім внесено необхідні зміни в банк геодезичних даних.

Перед виконанням власне вирівнювання мережі необхідно попередньо обчислити значення вільних членів та перевірити на їх допустимість. Для попереднього опрацювання лінійно-кутову мережу на цьому етапі було розділено на триангуляцію і полігонометрію.

Перевірку виконано по трапеціях масштабу 1:200 000. З банку геодезичних даних вибрано всі геодезичні пункти та виміри на них по трапеціях масштабу 1:200 000, за незначної кількості пунктів вибірку виконано по здвоєних трапеціях з перекриттям між трапеціями на 1', а за великої кількості пунктів вибірку виконано по одній трапеції з необхідним перекриттям.

Надалі обчислено нев'язки по трикутниках за вимірними кутами $\omega = \Sigma\beta - (180 + \varepsilon)$, де $\Sigma\beta$ – сума вимірних кутів у трикутнику; ε – сферичний надлишок трикутника.

За нормального закону розподілу похибок 67 % нев'язок повинні міститися в інтервалі від 0 до $m''\sqrt{3}$, 95 % – від 0 до $2,5m''\sqrt{3}$ і допускаються тільки три похибки з тисячі, що дорівнюють $3,5m''\sqrt{3}$.

Середню квадратичну похибку виміряного кута обчислювали за нев'язками трикутників $m = \sqrt{\frac{\Sigma\omega^2}{3n}}$,

де $\Sigma\omega^2$ – сума квадратів нев'язок трикутників, n – кількість нев'язок трикутників.

Якщо в якомусь трикутнику нев'язка перевищувала допустиму, то групи спостережень, які утворюють цей трикутник, не допускалися до загального вирівнювання, поки не були виявлені та виключені причини цих помилок.

У разі побудови мережі методом полігонометрії граничні допуски кутових нев'язок не повинні перевищувати значень, отриманих за формулою $\omega_{гран} = \pm 2,5\sqrt{m^2n + 2m_a^2}$, де m – середня квадратична похибка вимірювання кута, яка встановлюється інструкцією для класу полігонометрії; m_a – середня квадратична похибка вихідного азимуту; n – кількість кутів у передачі азимуту.

Для оцінки результатів кутових вимірів полігонометрії обчислювали кутову нев'язку ходу за формулою $\omega_\beta = \Sigma\beta - 180^\circ(n - 2)$, де $\Sigma\beta$ – сума всіх лівих по ходу кутів полігона; n – кількість кутів полігона.

Для ходу, який спирається на дві тверді сторони $\omega_\beta = \alpha_o - \alpha_n + \Sigma\beta - 180^\circ(n - 1)$, де α_o, α_n – вихідні дирекційні кути, відповідно на початковому та кінцевому пункті ходу; $\Sigma\beta$ – сума всіх лівих по ходу кутів ходу; n – кількість всіх кутів ходу.

На основі цих нев'язок обчислювали середню квадратичну похибку виміряного кута. Для одинарного ходу чи полігона і для мережі з вузловими пунктами відповідно

$$m_\beta = \pm\sqrt{\frac{\omega_\beta^2/n}{N}}, \quad m_\beta = \pm\sqrt{\frac{\omega_\beta^2/n}{N - K}},$$

де N – число ходів (полігонів); K – кількість вузлових пунктів.

Для оцінки точності лінійних вимірів у ходах і полігонах полігонометрії обчислювали нев'язки в координатах ω_x, ω_y та абсолютну нев'язку ходу ω_{xy} . Лінійні нев'язки ω_x, ω_y та ω_{xy} обчислювали за формулами:

$$\omega_x = \sum_1^n \Delta x - (x_k - x_n); \quad \omega_y = \sum_1^n \Delta y - (y_k - y_n);$$

$$\omega_{xy} = \pm\sqrt{\omega_x^2 + \omega_y^2},$$

де $\Delta x, \Delta y$ – прирости координат, x_n, y_n – координати початкового вихідного пункту, x_k, y_k – координати кінцевого вихідного пункту, n – кількість вимірних сторін у ході.

У кожному ході чи полігоні обчислювали відносну лінійну нев'язку $\frac{\omega_{xy}}{\sum S}$, де $\sum S$ – периметр ходу.

Середню квадратичну похибку m_S вимірювання сторони в полігонометричних мережах обчислено за формулою:

$$m_S = \pm\sqrt{\frac{\omega_{xy}^2/n}{N}},$$

де N – кількість ходів, взятих для обчислення похибки.

