

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Київський національний університет імені Тараса Шевченка
Географічний факультет
Кафедра геодезії та картографії

На правах рукопису УДК: 528.3

**ВПРОВАДЖЕННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОЇ ВЕРТИКАЛЬНОЇ РЕФЕРЕНЦНОЇ
СИСТЕМИ НА ТЕРИТОРІЇ УКРАЇНИ**

Рівень вищої освіти - перший (бакалаврський)
Галузь знань 19 - «Архітектура та будівництво»
Спеціальність 193 - «Геодезія та землеустрій»
Освітня програма «Геодезія та землеустрій»

Кваліфікаційна робота бакалавра
студента 4 курсу
освітнього рівня бакалавр
Равіковича Нікити Сергійовича

Науковий керівник:
Боднар Сергій Петрович
асистент

Допущено до захисту:
Протокол засідання кафедри № ____ від « ____ » _____ 2025 року
Завідувач кафедри проф. Даценко Л.М.

КИЇВ - 2025

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	3
ВСТУП	5
РОЗДІЛ 1. СИСТЕМИ ВИСОТ В ГЕОДЕЗІЇ	8
1.1. Геодезичні системи висот. Коротка історична довідка	8
1.2. Балтійська система висот 1977 року	10
1.3. Європейська вертикальна референцна система	13
Висновки до розділу 1	17
РОЗДІЛ 2. ЄВРОПЕЙСЬКА ВЕРТИКАЛЬНА РЕФЕРЕНЦНА СИСТЕМА ВИСОТ (EVRS) ТА АСПЕКТИ ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ	19
2.1. Передумови впровадження EVRS на території України	19
2.2. Нормативно-правова основа організації та виконання робіт	21
2.3. Визначення висот у системі EVRS2000 на території України	24
Висновки до розділу 2	27
РОЗДІЛ 3. КАМЕРАЛЬНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ПОЛЬОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ	29
3.1. Програмне забезпечення камеральної обробки даних геодезичних спостережень	29
3.2. Зрівнювання висотної геодезичної мережі	31
Висновки до розділу 3	36
ВИСНОВКИ	38
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	40
ДОДАТКИ	43

АНОТАЦІЯ

Равікович Н.С. «Впровадження Європейської вертикальної референцної системи на території України». Спеціальність 193 «Геодезія та землеустрій». Київський національний університет імені Тараса Шевченка, Географічний факультет, кафедра геодезії та картографії. Київ, 2025.

У кваліфікаційній роботі проведено аналіз сучасного стану висотної мережі на території України. Досліджено розвиток геодезичних систем висот, їх класифікацію та принципи побудови. Обґрунтована необхідність переходу з Балтійської системи висот 1977 року на Європейську вертикальну референцну систему (EVRS). Особливу увагу в роботі приділено технічним, організаційним і нормативно-правовим аспектам впровадження EVRS на шляху інтеграції України до європейського простору.

Встановлено, що впровадження Європейської вертикальної референцної системи на території України здійснюється відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України №590 від 9 червня 2023 року «Про перехід на єдину систему висот EVRS2000». Документ передбачає запровадження єдиного офіційного вертикального референцного рівня для всієї території країни, починаючи з 1 січня 2026 року. У роботі окреслено основні етапи реалізації цього процесу, проаналізовано організаційну модель впровадження системи на національному рівні, визначено перелік державних органів та установ, що беруть участь у реалізації проекту, а також партнерських організацій.

Детально розглянуто структуру Європейської вертикальної референцної системи, її технічні характеристики та принципи функціонування. Проведено порівняльний аналіз Європейської вертикальної референцної системи і Балтійської системи висот 1977 року, визначено основні переваги нової системи - уніфікований європейський нульовий рівень, точність визначення висот, сумісність з глобальними системами координат, можливість інтеграції геодезичних даних з більшістю країн Європи та економічну доцільність.

Особливий акцент зроблено на сучасних технологіях визначення висоти пунктів нівелірної мережі України у системі EVRS2000. Проаналізовано методику прокладання нівелірних ходів I та II класів точності, застосування GNSS-нівелювання в поєднанні з національною моделлю квазігеоїду UQG2017. Проаналізовано вплив різних моделей гравітаційного поля на точність ортометричних висот, зокрема, встановлено перевагу європейської моделі EGG2015 за показниками точності.

Проаналізовано процес виконання камеральної обробки результатів польових спостережень із використанням програмного комплексу GeoLab, який дозволяє виконувати автоматизовану перевірку даних та вирівнювання нівелірної мережі, використовуючи метод найменших квадратів, а також інтегрувати GNSS-дані з результатами традиційного геометричного нівелювання. Досліджено зрівнювання висотної геодезичної мережі параметричним методом за різницями геопотенціальних чисел із врахуванням аномалій Буге та параметрів еліпсоїда GRS80.

Практичне значення роботи. Визначено технічні та методичні основи для впровадження Європейської вертикальної референцної системи на території України, що дозволяє забезпечити гармонізацію національної висотної основи з європейськими стандартами. Викладені в роботі підходи створюють основу для модернізації висотної геодезичної мережі країни, її інтеграції до Об'єднаної європейської нівелірної мережі.

Особистий внесок здобувача. Опрацьовано нормативно-правові документи, наукові публікації та технічні матеріали, що регламентують організацію геодезичних робіт на території України. Здійснено камеральну обробку результатів нівелювання I та II класу точності, даних GNSS-спостереження у програмному комплексі GeoLab, опрацьовано методику вирівнювання висотної геодезичної мережі за параметричним методом різниць геопотенціальних чисел.

Ключові слова: система висот, Європейська вертикальна референцна система, GNSS-нівелювання, вирівнювання висотної геодезичної мережі, камеральна обробка даних.

ВСТУП

Актуальність. Об'єднана Європейська Нівелірна Мережа або Європейська Вертикальна Референцна Система (*англ.* United European Leveling Network / European Vertical Reference System), вихідним пунктом якої є нуль Амстердамського футштока, на даний час є основою для ведення відліку висот на територіях країн Європейського Союзу.

У зв'язку з тим, що UELN/EVRS2000 є основною висотною системою відліку в Європі, важливим аспектом її впровадження в Україні є дотримання вимог та рекомендацій Eurocontrol (безпека повітряного руху) та EuroGeographics (Європейська асоціація національних картографо-геодезичних та кадастрових служб), а також інтеграція національної інфраструктури геопросторових даних України до глобальної та європейської інфраструктури геопросторових даних.

Знаходячись в самому центрі Європи та на шляху до інтеграції до Європейського Співтовариства, Україна орієнтується на впровадження загальноприйнятих у країнах ЄС стандартів. Перехід на UELN/EVRS2000 необхідно виконати, враховуючи моральну застарілість Балтійської системи висот 1977 року, вихідним пунктом якої є нуль Кронштадтського футштока, та яка не гарантує бажаної точності, актуалізації стану висотних мереж (відсутність інформації та неможливість оновлених результатів довготривалих спостережень) на території нашої держави та не забезпечує належний зв'язок з Світовим океаном та системою висот, що використовується країнами Євросоюзу.

З метою врегулювання питання провадження та використання на території України UELN/EVRS2000 Кабінет Міністрів України від 9 червня 2023 року затвердив Постанову №590 «Деякі питання використання Європейської вертикальної референцної системи (EVRS)». Виконання положень згаданої постанови сприятиме інтеграції нашої держави в європейський простір, дозволить брати участь в міжнародних наукових дослідженнях, а також відкриє нові можливості для виконання

картографування, розвитку геоінформаційної інфраструктури, забезпечення інженерних проектів відповідно до сучасних європейських стандартів.

Мета дослідження - вивчити передумови, методи та технологічні рішення переходу України з Балтійської системи висот 1977 року на Європейську вертикальну референцну систему висот на основі сучасних технічних можливостей.

Завданнями роботи визначені:

1. Провести детальний порівняльний аналіз Балтійської системи висот 1977 року з Європейською вертикальною референчною системою (EVRS), визначити основні переваги при впровадженні EVRS в Україні.
2. Дослідити процес впровадження Європейської вертикальної референчної системи висот на території України.
3. Опанувати методику обробки геодезичних даних та вирівнювання нівелірної мережі із застосуванням сучасного програмного забезпечення GeoLab.

Об'єкт дослідження - Європейська вертикальна референцна система висот.

Предметом дослідження визначено теоретичні, методичні та практичні аспекти впровадження Європейської вертикальної системи висот на території України.

Методи дослідження. *Метод аналізу* застосовано для опрацювання нормативних документів, наукових праць і міжнародних стандартів. *Метод порівняльного аналізу* застосовано для зіставлення параметрів і характеристик висотних систем, а *індуктивний метод* - для узагальнення окремих фактів, наукових досліджень та досвіду країн Європи з метою формулювання загальних закономірностей і принципів організації систем висот. *Метод математичного моделювання* застосовано для камеральної обробки результатів спостережень і вирівнювання нівелірної мережі.

Структура роботи. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатків. Загальний обсяг текстової частини роботи становить 38 сторінок; 22 позиції в списку джерел та 5 додатків.

Ключові слова: система висот, Європейська вертикальна референсна система, GNSS-нівелювання, вирівнювання висотної геодезичної мережі, камеральна обробка даних.

Розділ 1. СИСТЕМИ ВИСОТ В ГЕОДЕЗІЇ

1.1. Геодезичні системи висот. Коротка історична довідка

Геодезія як наука невід’ємно пов’язана з встановленням систем відліку для визначення просторового і висотного положення та інших просторових характеристик точок на поверхні Землі.

Система висот - це одновимірна система координат, яка використовується для вираження метричної відстані (висоти) точки над опорною поверхнею (тобто рівнем нульової висоти) уздовж чітко визначеного шляху. Зокрема, фізичні висоти визначаються за допомогою методів геодезичного нівелювання, які вимірюють відстань між двома екіпотенціальними або рівними поверхнями поля тяжіння Землі та забезпечують висоту вздовж кривої прямовисної лінії.

Оскільки визначення висоти залежить від рівних поверхонь і прямовисної лінії поля тяжіння Землі, ці системи координат називають системами фізичної висоти, оскільки визначення висоти залежить від рівнів поверхонь і прямовисної лінії поля тяжіння Землі. Фізичні висоти відносяться до геоїда, конкретної екіпотенціальної поверхні поля тяжіння Землі, яка близька до середнього рівня моря. З практичної точки зору середній рівень моря прийнято як нульовий рівень і виведено на основі усереднених мареографічних записів за певні проміжки часу. Оскільки середній рівень моря відрізняється від геоїда (до 2 м у глобальному масштабі) і від точки до точки, висоти, визначені вздовж так званих вертикальних або нівелірних мереж, віднесених до даного мареографа, визначають локальну систему висот [1].

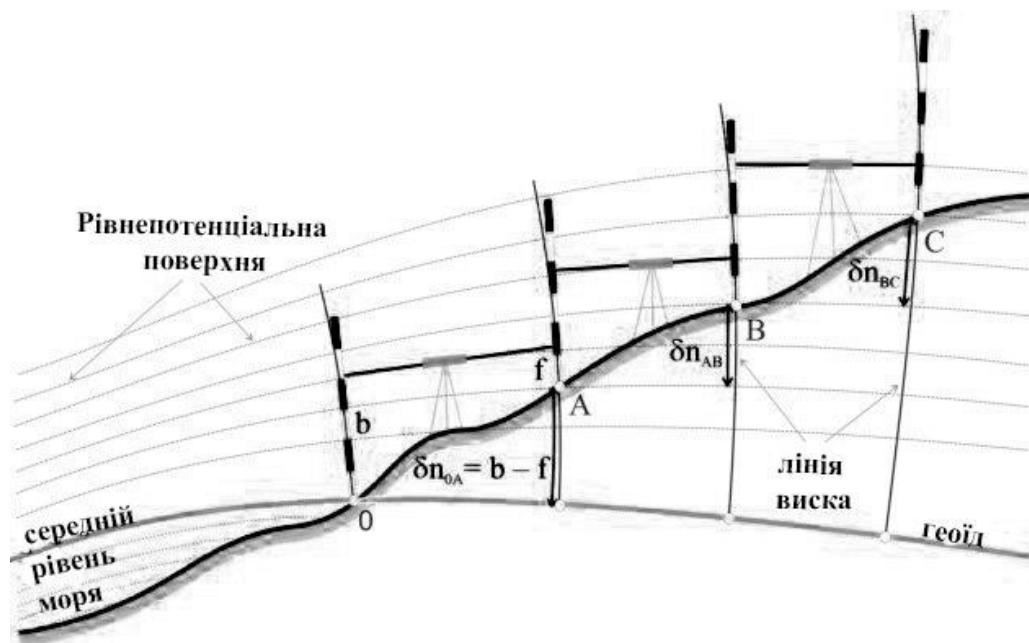


Рис. 1.1. Визначення перевищення від вихідного «0» пункту

Історія розвитку систем висот демонструє поступовий перехід від первинних методів, заснованих на спостереженні за рівнем води в природних водоймах, до сучасних інтегрованих технологій, що поєднують традиційне вирівнювання та супутникове позиціонування.

З впровадженням точніших інструментів - теодолітів та інших приладів - було створено систематизовані мережі вирівнювання. Метод диференціального вирівнювання, що базувався на послідовних вимірюваннях вертикальних кутів та обчисленнях різниць висот між контрольними пунктами, дозволяв досягти високої точності, що було надзвичайно важливим для картографічного забезпечення та інженерних проектів.

У 1977 році в СРСР була затверджена Балтійська система висот, заснована на встановленні нульового рівня за допомогою еталонного пункту, Кронштадтського футштока. Ця система стала стандартом для країн Східного блоку, включаючи Україну, і забезпечувала узгодженість геодезичних даних для картографування, будівництва та інших практичних завдань [2].

Подальша еволюція супроводжувалася впровадженням глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS *англ.* Global Navigational Satellite System) та застосуванням супутникових технологій. Сучасні GNSS-пристрої безпосередньо визначають координати відносно еліпсоїда Землі, що спричиняє необхідність застосування додаткових методів корекції для отримання ортометричних висот. Так званий GNSS-нівелювальний метод дозволяє враховувати гравітаційне поле та визначати висоти, які відповідають середньому рівню моря або іншим опорним поверхням.

Сучасна геодезична практика часто інтегрує дані традиційного вирівнювання із супутниковими вимірюваннями, що дозволяє підвищити точність та стабільність національних геодезичних мереж. Такий комплексний підхід сприяє гармонізації національних систем відліку з глобальними стандартами, такими як ITRS (*англ.* International Terrestrial Reference System - Міжнародна Земна Система Координат) та ITRF (*англ.* International Terrestrial Reference Frame - Міжнародна Земна Система Відліку), що особливо актуально в умовах європейської інтеграції та вимог до геопросторової інформації.

Сьогодні розвиток геодезичних систем висот характеризується впровадженням високоточних GNSS-постійних станцій, використанням багаточастотних приймачів та сучасних методів обробки даних. Ці технології дозволяють досягати субсантиметрової, а в деяких випадках навіть міліметрової точності, що є надзвичайно важливим для застосувань у геодинаміці, екологічних дослідженнях, сейсміці, транспорті та інших галузях.

1.2. Балтійська система висот 1977 року

До 1977 року в СРСР не існувало єдиної системи висот, а застосовувалися різні системи, які формувалися на основі локальних вимірювань перевищень, зокрема,

пов'язаних із середнім рівнем моря конкретних водних об'єктів. Проте з розвитком супутникових та комп'ютерних технологій з'явилася потреба в єдиній національній системі, що дозволить забезпечити узгодженість геодезичних даних на території всієї країни. Балтійська система висот була обрана як базова завдяки тому, що середній рівень Балтійського моря, визначений за спостереженнями на Кронштадтському футштоку, встановленого поблизу Санкт-Петербурга, мав достатню стабільність і точність. Таке рішення дозволило створити єдину мережу опорних пунктів, у яких висоти відраховуються від одного вихідного пункту, що значно спрощувало процедуру зведення вимірювань і забезпечення їхньої сумісності.

Балтійська система висот була прийнята в Радянському Союзі у 1977 році після завершення четвертого вирівнювання нівелірних мереж I та II класів, як система абсолютних (нормальних) висот, відлік яких ведеться від нуля Кронштадтського футштока. Цей еталонний пункт, який визначається як середній рівень Балтійського моря, слугує основою для встановлення висот опорних геодезичних пунктів, що використовуються при картографуванні, будівництві та інших інженерних дослідженнях.

Основною характеристикою Балтійської системи висот є абсолютність відліку висот - всі опорні пункти позначаються відносно нуля Кронштадтського футштока. Це дозволяє отримувати "нормальні" висоти, які враховують як вплив гравітаційного поля Землі, так і специфічну форму геоїда. Методика побудови мережі базувалася на проведенні високоточних нівелювальних робіт, де використовувалися оптичні прилади (нівеліри) з відповідними поправками для зведення результатів до єдиного еталону. За результатами проведених робіт було встановлено, що протяжність ліній нівелювання I і II класів у межах системи сягала десятків тисяч кілометрів із середньою квадратичною похибкою, що становила декілька міліметрів на кілометр ходу.

Впровадження Балтійської системи висот стало важливим етапом у розвитку державної геодезичної мережі, оскільки воно забезпечило:

1. **Єдиний початок відліку висот.** Всі подальші геодезичні роботи здійснювались із застосуванням одного стандарту, що мінімізувало системні похибки, спричинені використанням різних локальних систем.
2. **Уніфікацію даних.** Було забезпечено узгодженість висотних показників на території країни, що стало фундаментом для створення єдиних картографічних та інженерних продуктів.
3. **Покращення точності вимірювань.** Використання високоточної методики нівелювання дозволило досягти відносно малих значень середньої квадратичної похибки, що було особливо важливо для задач стратегічного планування та інженерного проектування.

На момент впровадження у 1977 році система мала ключове значення для розвитку геодезичного забезпечення всієї країни. Вона забезпечувала основу для подальшої побудови державної нівелірної мережі та стала єдиним стандартом для вимірювань у багатьох регіонах СРСР, зокрема, у країнах Східного блоку.

Сьогодні, незважаючи на поступову модернізацію та впровадження нових технологій, Балтійська система висот залишається актуальною в багатьох державах. В Україні Балтійська система висот використовується в ряді практичних завдань, незважаючи на вже заплановану поступову заміну на Європейську вертикальну референтну систему (EVRS), оскільки система 1977 року вважається морально застарілою через відсутність безпосереднього зв'язку з сучасними європейськими стандартами і відсутність адаптації до сучасних моделей квазігеоїда, таких як GRS80, і не враховує регіональні геодинамічні процеси, що зумовлює зміну висот пунктів [3].