Якщо в якомусь ході чи полігоні полігонометрії кутова чи лінійна нев'язка перевищувала допуск, то групи кутових та лінійних спостережень, які утворюють його, не допускалися до загального вирівнювання, поки не були виявлені та виключені причини цих помилок.

У табл. 3 наведено статистику розподілу кутових нев'язок у трикутниках ДГМ 2 класу, а на рис. 3 – гістограму цих нев'язок.

Таблиця 3

Розподіл кутових нев'язок у трикутниках мережі 2 класу

Діапазон нев'язок, "	Кількість кутів	%
-9 - -8	1	0,0
-8 - -7	4	0,0
-7 - -6	1	0,0
-6 - -5	10	0,1
-5 - -4	19	0,2
-4 - -3	152	1,2
-3 - -2	630	5,0
-2 - -1	1649	13,2
-1 - 0	2869	23,0
0 - 1	3260	26,1
1 - 2	2305	18,5
2 - 3	1135	9,1
3 - 4	375	3,0
4 - 5	62	0,5
5 - 6	11	0,1
6 - 7	3	0,0
7 - 8	1	0,0
8 - 9	1	0,0
Загальна кількість	12490	100

Вибираючи метод вирівнювання та програмне забезпечення, враховували вимоги, які впливають на якість отриманих результатів [6]:

– встановлення ваг різнорідних вимірювань. Переоцінка одних вимірювань, як і недооцінка інших через неправильне встановлення ваг різнорідних вимірювань приводить до спотворення результатів вирівнювання;

– знаходження попередніх координат пунктів, що визначаються. Попередні координати цих пунктів повинні бути визначені з такою точністю, щоби можна було обмежитись першими членами в ряду Тейлора під час виконання лінеаризації коефіцієнтів рівнянь поправок. Якщо лінеаризацію не забезпечено, це приводить до значного спотворення результатів вирівнювання;

– вирівнювання великих мереж. Збільшення розмірності мереж потребує складання системи нормальних рівнянь значної розмірності, що вимагає застосування спеціальних алгоритмів роботи з розрідженими матрицями;

– вирівнювання традиційних геодезичних мереж сумісно з результатами GPS-вимірювань;

– пошук грубих помилок вимірювань, які практично виникають, особливо під час опрацювання мереж великої розмірності;

– вирівнювання вільних мереж;

– оцінка точності всіх елементів геодезичної мережі на основі отримання оціночної кореляційної матриці, що вимагає визначення повністю заповненої оберненої матриці нормальних рівнянь.

Вирівнювання ДГМ виконано в системі координат УСК-2000, у просторових координатах X, Y, Z із використанням програмно-технологічного комплексу GeoLab [14].

Виконуючи вирівнювання ДГМ України параметричним способом за методом найменших квадратів, невідомі поправки вимірних величин представляли у вигляді лінійних функцій, в яких аргументами є поправки до наближених значень координат та вільні члени [7].

Далі процес вирівнювання відбувався так:

– обчислення наближених координат пунктів;

– складання рівнянь поправок до всіх вимірних елементів мережі;

– складання матриці нормальних рівнянь;

– оптимізація параметрів матриці нормальних рівнянь за оберненим методом Cuthill-McKee – для підвищення швидкості розв’язання нормальних рівнянь, а також для покращення обумовленості системи нормальних рівнянь;

– розв’язування системи нормальних рівнянь за блоковим методом Холенського;

– обчислення оберненої матриці нормальних рівнянь;

– обчислення вирівняних елементів мережі (напрямок, сторін, координат);

– статистичний аналіз результатів вирівнювання та оцінка точності мережі.

Вирівнювання ДГМ відбувалось у такій технологічній послідовності. Мережа 2-го класу вирівнювалась одним масивом. Вихідними даними для вирівнювання мережі ДГМ 2-го класу слугували пункти УПМ ГНСС, ДГМ 1-го класу та пункти 2-го класу, на яких були виконані супутникові геодезичні спостереження і які коректно суміщені з пунктами ДГМ 2-го класу. Вирівнювання виконували з використанням похибок вихідних даних. Для вирівнювання взято тільки дані (напрямки, сторони) 2-го класу.