Балтійська система висот 1977 року стала визначальним кроком у створенні єдиної національної системи відліку висот у СРСР. Вона забезпечила уніфікацію геодезичних вимірювань, що, в свою чергу, сприяло підвищенню точності картографічних і інженерних даних. Незважаючи на те, що сучасні технології пропонують нові підходи до визначення ортометричних висот, Балтійська система залишається важливим історичним етапом, який поклав основу для подальшої

модернізації національних систем відліку. У майбутньому впровадження нових стандартів, таких як EVRS, дозволить підвищити сумісність українських геодезичних даних із європейськими, однак історична роль Балтійської системи висот як об'єднуючого еталону для державної геодезичної мережі залишається безсумнівною.

1.3. Європейська вертикальна референцна система

Перші спроби реалізації єдиної європейської системи висот виникли у 70-х роках минулого століття шляхом спільного вирівнювання висотних мереж. Результатом виконання робіт стало вирівнювання Об'єднаної європейської нівелірної мережі (UELN) для Західної Європи у 1986 році, а згодом і в країнах Східної Європи.

У 1994 році, на саміті EUREF (European Reference Frame - Європейська система відліку), відповідно до Резолюції №3 було поновлено заходи щодо впровадження Об'єднаної Європейської нівелірної мережі з метою встановлення єдиної системи висот на території Європи з точністю до 10 см та поступового розширення мережі на нові території. У рамках цих ініціатив підкомісія IAG (International Association of Geodesy - Міжнародна асоціація геодезії) для Європи запропонувала об'єднати регіональні нівелірні мережі - UPLN (United Precise Levelling Network - Об'єднана прецизійна нівелірна мережа), UELN (*англ.* United European Leveling Network - Об'єднана європейська нівелірна мережа), а також мережу мареографів - в єдину інтегровану систему під назвою UELN- 95. Умовою створення цієї мережі було проведення міжнародної GPS- кампанії на всіх пунктах. У результаті поетапного приєднання нових країн-учасниць, таких як Польща, Словаччина, Словенія, Боснія і Герцеговина, Данія, а також Балтійські країни, мережу стали називати UELN- 95/98, а згодом - UELN/EVRS2000 [3].

З впровадженням UELN в 1999 році відбулося розроблення та визначення стандартів Європейської Вертикальної референцної системи, а також прийняте і

затверджене визначення EVRS як Європейської вертикальної референцної системи разом з єдиним вихідним пунктом - Амстердамським футштоком.

3. EVRS Definition

The European Vertical Reference System (EVRS) is a kinematical height reference system. The EVRS definitions fulfil the following four conventions:

- (1) The vertical datum is defined as the equipotential surface for which the Earth gravity field potential is constant:

$$W_0 = W_{0E} = \text{const.}$$

and which is in the level of the Normaal Amsterdams Peil.

- (2) The unit of length of the EVRS is the meter (SI). The unit of time is second (SI). This scale is consistent with the TCG time coordinate for a geocentric local frame, in agreement with IAU and IUGG (1991) resolutions. This is obtained by appropriate relativistic modelling.
- (3) The height components are the differences ΔW_P between the potential W_P of the Earth gravity field through the considered points P , and the potential W_{0E} of the EVRS conventional zero level. The potential difference $-\Delta W_P$ is also designated as the geopotential number c_P

Рис.1.2. Фрагмент тексту Конвенції «Про визначення та реалізацію Європейської вертикальної референцної системи»

У 2008 році на саміті EUREF було прийнято Резолюцію №3, яка запровадила використання EVRS як єдиний вертикальний орієнтир загальноєвропейської геоінформації та включення EVRS до директиви INSPIRE (*англ.* Infrastructure for Spatial Information in Europe - Інфраструктура Просторової Інформації в Європі) - що зобов'язувала усіх членів ЄС створити в мережі Інтернет інфраструктуру просторових даних, що мала відповідати стандартизованому обміну географічною інформацією [4].

На сьогоднішній день Європейська вертикальна референцна система є сучасною моделлю відліку вертикальних координат, яка була розроблена з урахуванням європейських стандартів і потреб інтегрованої геопросторової інформації. EVRS створена для забезпечення більшої точності, сумісності та стабільності даних, що використовуються в картографії, інженерних дослідженнях та морському господарстві. Вона є відповіддю на необхідність модернізації традиційних систем, таких як Балтійська система висот 1977 року, і спрямована на гармонізацію національних систем відліку з глобальними та європейськими стандартами.

Європейська вертикальна референсна система зазнала значних змін з часу її початкової концепції на порозі нового тисячоліття. Перші спроби, зокрема реалізація EVRF2000 (*англ.* European Vertical Reference Frame 2000 - Європейська Вертикальна Система Відліку 2000), заклали основу для єдиного вертикального датуму Європи, спираючись на геопотенціальні числа, отримані за допомогою традиційних методів нівелювання та гравіметричних вимірювань. Подальші ревізії, зокрема EVRF2007 та EVRF2019, не лише розширили мережу, залучивши до неї більше країн-учасниць, а й удосконалили методологію з урахуванням регіональних тектонічних рухів та неоднорідності, притаманної вихідним наборам даних.

У зв'язку з постійним розвитком супутникових технологій і зростанням вимог до точності геодезичних вимірювань, традиційні системи, що базуються на історичних еталонах, починають виявляти свої обмеження. Балтійська система висот, яка протягом десятиліть забезпечувала основу для геодезичних мереж у країнах колишнього СРСР, не має прямого зв'язку з сучасними глобальними системами координат, такими як WGS84 (*англ.* World Geodetic System 1984 - Всесвітня геодезична система 1984) чи GRS80 (*англ.* Geodetic Reference System 1980 - Геодезична референсна система 1980). З метою підвищення сумісності геодезичних даних, ефективності їх обробки та інтеграції у спільну європейську інфраструктуру, Україна з 1 січня 2026 року планує перейти на EVRS [5].

Нинішній етап впровадження EVRS у геодезичну практику характеризується широкою інтеграцією цієї системи у національну та європейську інфраструктуру геопросторових даних. Завдяки використанню високоточних GNSS-постійних станцій, сучасних алгоритмів обробки даних і оновлених гравітаційних моделей, EVRS дозволяє створити однорідну вертикальну систему відліку, що забезпечує високоточне визначення ортометричних висот. Така система сприяє об'єднанню геодезичних даних між країнами, що є важливим для уніфікації картографічних продуктів і ефективного управління інженерними проектами. У цьому контексті модернізація вертикальної системи через EVRS виступає як важливий чинник гармонізації національної

геодезичної мережі із сучасними європейськими стандартами, що сприятиме ефективній інтеграції України у глобальний геодезичний простір. Цей процес органічно доповнює історичний розвиток систем відліку висот і відкриває нові перспективи для підвищення точності і стабільності геопросторової інформації.

У свою чергу, Європейська вертикальна референтна система відрізняється кількома ключовими особливостями, в порівнянні з Балтійською системою висот 1977 року:

1. **Уніфікований початок відліку:** EVRS встановлює єдиний, стандартизований нуль, який формується на основі середнього багатолітнього рівня моря, визначеного з використанням сучасних методів супутникової альтиметрії та аналізу гравітаційного поля. Такий підхід усуває розбіжності, що виникають при використанні різних локальних еталонів, і забезпечує стабільність вертикального відліку протягом часу;
2. **Висока точність та стабільність:** Завдяки інтеграції даних з високоточних GNSS-постійних станцій, сучасних методів обробки даних та використанню квазігеоїдних моделей, EVRS забезпечує точність визначення ортометричних висот, що відповідає сучасним європейським стандартам і дозволяє досягати субсантиметрової та навіть міліметрової точності, що є критичним для інженерних проектів та геодинамічних досліджень;
3. **Інтероперабельність:** EVRS забезпечує сумісність із глобальними системами координат (WGS84, ITRF) та європейськими стандартами, що сприяє обміну геопросторовими даними між країнами та уніфікації картографічних продуктів. Це є важливим аспектом для інтеграції даних у спільну європейську геодезичну інфраструктуру.
4. **Економічна ефективність:** Єдина система відліку знижує потребу в додаткових перерахунках та корекціях даних, що, в свою чергу, зменшує витрати на геодезичні роботи. Уніфікований підхід дозволяє спрощувати процедури обробки даних і зменшувати час на їх адаптацію до нових стандартів, що є особливо

важливим для великих масштабних проектів у галузі інфраструктурного та морського будівництва.

5. **Сприяння інноваціям:** Модернізована система забезпечує можливість впровадження новітніх технологій у геодезичних дослідженнях, таких як застосування алгоритмів машинного навчання для обробки даних та аналізу геодинамічних процесів, що стимулює подальший розвиток галузі. EVRS відкриває можливості для застосування новітніх технологій у геодезичних дослідженнях, зокрема використання супутникової альтиметрії для відстеження змін рівня моря, а також інтеграції даних з різних джерел (оптичних, лазерних, GNSS), що стимулює подальший розвиток геодезичної науки та підвищення конкурентоспроможності країни у глобальному масштабі.
6. **Підтримка нормативів і європейських стандартів:** Перехід на EVRS сприяє оновленню нормативно-правових засад щодо геодезичного забезпечення, що відповідає сучасним технологічним вимогам і стандартам країн Європи. У свою чергу це дозволяє створити більш надійну систему відліку, яка враховує сучасні технологічні досягнення та забезпечує стабільність геодезичних даних у довгостроковій перспективі.

Впровадження Європейської вертикальної референцної системи стало важливим етапом гармонізації висотних систем у країнах Європи, забезпечивши єдиний стандарт проведення геодезичних, картографічних та інженерних робіт. Завдяки використанню GNSS-технологій, актуалізованих гравітаційних моделей, узгоджених методів обробки даних, EVRS забезпечує високу точність та сумісність просторових даних.

Висновки до розділу 1

Підсумовуючи, розвиток геодезичних систем висот в Україні є результатом поступової еволюції методів, що відображає як історичний досвід, так і сучасні вимоги до точності та сумісності геопросторової інформації. Початкові підходи, які базувалися

на використанні єдиного еталонного пункту для визначення висот, заклали фундамент для формування державної геодезичної мережі. Історичний аналіз показав, що перші системи дозволили сформувати базовий стандарт, на якому згодом була побудована Балтійська система висот 1977 року. Ця система, яка використовувала Кронштадтський футшок як вихідний пункт, протягом десятиліть забезпечувала узгодженість геодезичних вимірювань та стала єдиним стандартом для картографічного забезпечення, будівництва та інженерних проектів в колишньому СРСР та пострадянських країнах.

Аналіз організації та функціонування Балтійської системи висот показав, що її основними перевагами стали єдина основа відліку висот, уніфікація даних та висока на момент запровадження точність вимірювання, що дозволило створити масштабну та узгоджену нівелірну мережу. Водночас сучасні технологічні виклики, розвиток супутникових технологій, використання гравітаційних моделей та зростання потреб точності геодезичних даних виявили обмеження цієї системи, зокрема відсутність прив'язки до глобальних систем координат і неможливість враховувати геодинамічні зміни стало підставою для поступової втрати актуальності Балтійської системи висот.

Проведене дослідження Європейської вертикальної референцної системи показало, що ця система є сучасною інтегрованою моделлю вертикального відліку, яка відповідає міжнародним стандартам. Вона забезпечує високу точність, стабільність, сумісність геодезичних даних з результатами GNSS-спостережень та гравітаційними моделями. Впровадження EVRS створює технічні й організаційні передумови для гармонізації національної висотної основи України з європейською інфраструктурою геопросторових даних, що дозволить інтегруватися до загальноєвропейського простору у сфері геодезії та картографії, підвищить точність робіт у майбутньому.

2. ЄВРОПЕЙСЬКА ВЕРТИКАЛЬНА РЕФЕРЕНЦНА СИСТЕМА ВИСОТ (EVRS) ТА АСПЕКТИ ЇЇ ВПРОВАДЖЕННЯ

2.1. Передумови впровадження EVRS на території України

Потреба у впровадженні EVRS в Україні першочергово була зумовлена прагненням інтегрувати національну систему геодезичних референцій до єдиної європейської структури, що передбачено директивою INSPIRE Європейського Союзу. Вже у травні 2019 року Україна офіційно приєдналася до Об'єднаної європейської нівелірної мережі, отримавши статус повноправного учасника єдиної системи висот EVRS 2000. Для цього було здійснено масштабну перевірку національної нівелірної мережі: понад 18 000 пунктів пройшли технічну верифікацію відповідності європейським стандартам, а результати було передано для інтеграції до загальноєвропейської бази геоданих [6].

Російська агресія на сході України, а також повномасштабна війна гостро підкреслили стратегічну необхідність модернізації картографо-геодезичної інфраструктури держави. Зокрема, стало очевидним, що чинна Балтійська система висот 1977 року є недоцільною у контексті орієнтації на геодезичну базу країни-агресора на шляху інтеграції до європейського простору. Під час бойових дій на сході виявилось, що понад 98% наявних топографічних карт були застарілими і не відповідали сучасному стану місцевості, що суттєво ускладнювало ведення операцій і планування інженерних та оборонних заходів [7]. Досвід оперативного виготовлення сучасних детальних карт, підтвердив нагальну потребу переходу на єдиний європейський відлік висот. Все це значною мірою створює політичну, професійну та суспільну підтримку рішення про інтеграцію України до Європейської вертикальної референцної системи (EVRS) як складової інтеграції у європейський простір. Така

ситуація примусила державні органи пришвидшити оновлення нормативних і технічних стандартів у сфері геодезії та картографії.

9 червня 2023 р. Кабінетом Міністрів України було прийнято постанову №590, «Деякі питання використання Європейської вертикальної референцної системи», яка офіційно визначає EVRS як національний стандарт вертикальних відліків і повинна бути впроваджена з 1 січня 2026 року і передбачає включення національної нівелірної мережі до UELN. Постановою визначено, що ключовим органом що здійснює координацію проекту є Держгеокадастр [5]. Міністерство аграрної політики України відповідає за розроблення нормативних актів і технічних стандартів у сфері землевпорядкування та інтеграцію EVRS у систему просторової інформації, а підрозділи Держгеокадастру регіонального рівня й органи місцевого самоврядування відповідають за геодезичні роботи на відповідних територіях [8]. Міністерство інфраструктури України в свою чергу забезпечує інтеграцію EVRS в транспортну інфраструктуру країни; Державне підприємство «Науково-дослідницький інститут геодезії та картографії» здійснює практичні роботи з обстеження, відновлення геодезичних пунктів державної мережі, а також впровадження EVRS в західних областях країни. Інститут геодезії Національного університету «Львівська політехніка» - бере участь у науково-дослідницьких роботах, спрямованих на адаптацію національної висотної системи до стандартів EVRS, а також приймає участь в проектах, пов'язаних з інтеграцією до європейського геопростору [7].

Україна отримує значну методологічну та технічну допомогу від європейських партнерів. Так, Федеральне агентство картографії та геодезії Німеччини (нім. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie) визначено координатором і провідним центром популяризації системи UELN/EVRS2000 у Європі, що забезпечило технічну підтримку українського проекту [9]. Норвезька служба картографії надає експертну допомогу під час створення оновленої національної картографічної основи. У рамках співпраці з європейськими структурами Держгеокадастр підписав меморандум із EUROGI (англ. European Umbrella Organization for Geographic Information -

Європейська головна організація географічної інформації), що передбачає обмін знаннями та адаптацію українського законодавства до стандартів ЄС [10,11].

Окрім розриву зв'язків з державою-агресором у сфері геодезії, введення EVRS відіграє низку не менш важливих переваг. Серед основних, можна зазначити підвищення точності визначення ортометричних висот, а також сумісність з глобальними системами координат, до яких належать WGS84 та GRS80, що в свою чергу забезпечить інтеграцію даних GNSS спостережень без застосування зайвих трансформацій, коректне використання цифрових моделей геоїда та уніфікацію просторової інформації. Застосування єдиної однорідної системи геодезичних даних спростить їх обробку та обмін з країнами Європи та забезпечить надійну основу для масштабних інфраструктурних, картографічних та моніторингових проектів.

2.2. Нормативно-правова основа організації та виконання робіт

Застосування нормативів набуває критично важливого значення для забезпечення високої якості проведення робіт із нівелювання, оскільки дотримання вимог Закону України, відповідних постанов та нормативів гарантує не лише стандартизацію методики вимірювань, але й забезпечення належного контролю, атестації та калібрування вимірювального обладнання, що безпосередньо впливає на достовірність отриманих даних.

Основним законодавчим актом, який створює правову основу для організації геодезичних робіт, є Закон України «Про геодезію, картографію та просторову інформацію». Цей нормативний документ встановлює основні засади організації геодезичних досліджень, обов'язковість використання стандартизованої методики вимірювань, а також вимоги до атестації та контролю вимірювального обладнання. І визначає стандарти вимірювань, порядок проведення нівелювання і методи контролю точності. І сприяє не лише забезпеченню високої якості даних, а й їх сумісності із

міжнародними стандартами, такими як WGS84 та ITRF, що є необхідним для подальшого використання отриманих результатів у різних галузях [12].

Постанова Кабінету Міністрів України №590 від 9 червня 2023 р. «Деякі питання використання Європейської вертикальної референцної системи (EVRS)» регламентує впровадження Європейської вертикальної референцної системи як національного стандарту для проведення геодезичних робіт, встановлюючи строк переходу з Балтійської системи висот 1977 року на EVRS з 1 січня 2026 року. Акт визначає порядок включення нівелірної мережі України до Об'єднаної європейської нівелірної мережі, що забезпечує стандартизацію методики вимірювань, контроль атестації та калібрування вимірювального обладнання відповідно до сучасних європейських нормативів [8].

Постанова Кабінету Міністрів України від 7 серпня 2013 р. №646 «Деякі питання реалізації частини першої статті 12 Закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність»» окреслює порядок організації топографічних зйомок, встановлює вимоги до точності проведення вимірювань та документування результатів геодезичних робіт. Впровадження положень цієї постанови гарантує чіткість та стандартизацію процесу створення топографічних карт і планів, що є запорукою високої достовірності та сумісності геодезичних даних у рамках загальнонаціональної системи просторової інформації [13].

Постанова Кабінету Міністрів України від 4 вересня 2013 р. №661 «Про затвердження Порядку загального топографічного і тематичного картографування» визначає єдиний порядок виконання топографічних зйомок і тематичного картографування по всій території України, регламентує масштаби зйомки, клас точності, а також періодичність оновлення топографічних карт [14].

Постанова Кабінету Міністрів від 8 листопада 2017 р. №836 «Про затвердження Порядку охорони геодезичних пунктів» визначає правила охорони опорних пунктів геодезичної мережі, їх обліку, захисту від пошкоджень. Постанова встановлює механізми передачі геодезичних пунктів для забезпечення їх схоронності користувачам

земельних ділянок, на території яких вони розташовані. Документ також передбачає створення та ведення банку геодезичних даних, що сприяє централізованому обліку та збереженню інформації про геодезичні пункти [15].