Мережа 3-го класу вирівнювалась частинами. Геодезичну мережу України було розділено на три частини, кожну з них частин вирівнювали окремо. Для границі кожної частини вирівнювання з банку геодезичних даних вибиралися виміри 2-го і 3-го класів (напрямки, сторони). Вихідними пунктами для вирівнювання 3-го класу слугували пункти УПМ ГНСС, ДГМ 1-го, 2-го класів та пункти 3-го класу, на яких виконано супутникові геодезичні спостереження і які коректно суміщені з пунктами ДГМ 3-го класу.

Мережа 4-го класу теж вирівнювалась частинами. Границі вирівнювання мережі 4-го класу збігались з границями вирівнювання мережі 3-го класу. Вихідними пунктами для вирівнювання 4-го класу слугували пункти УПМ ГНСС, ДГМ 1–3 класів та пункти 4-го класу, на яких було виконано супутникові радіонавігаційні спостереження і які коректно суміщені з пунктами ДГМ 4-го класу.

Окремо проводилось вирівнювання геодезичної мережі на Автономну Республіку Крим. ДГМ для АР Крим вирівнювано одним масивом. Вихідними пунктами для вирівнювання слугували пункти УПМ ГНСС, ДГМ 1-го класу та пункти 2–4 класів, на яких були виконані супутникові геодезичні спостереження і які коректно суміщені з пунктами ДГМ 2–4 класів.

Межі для вирівнювання ДГМ 3 і 4 класів, а також АР Крим встановлювали з перекриттям. Перекриття мереж з різних частин вибирали з таким розрахунком, щоб координати однойменних пунктів, які розташовані на середині смуги перекриття, не відрізнялися більш ніж на 1 мм за координатами, отриманими з різних частин.

У табл. 4 наведено статистику розподілу поправок у горизонтальні напрями 2-го класу, а на рис. 4 – гістограму цих поправок. Відповідно, у табл. 5 наведено статистику поправок у виміряні сторони 2-го класу, а на рис. 5 – гістограму цих поправок.

Таблиця 4

Розподіл поправок у горизонтальні напрями 2-го класу

Діапазон поправок, "	Кількість	%
-7 – -6	2	0,0
-6 – -5	1	0,0
-5 – -4	6	0,0
-4 – -3	18	0,0
-3 – -2	159	0,4
-2 – -1	1960	4,6
-1 – 0	19100	44,7
0 – 1	19358	45,3
1 – 2	1955	4,6
2 – 3	142	0,3
3 – 4	17	0,0
4 – 5	9	0,0
5 – 6	1	0,0
6 – 7	1	0,0
Загальна кількість	42729	100

Таблиця 5

Розподіл поправок у виміряні сторони 2-го класу

Діапазон поправок, м	Кількість	%
-0,35 – -0,30	1	0,3
-0,30 – -0,25	1	0,3
-0,25 – -0,20	0	0,0
-0,20 – -0,15	5	1,3
-0,15 – -0,10	9	2,4
-0,10 – -0,05	26	6,9
-0,05 – 0,00	114	30,1
0,00 – 0,05	152	40,1
0,05 – 0,10	54	14,2
0,10 – 0,15	12	3,2
0,15 – 0,20	3	0,8
0,20 – 0,25	2	0,5
0,25 – 0,30	0	0,0
Загальна кількість	379	100



Рис. 1. Схема Української постійнодіючої мережі спостережень глобальних навігаційних супутникових систем (УПМ ГНСС), побудованої за проектом EUREF-UKR95



Рис. 2. Схема супутникової геодезичної мережі 1-го класу на території України

Як можна побачити із наведених даних, основна частина поправок у виміряні горизонтальні напрямки міститься в межах $\pm 2''$. А великі значення поправок (більше за $6''$) трапляються не частіше ніж одна на 1300 вимірів. Це свідчить про високу якість кутових вимірів у мережі. Для нижчих класів ці показники дещо зменшуються.

Для лінійних вимірів основна частина поправок лежить в межах $\pm 0,10$ м. Великі значення поправок (більші за 0,25 м) виявлено не частіше від однієї на 400 вимірів. Це дає підстави говорити про високу якість лінійних вимірювань, особливо для мереж 2-го класу. Лінійні виміри 3-го і 4-го класів менш якісні. Це зумовлено тим, що лінійні виміри 3-го і 4-го класів в основному представлені вимірними лініями полігонометрії.

Одним з найважливіших показників вирівнювання є середні квадратичні похибки визначення координат пунктів, а також апостеріорні середні квадратичні похибки вимірних елементів мережі. Після закінчення вирівнювання програмний комплекс GeoLab видає вирівняні координати пунктів та їх оцінку точності.