Постанова Кабінету Міністрів від 19 січня 2024 р. №67 «Деякі питання функціонування Державного картографо-геодезичного фонду України» актуалізує регламент роботи Державного картографо-геодезичного фонду (ДКГФ) та затверджує Порядок надходження, обліку, зберігання та використання матеріалів Державного картографо-геодезичного фонду, встановлює вимоги щодо оформлення та передачі картографічних та геодезичних даних у паперовому та електронному форматі до єдиного національного фонду [16].

Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 11 лютого 2014 р. №65 «Про затвердження Вимог до технічного і технологічного забезпечення виконавців топографо-геодезичних і картографічних робіт», який встановлює вимоги до технічного та технологічного забезпечення виконавців топографо-геодезичних та картографічних робіт. Документ окреслює перелік дозволених геодезичних приладів, засобів вимірювання та програмного забезпечення, а також умови їх калібрування і валідації з метою проведення робіт [17].

Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України від 3 листопада 2014 р. №435 «Про затвердження Порядку обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі» затверджує порядок обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі. Відповідний документ визначає процедуру періодичних перевірок та нівелювання опорних пунктів, вимоги до актів обстеження та умови введення точок мережі до банку геодезичних даних [18].

Аналіз нормативно-правових основ засвічує, що на сьогоднішній день в Україні сформовано комплекс законодавчих та регламентуючих документів, які визначають порядок виконання геодезичних робіт, організацію заходів щодо нівелювання та організації переходу на Європейську вертикальну референцну систему висот.

2.3. Визначення висот у системі EVRS2000 на території України

Отримання висот пунктів нівелірної мережі на території України у системі висот EVRS2000 ґрунтується на проведенні заходів високоточного геометричного нівелювання I та II класу, що дозволяє забезпечити надійний зв'язок між фундаментальними реперами, висоти яких визначені у Балтійській системі висот 1977 року, та реперами високоточного нівелювання на території Польщі, які функціонують у системі UELN/EVRS2000. Для цього було прокладено дві лінії нівелірної мережі: Львів - Шегині - Перемишль, Ковель - Ягодин - Хелм загальною довжиною 196 км (див. додаток А та Б).

На основі прокладених нівелірних мереж виконується GNSS-нівелювання фундаментальних, ґрунтових реперів та горизонтальних марок. Це дає можливість отримати еліпсоїдальні висоти відносно геоцентричної поверхні - референц-еліпсоїда GRS80 [19].

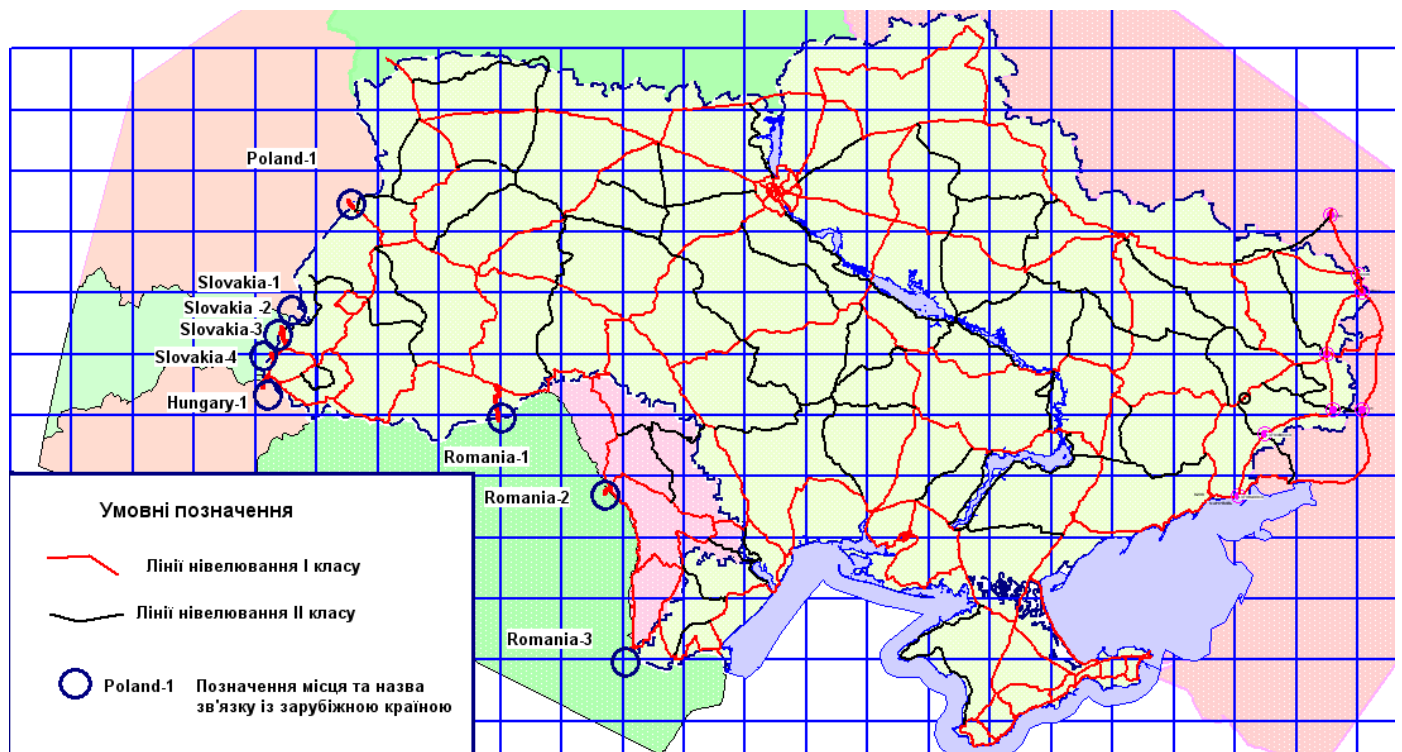


Рис.2.1. Узагальнена схема нівелірної мережі України I та II класів [20]

Для повноцінного функціонування висотної системи необхідна високоточна модель геоїда або квазігеоїда. В Україні створено низку моделей, зокрема - останню UQG2017 (*англ.* Ukrainian Quasigeoid 2017 - Український квазігеоїд 2017). UQG2017 - це національна модель квазігеоїда, побудована для території України в 2017 році, вона представляє собою цифрову модель висотної поверхні, яка відображає різницю між еліпсоїдальними висотами, отриманими за допомогою GNSS-спостережень, та нормальними висотами в Балтійській системі висот 1977 року. Модель квазігеоїда UQG2017 була побудована на основі моделі гравітаційного поля землі EGM2008 (*англ.* Earth Gravitational Model 2008 - Гравітаційна модель Землі) з застосуванням *аномалій Буге* - різниці між реальною силою тяжіння в певній точці та її нормальним значенням, обчисленим для даної точки за моделлю референц-еліпсоїда, застосуванням даних GNSS-нівелювання та принципу «Remove-Compute-Restore», яка передбачає побудову моделі геоїда, враховуючи глобальні та регіональні гравіметричні ефекти, що забезпечує максимальну точність моделі на локальній території [20].

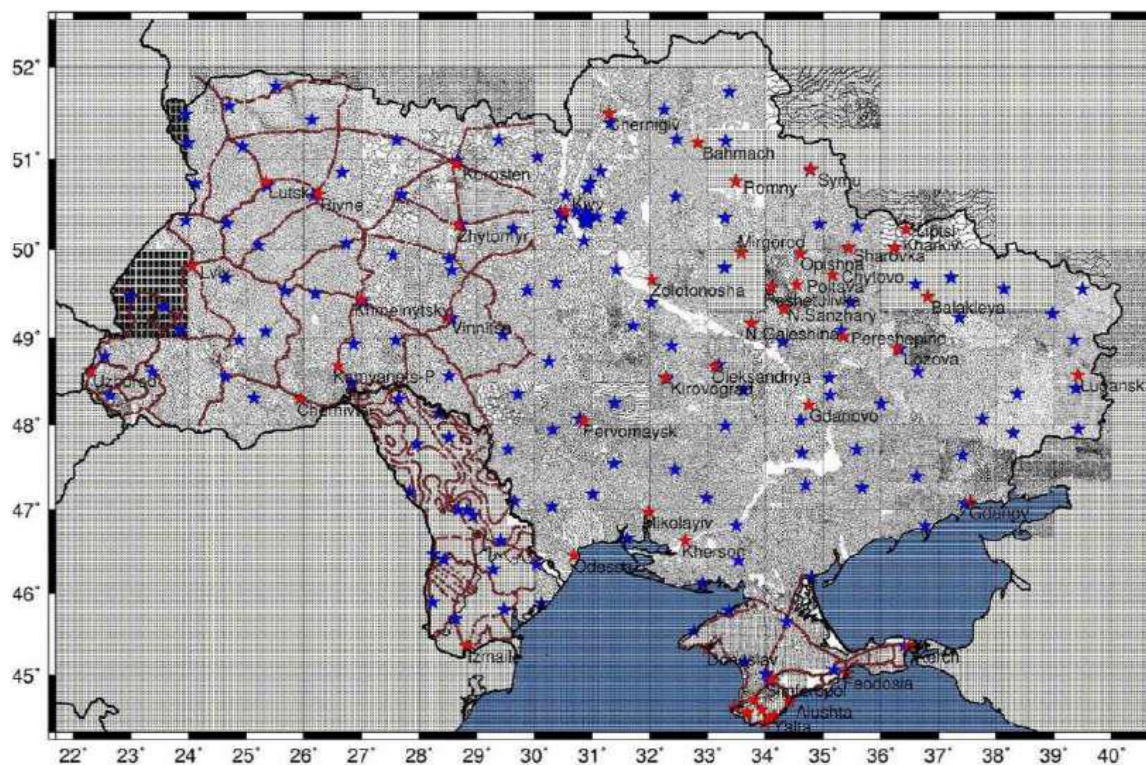


Рис. 2.2. Розподіл вхідних гравітаційних аномалій при побудові UQG2017:

Синій колір - аномалії Буге; Червоний колір - гравіметричні пункти

На рис. 2.3. наведено порівняння точності заходів щодо нівелювання на основі чотирьох загальноприйнятих гравітаційних моделей: EGM2008, EIGEN-6C4 (англ. European Improved Gravity model of the Earth by New techniques, version 6C4 - Європейська вдосконалена гравітаційна модель Землі, версії 6C4), XGM2019e_2159 (англ. Extended Gravity model 2019 extended, up to degree and order 2159 - Розширена гравітаційна модель 2019 року, розширена до ступеня і порядку 2159) та EGG2015 (англ. European Gravimetric Geoid 2015 - Європейський гравіметричний геоїд 2015 року). В таблиці 2.1 наведено точність визначення різниць висот геоїдів, найвищу точність з яких, забезпечує європейський геоїд EGG2015 [19].

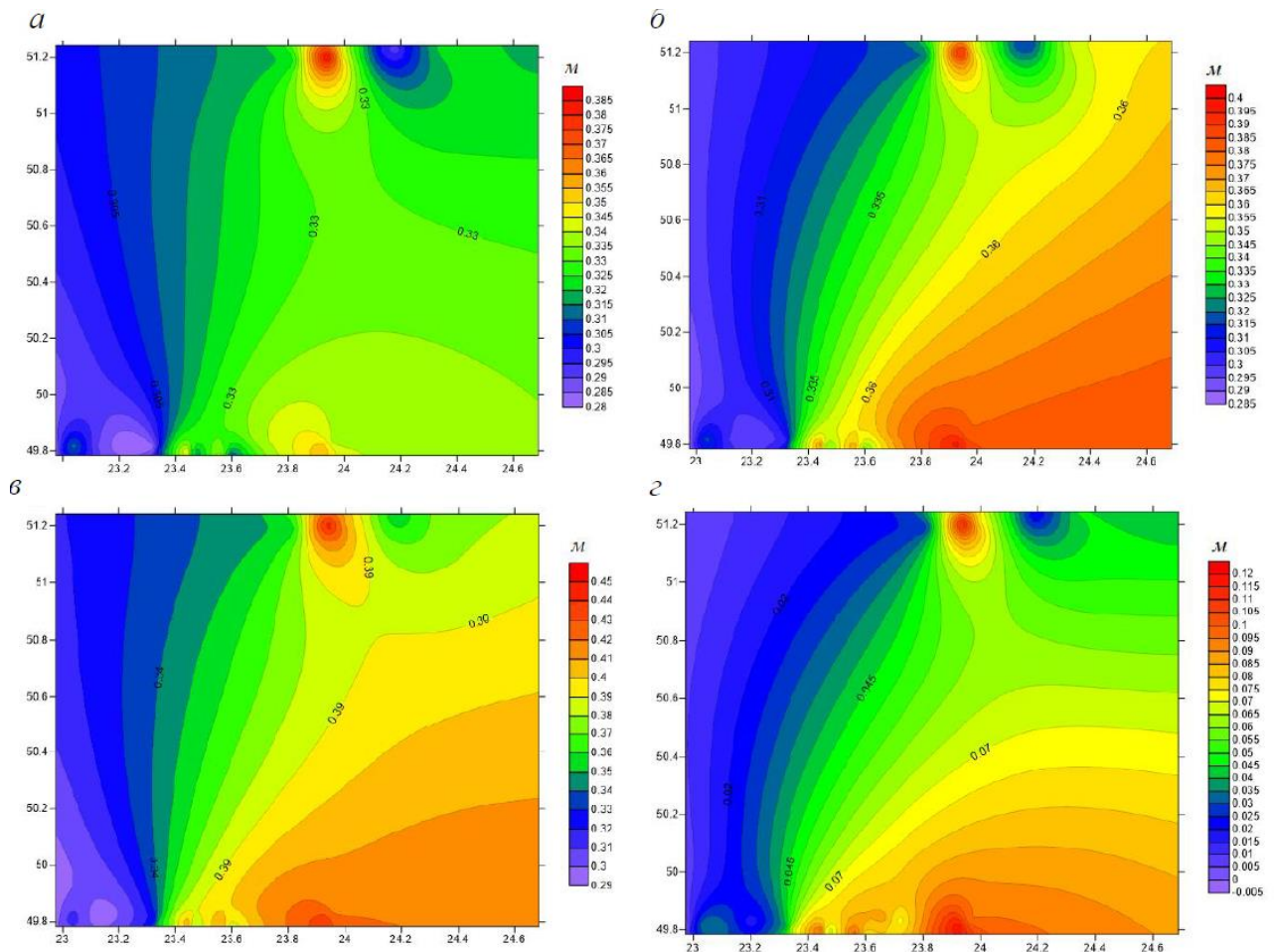


Рис.2.3. Математичні схеми різниць поверхні геоїдів: а - EGM2008, б - EIGEN-6C4, в - XGM2019e_2159, г - EGG2015 [20]

Таблиця 2.1.

Головні параметри різниць геоїдів

Різниця	Параметри, м			
	Мінімальне відхилення	Максимальне відхилення	Середнє відхилення	Стандартне відхилення
$\zeta_{\text{вим}} - \zeta_{\text{EGM2008}}$	0.27	0.39	0.32	0.32
$\zeta_{\text{вим}} - \zeta_{\text{EIGEN-6C4}}$	0.27	0.40	0.34	0.34
$\zeta_{\text{вим}} - \zeta_{\text{XGM2019e_2159}}$	0.28	0.45	0.37	0.37
$\zeta_{\text{вим}} - \zeta_{\text{EGG2015}}$	-0.1	0.12	0.06	0.07

Висновки до розділу 2

Узагальнюючи викладені у розділі положення, можна стверджувати, що впровадження Європейської вертикальної референцної системи висот в Україні є логічним етапом модернізації національної геодезичної інфраструктури. Основним мотивом переходу постає питання інтеграції національної висотної системи до європейського простору, що забезпечить гармонізацію геодезичних даних, спростить обмін геопросторовою інформацією. Офіційне залучення України до Об'єднаної європейської нівелірної мережі у 2019 році та прийняття Постанови Кабінету Міністрів №590 стали основою для запровадження на території Держави єдиного стандарту вертикальних відліків.

Організаційна структура впровадження EVRS включає комплексну взаємодію державних органів, наукових установ та міжнародних країн-партнерів. Координація заходів відбувається під керівництвом Держгеокадастру, який разом з Міністерством аграрної політики та продовольства України та профільними підприємствами відповідає за реалізацію проекту.

Аналіз нормативно-правових основ показав, що в Україні створено законодавче та регламентне підґрунтя для впровадження Європейської вертикальної референцної системи. Паралельно діють постанови та накази, що регламентують порядок проведення топографо-геодезичних робіт, виконання нівелювання та формування картографо-геодезичного фонду. Комплексність та взаємопов'язаність цих документів забезпечує надійну методичну та організаційну узгодженість заходів, пов'язаних з впровадженням нової системи висот.

Практичне впровадження EVRS ґрунтується на впровадженні моделі квазігеоїда та проведенні високоточного нівелювання I та II класів точності із встановленням зв'язку з пунктами мереж сусідніх держав. На основі прокладеної мережі виконується GNSS-нівелювання реперів, що дає змогу визначити еліпсоїдальні висоти в загальноприйнятій системі GRS80, а застосування квазігеоїда дозволяє здійснити точний перехід від еліпсоїдальних до нормальних висот.

Розділ 3. КАМЕРАЛЬНА ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ ПОЛЬОВИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

3.1. Програмне забезпечення камеральної обробки даних геодезичних спостережень

У процесі вирішення завдань високоточного аналізу та управління результатами обстеження нівелірних мереж вирішальне значення має комплексне програмне забезпечення, яке здатне забезпечити обробку, аналіз і контроль даних. Одним із таких програмних продуктів, що широко застосовуються на практиці, є система GeoLab.

GeoLab - це ліцензійний інтегрований програмний комплекс, розроблений з метою обробки геодезичних даних і спеціально адаптований для високоточного вирівнювання геодезичних мереж. Програма дозволяє автоматизувати цикл камеральної обробки - від імпорту польових даних до генерації звітів і каталогу координат, значно підвищуючи оперативність та точність обробки даних. GeoLab забезпечує цілісний підхід до роботи з великими обсягами геодезичних даних, що надходять з польових вимірювань, електронних приладів. Система підтримує автоматизований імпорт цифрових наборів даних, які містять інформацію про нівелірні роботи, опис пунктів, результати перевищень, GNSS-координати, базові виміряні величини та додаткові атрибути, зокрема, гравіметричні дані. Після завантаження інформації, GeoLab автоматично виконує перевірку коректності форматів, одиниць виміру та синтаксису записів. Вбудовані алгоритми перевірки забезпечують виявлення помилок у форматах файлів, арифметичних розбіжностей, синтаксичних неточностей, дублювання індексів пунктів, а також відсутності необхідних параметрів, що дозволяє своєчасно виявляти та виправляти помилки на етапі підготовки до вирівнювання [22].