Відомості про розподіл середніх квадратичних похибок визначення координат пунктів за класами та за значеннями наведено у табл. 6 та 7 відповідно.

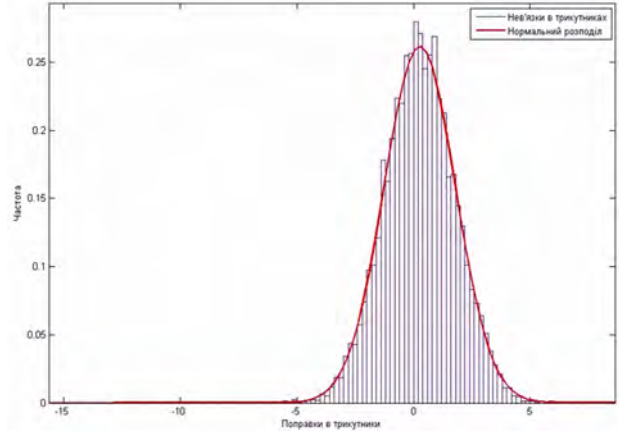


Рис. 3. Гістограма кутових нев'язок у трикутниках мережі 2-го класу

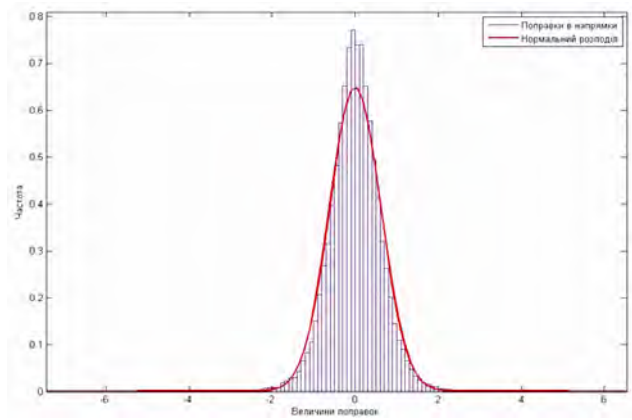


Рис. 4. Гістограма поправок у горизонтальні напрямки 2-го класу

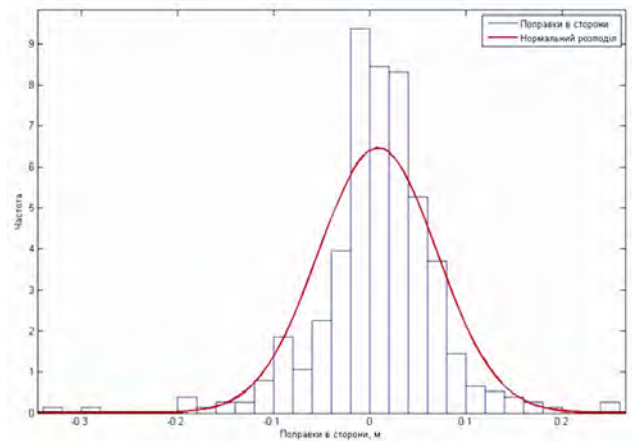


Рис. 5. Гістограма поправок у виміряні сторони 2-го класу

Таблиця 6
Розподіл середніх квадратичних похибок ДГМ України за класами

Назва	1 клас	2 клас	3 клас	4 клас	Разом
Кількість пунктів	813	5586	10084	8174	24657
Мінімальне значення СКП	0,001	0,001	0,001	0,003	0,001
Максимальне значення СКП	0,026	0,112	0,099	0,143	0,143
Середнє	0,003	0,020	0,032	0,032	0,028
Середнє квадратичне відхилення	0,002	0,007	0,013	0,009	0,012

Таблиця 7

**Розподіл середніх квадратичних похибок ДГМ
України за значеннями**

Назва	1 клас	2 клас	3 клас	4 клас	Всі
від 0 до 1 см	803	316	841	7	1967
від 1 до 2 см	8	2738	622	658	4026
від 2 до 3 см	2	2219	3119	3074	8414
від 3 до 4 см	0	189	3143	2883	6215
від 4 до 5 см	0	80	1722	1256	3058
від 5 до 6 см	0	30	493	236	759
від 6 до 10 см	0	13	144	58	215
Більше за 10 см	0	1	0	2	3

Ще одним критерієм оцінки якості вирівняної мережі є величини поправок у вихідні пункти. Як показав аналіз, майже всі значення поправок в вихідні пункти не перевищують 1 см. Отримано лише 6 значень поправок, які перевищують 3 см, тобто перевищують більш ніж втричі значення середніх квадратичних похибок вихідних пунктів. Для цих 6 пунктів виконано додатковий аналіз вимірів, суміщення центрів і геометрії мережі. Після проведення аналізу було вирішено залишити ці пункти як вихідні для вирівнювання ДГМ.

Висновки

Створено набори цифрових даних про пункти Державної геодезичної мережі та виміри на них. Виконано аналіз всіх вимірних елементів Державної геодезичної мережі за останні 70–50 років. Виконано теоретичне обґрунтування основних опцій вирівнювання мереж параметричним методом. Виконано вирівнювання Державної геодезичної мережі 1, 2, 3 та 4 класів на сучасному рівні технологічного та програмного забезпечення. Отримано координати та оцінку точності їх визначення для всіх пунктів ДГМ України.

Література

1. Бовшин В.Н. Совместное уравнивание общегосударственных опорных геодезических сетей / В.Н. Бовшин, В.И. Зубинский, О.М. Остач // Геодезия и картография. – 1995. – № 8. – С. 6–17.
2. Бондар А.Л. Стан та основні напрямки розвитку Державної геодезичної мережі України / А.Л. Бондар, І.М. Заєць, О.В. Кучер // Вісник геодезії та картографії. – 2001. – № 3. – С. 17–23.
3. Герасимов А.П. Уравнивание государственной геодезической сети / А.П. Герасимов. – М.: Картгеоцентр-геодезиздат. – 1996. – 216 с.
4. Інструкція з обстеження та оновлення пунктів державної геодезичної мережі України: затверджено наказом Укргеодезкартографії № 19 від 17.02.2000 р. – Укргеодезкартографія, 2000 р.
5. Інструкція про порядок контролю і приймання топографо-геодезичних та картографічних робіт: затверджено наказом Укргеодезкартографії № 23 від 29.02.2000 р. – Укргеодезкартографія, 2000 р.
6. Карпінський Ю.О. Загальна схема вирівнювання геодезичних мереж методом скінченних еле-

ментів / Ю.О. Карпінський // Вісник геодезії та картографії. – 2002. – № 4. – С.11–13.

7. Маркузе Ю.И. Основы метода наименьших квадратов и уравнильных вычислений: учеб. пособ. / Ю.И. Маркузе. – М.: МИИГАиК, 2005. – 288 с.
8. Марченко О.М. Результати побудови квазігеоїда УКГ2006 для регіону України / О.М. Марченко, О.В. Кучер, О.В. Ренкевич // Вісник геодезії та картографії. – К., 2007. – № 2. – С. 3–13.
9. Машимов М.М. Методы математической обработки астрономо-геодезических измерений / М.М. Машимов. – М.: Изд. ВИА, 1990. – 510 с.
10. Основні положення створення Державної геодезичної мережі України: затверджено Постановою КМ України від 4.06.1998 р. № 844.
11. РТМ “Технология математической обработки государственных геодезических сетей 1, 2, 3, 4 классов и подготовка каталогов к изданию”, РТМ 7 – 107 – 87.
12. Савчук С.Г. Моделювання параметрів референцної системи координат для території України / С.Г. Савчук // Геодезія, картографія і аерофотознімання. – 2003. – № 64. – С. 73–79.
13. Савчук С.Г. Узгодженість параметрів оптимального та фактичного орієнтування еліпсоїда Красовського / С.Г. Савчук // Вісник геодезії та картографії. – 2004. – № 2. – С. 8–12.
14. GeoLab [Електронний ресурс]. – Режим доступу до джерела: <http://www.bitwiseideas.com/Index.html>

Особливості загального вирівнювання Державної геодезичної мережі України

І. Заєць

Розкрито підходи та особливості загального вирівнювання Державної геодезичної мережі України. Наведено критерії вибору методу вирівнювання та програмного забезпечення, а також технологічну послідовність вирівнювання.

Особенности общего уравнивания Государственной геодезической сети Украины

І. Заєць

Раскрыто подходы и особенности общего уравнивания Государственной геодезической сети Украины. Приведены критерии выбора метода уравнивания и программного обеспечения, а также технологическая последовательность уравнивания.

Features general adjustment of the State Geodetic Network in Ukraine

I. Zayets

In the article the approach and features of general adjustment of the State Geodetic Network of Ukraine. The criteria of selection of the method and the adjustment software, as well as the technological sequence of adjustment.