Основною функцією програмного забезпечення є реалізація математично обґрунтованого методу найменших квадратів. Цей метод дозволяє знаходити

оптимальні координати пунктів геодезичної мережі шляхом мінімізації суми квадратів зважених похибок між спостереженими і розрахованими величинами. У програмі спостереження подаються у вигляді системи лінійних рівнянь, що описують зв'язки між пунктами мережі, а їх розв'язання виконується шляхом побудови та ітераційного вирішення системи нормальних рівнянь. Такий підхід забезпечує точність і узгодженість отриманих координат. GeoLab також дозволяє врахувати ваги вимірювань, при роботі з даними різної точності, забезпечуючи їх оптимальне використання у контексті вирівнювання.

Програмне забезпечення також інтегрує результати традиційного геометричного нівелювання з даними, отриманими за допомогою GNSS-спостережень. Це дає можливість одночасно працювати з еліпсоїдальними висотами, визначеними за супутниковими технологіями, і перевищеннями між пунктами нівелірних ходів. GeoLab забезпечує автоматизоване перетворення еліпсоїдальних координат у нормальні (ортометичні) висоти шляхом інтерполяції значень із цифрових геоїдальних моделей. Програма підтримує використання як глобальних моделей, таких як EGM2008, так і регіональних і національних, зокрема EGG2015 або локальних моделей, розроблених для окремих регіонів. Це дозволяє забезпечити повну сумісність оброблених даних з міжнародними та національними висотними системами, до яких належить і EVRS.

Характерною особливістю GeoLab є можливість оперативної обробки даних у реальному часі. Під час виконання GNSS-спостережень у режимі RTK або мережевого RTK GeoLab дозволяє здійснити безперервний контроль якості вимірювань, відображаючи поточний стан спостережень та виконуючи попереднє вирівнювання отриманих рішень безпосередньо під час польових робіт, значно підвищуючи ефективність робочого процесу, даючи змогу виявляти та коригувати невідповідності ще на етапі виконання вимірювань.

По завершенню процесу вирівнювання, програмне забезпечення автоматично формує детальні звіти про виконані роботи. У цих звітах наводяться значення

залишкових похибок для кожного спостереження, статистичні показники точності мережі, топологічна узгодженість мережі та інші параметри, необхідні для повноцінного аналізу якості проведених робіт.

Програма має у своєму складі вбудовані геодезичні модулі для виконання допоміжних розрахунків і підготовчих операцій. До їх числа належить функціонал для перетворення координат між різними системами, робота з картографічними проекціями, можливість створення схем креслень геодезичних мереж. Інтерфейс програми дозволяє інтерактивно редагувати схеми мережі, додавати або видаляти пункти, змінювати ваги вимірювань та структуру зв'язків між елементами мережі без необхідності повторного завантаження даних.

Таким чином, GeoLab забезпечує всебічне виконання всіх етапів камеральної обробки геодезичних спостережень - від початкової перевірки даних до фінального формування координат і висот пунктів мережі з повним аналізом точності. Завдяки гнучкості налаштувань, підтримці роботи з геоїдальними моделями та роботі в реальному часі GeoLab є одним з провідних інструментів камерального вирівнювання геодезичних мереж будь-якої складності.

3.2. Зрівнювання висотної геодезичної мережі

Вирівнювання нівелірної мережі I та II класу точності здійснюється параметричним методом за різницями геопотенціальних чисел, запропонованим Державним підприємством «Науково-дослідницький інститут геодезії та картографії» сумісно з Федеральним агентством картографії та геодезії Німеччини. Процес вирівнювання складається з кількох послідовних етапів, що забезпечують точне встановлення ортометричних висот геодезичних пунктів. На першому етапі проводиться визначення наближених висот нівелірних пунктів за результатами польових вимірювань, отриманих за допомогою високоточних оптичних та

електронних приладів. За вихідні геопотенційні числа пунктів взяті дані, отримані за результатами вирівнювання вузлових пунктів у центрі ВКГ Федерального агентства картографії і геодезії Німеччини (див. додаток В).

Далі формується система рівнянь, яка описує різниці геопотенціальних чисел (перевищень) для всіх секцій нівелірної мережі. Цей етап включає складання рівнянь, де різниця геопотенціальних чисел між двома суміжними пунктами визначається як залежність від їх початкових наближених висот. Рішення цієї системи нормальних рівнянь дозволяє обчислити кінцеві значення висот для всіх нівелірних пунктів, після чого проводиться оцінка точності вирівнювання всієї мережі.

Процедура вирівнювання передбачає обчислення ваг секцій нівелювання. Вага секції розраховується за формулою 3.1.

$$P = \frac{C}{L} K, \quad (3.1)$$

де: C - постійний коефіцієнт, який береться кратним 10, з таким розрахунком, щоб вага для секції була в межах від 1 до 10; L - довжина секції в км.

Коефіцієнт K для I класу точності приймається за 1 та 0.36 для II класу точності відповідно.

Для обчислення геопотенціальних чисел та їх різниць між двома суміжними пунктами нівелювання (P , B) використовується алгоритм, який базується на визначенні:

$$C_{PB} = C_P - C_B = (W_B - W_P) = \int_P^B g dh, \quad (3.2)$$

де: C_P і C_B геопотенціальні числа пунктів P і B відповідно.

Для обчислення різниць геопотенціальних чисел ходу нівелювання між пунктами в точках P і B використовувалася формула 3.3.

$$\Delta C_{PB} = C_P - C_B = \int_P^B \sum_{k=1}^K g_k h_k, \quad (3.3)$$

де: h_k - перевищення між проміжними точками; g_k - значення сили тяжіння в проміжних точках нівелювання.

В зв'язку з тим, що прямі виміри сили тяжіння в геодезії не виконуються, то для їх обчислення використовуються значення аномалій Буге Δg_{Buge} з точністю на рівні 1 мГал (Мілігал).

Значення сили ваги в окремих точках визначається за формулами 3.4-3.12.

$$g = \Delta g_{Buge} - \delta_{faa} + \delta_{Buge} + \gamma_Q, \quad (3.4)$$

$$\delta_{faa} = 0.3086 \cdot H^Y, \quad (3.5)$$

$$\delta_{Buge} = 2\pi G\rho H^Y, \quad (3.6)$$

$$\gamma_Q = \gamma_0^{GRS80} - k_1 H^Y + k_2 (H^Y)^2, \quad (3.7)$$

$$k_1 = 0.308769(1 + 0.000220 \sin^2 B), \quad (3.8)$$

$$k_2 = 0.07212 \cdot 10^{-6}, \quad (3.9)$$

$$\gamma_Q = \gamma_0^{GRS80} - k_1 H^Y + k_2 (H^Y)^2, \quad (3.10)$$

$$\gamma_0^{GRS80} = \gamma_a \frac{1 + k \sin^2 B}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B}}, \quad (3.11)$$

$$k = \frac{b\gamma_b}{a\gamma_a} - 1, \quad (3.12)$$

де: Δg_{Buge} - аномалія Буге; δ_{Buge} - редуція Буге; δ_{faa} - поправка у вільному повітрі, яка традиційно вводиться в аномалії Буге; G - гравітаційна стала, що приймається за $66,73 \times 10^{-9} \text{ см}^3 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{с}^{-2}$; ρ - прийнята величина середньої густини в $\text{г}/\text{см}^3$, для

України значення приймається за 2.3 г/см^3 ; H^Y - нормальна висота точки; γ_Q - нормальна сила тяжіння в точці поверхні; γ_0^{GRS80} - нормальна сила тяжіння на еліпсоїді GRS80 в точці в мГал; B - широта точки на еліпсоїді GRS80.

Для виконання обчислень використовуються значення параметрів, що наведені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Основні сталі величини для еліпсоїду GRS80

Найменування параметру	Значення для еліпсоїду GRS80
a , м (велика піввісь)	6378137
b , м (мала піввісь)	6356752.3141
e^2 (перший ексцентриситет еліпсоїду)	0.00669438002290
γ_a , м/с ² (нормальна сила тяжіння на екваторі)	9.7803267715
γ_b , м/с ² (нормальна сила тяжіння на полюсі)	9.8321863685
k , коефіцієнт Гамільтона	0.001931851353
U_0 , м ² /с ² (потенціал на нормальному еліпсоїді)	62636860.850

Геопотенціальні числа визначаються у геопотенціальних одиницях GPU: 1 GPU = 1 кГал·м;

$$1000 \text{ Гал} \cdot \text{м} = 1000000 \text{ мГал} \cdot \text{м}.$$

За результатами вирівнювання нівелірної мережі формується таблиця характеристик нівелірних ходів (див. рис. 3.1.).

№ з/п	Індекс ходу	Клас ходу	Індекс початку ходу	Індекс кінця ходу	Довжина ходу м	Виміряне перевищення м	Виміряна різниця геопот. чисел kgal-m	В геопотенціальних числах, в gal-m			В нормальних висотах, в мм		
								Допустима	Нев'язка	Різниця	Допустима	Нев'язка	Різниця
1	X20767	2	N3627B0030	N3634A0180	101900	-32.034	-31.432	49.5	1.0	-48.5	50.5	1.0	-49.5
2	X20378	2	N3632B0010	M3609A0220	190100	13.848	13.587	67.6	2.1	-65.5	68.9	2.1	-66.8
3	X20934	2	N3632B0010	N3627B0030	129500	49.279	48.355	55.8	0.9	-54.9	56.9	0.9	-56.0
4	X20311	2	N3632B0010	M3613A3060	230500	-1.060	-1.042	74.4	64.1	-10.3	75.9	65.4	-10.5
5	X20357	2	N3632B0110	M3609B0300	143500	-15.005	-14.724	58.7	17.6	-41.1	59.9	18.0	-41.9
6	X20353	2	N3634B0010	M3604A0410	20000	5.902	5.791	21.9	11.6	-10.3	22.4	11.8	-10.6
7	X20317	2	N3634B0150	M3611A0060	198699	13.047	12.806	69.1	39.2	-29.9	70.5	40.0	-30.5
8	X32166	3	N3632B0110	N3633C0250	63200	-28.947	-28.403	77.9	0.0	-77.9	79.5	0.0	-79.5
9	X30334	3	N3632B0110	M3602C0090	22700	-24.156	-23.702	46.7	45.1	-1.6	47.6	46.0	-1.6
10	X32212	3	N3633C0230	N3634C0010	50600	1.153	1.131	69.7	15.7	-54.0	71.1	16.0	-55.1
11	X32209	3	N3633C0230	N3633C0250	36700	-39.045	-38.310	59.4	11.8	-47.6	60.6	12.0	-48.6
12	X31923	3	N3633C0230	M3603C0310	23300	-12.371	-12.138	47.3	3.9	-43.4	48.3	4.0	-44.3
13	X30344	3	N3633C0250	M3602B0470	38100	-6.426	-6.305	60.5	15.7	-44.8	61.7	16.0	-45.7
14	X32170	3	N3634A0420	N3634C0010	61000	29.918	29.356	76.5	34.3	-42.2	78.1	35.0	-43.1
15	X30356	3	N3634B0010	M3605B0250	52100	-31.780	-31.181	70.7	45.1	-25.7	72.2	46.0	-26.2
16	X31936	3	N3634C0010	M3604C0190	35000	-40.796	-40.028	58.0	3.9	-54.1	59.2	4.0	-55.2
17	X31926	3	N3634C0010	M3603A0300	40700	5.815	5.705	62.5	21.6	-41.0	63.8	22.0	-41.8
18	X32205	3	N3634C0010	N3633C0230	150700	-1.152	-1.131	120.3	14.7	-105.6	122.8	15.0	-107.8
19	X10250	1	M3601A0390	M3601A0690	2000	1.544	1.514	4.2	0.5	-3.7	4.2	0.5	-3.7
20	X10248	1	M3601A0390	M3601A1100	1400	4.609	4.522	3.5	1.0	-2.5	3.5	1.0	-2.5
21	X10249	1	M3601A0570	M3601A0390	800	-1.712	-1.679	2.6	0.4	-2.2	2.7	0.4	-2.3
22	X10256	1	M3601A0690	M3601A1160	5500	-2.709	-2.658	6.9	1.9	-5.0	7.0	1.9	-5.1
23	X10253	1	M3601A0690	M3601A0310	1600	-1.640	-1.609	3.7	0.0	-3.7	3.8	0.0	-3.8

Рис. 3.1. Характеристики нівелірних ходів після вирівнювання

У таблиці наведено розгорнуті дані щодо кожного ходу. Зокрема, вказано індекс ходу, що дозволяє його ідентифікувати, та зазначено клас, до якого належить конкретний хід, подано індекси початкового і кінцевого пунктів, між якими виконувались нівелірні вимірювання, довжину ходу в кілометрах. Окрім цього, зазначено перевищення, що було визначено у нормальній системі висот, а також відповідне значення перевищення у геопотенціальних числах.

Для оцінки точності нівелювання в таблиці подано як допустимі нев'язки для кожного ходу - окремо в геопотенціальних числах і в нормальній системі висот, — так і обчислені фактичні (абсолютні) нев'язки, які виникли під час обробки результатів. Також зазначено різницю між фактичними та допустимими нев'язками, що дозволяє оперативно оцінити, наскільки результати нівелювання відповідають встановленим нормативним вимогам у кожній системі відліку.

На завершальному етапі складаються каталоги висот пунктів, сформовані відповідно до номенклатурних аркушів карти масштабу 1:200 000, та схеми нівелірної

мережі на листах карти масштабу 1:200 000 (див. додаток Г, Д), що ґрунтуються на існуючих топографічних картах. На схемах нівелірної мережі показуються нівелірні ходи та нівелірні пункти (репера, марки, геодезичні пункти тощо), що включені в каталог висотних пунктів.

На кінцевому етапі, результат вирівнювання геодезичної мережі завантажується в Банк геодезичних даних - систему, що складається з баз даних геодезичних пунктів (супутникових, геодезичних, нівелірних, гравіметричних), системи керування базами даних геодезичних пунктів і прикладного програмного забезпечення для оброблення, зберігання та захисту даних, організації доступу до геодезичної інформації [15].

Висновки до розділу 3

Узагальнюючи викладені положення, можна стверджувати, що використання інтегрованих програмних комплексів як GeoLab, значно підвищує ефективність та точність виконання камеральних обчислень під час обробки результатів геодезичних спостережень. Програма забезпечує повноцінний супровід процесу вирівнювання нівелірної мережі - від автоматизованого імпорту польових даних до формування детальних звітів та каталогів висот. Забезпечення коректності форматів вихідних даних, перевірка арифметичної та синтаксичної узгодженості, можливість оперативного контролю вагових коефіцієнтів секцій і раннього виявлення фактичних нев'язок дають змогу мінімізувати вплив помилок на результати обробки. Це дозволяє знизити загальну похибку вирівнювання до рівня, що відповідає вимогам I класу точності та європейським нормам виконання робіт з нівелювання.

Вирівнювання нівелірної мережі I та II класу точності, виконане параметричним методом за різницями геопотенціальних чисел, підтвердило високу точність та надійність методу. Розрахунок сили тяжіння на основі аномалії Буге із врахуванням поправок редукції та нормальної сили тяжіння за еліпсоїдом GRS80 дозволив

здійснити точне визначення геопотенціальних чисел пунктів і забезпечив коректне обчислення нормальних висот реперів. Створення таблиць характеристик нівелірних ходів, оцінка допустимих і фактичних нев'язок та формування каталогів висот з геоприв'язкою до номенклатурних аркушів топографічних карт дає можливість здійснювати подальшу систематизацію та централізоване зберігання отриманих результатів у Банку геодезичних даних.

У підсумку інтеграція цифрових ІТ-рішень із класичними методами геодезичних робіт забезпечує не лише підвищення точності та надійності обчислень, але й створює гнучку основу для адаптації національної нівелірної мережі до стандартів Європейської вертикальної референцної системи.

ВИСНОВКИ

За результатами опрацювання теми та завдань кваліфікаційної роботи можна зробити наступні висновки:

1. Проведений аналіз існуючої Балтійської системи висот 1977 року, яка вже понад 40 років забезпечує єдність геодезичних даних на території України, дає можливість визначити її основні переваги в історичному контексті, а саме: єдину основу ведення відліку, високу точність на момент впровадження та уніфікацію даних. Проте, в сучасних реаліях Балтійська система висот є застарілою, адже не забезпечує зв'язок з міжнародноприйнятими системами координат та сучасними гравітаційними моделями, а також не враховує геодинамічні процеси. Саме тому, Європейська вертикальна референцна система виступає логічним етапом оновлення висотної мережі, яка забезпечує високу точність та сумісність з глобальними системами координат, інтегрує дані GNSS-спостережень та гравітаційних моделей, формулюючи надійну основу для вирішення сучасних геодезичних завдань.

2. Процес впровадження Європейської вертикальної референцної системи, який бере свій початок з 2019 року, моменту приєднання України до UELN та затвердження Постанови №590 у 2023 році, яка визначає EVRS як національний стандарт і встановлює перехід у період до 1 січня 2026 року. Практичний аспект впровадження EVRS здійснюється у два етапи: по-перше - проведення високоточного геометричного нівелювання I та II класів для уточнення висот пунктів державної нівелірної мережі та забезпечення зв'язків із пунктами сусідніх країн, що вже інтегровані в UELN/EVRS2000; по-друге - виконання GNSS-нівелювання із застосуванням актуалізованої моделі квазігеоїда для переходу від еліпсоїдальних до ортометричних висот.

3. Метод камеральної обробки даних та вирівнювання нівелірної мережі шляхом параметричного вирівнювання за різницями геопотенціальних чисел у програмному забезпеченні GeoLab дозволяє забезпечити ефективність обробки

результатів польових спостережень, гарантуючи точність та достовірність отриманих результатів.

Таким чином, впровадження Європейської вертикальної референцної системи на території України є обґрунтованим, стратегічно важливим та необхідним кроком на шляху до інтеграції держави у європейський простір, що дозволить не лише гармонізувати національну висотну основу у відповідності до загальноєвропейських стандартів, а й забезпечити сумісність національних та європейських геоданих, підвищити точність топографо-геодезичних, кадастрових та інженерних робіт, створити інформаційну базу управління просторовими даними.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. GGOS. Height Systems [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://ggos.org/item/height-systems/#learn-this>
2. Тельнов В. Г. (2019) Геодезія: навчальний посібник для спеціальностей 184 «Гірництво», 185 «Нафтогазова інженерія та технології». - Дніпро: НТУ «Дніпровська політехніка»,. - 316 с. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://geodez.nmu.org.ua/ua/dopmat/1/Геодезія_Тельнов.pdf
3. Топографічне картографування. Навчальний посібник / Л.М. Даценко,. О.С. Гончаренко. К.: КНУ ім. Т. Шевченка, 2019. - 88с.
4. Bundesamt für Kartographie und Geodäsie. European Vertical Reference System [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/Home/home.html>
5. Держгеокадастр розпочинає впровадження використання на території України Європейської вертикальної референцної системи - European Vertical Reference System (EVRS) [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://land.gov.ua/derzhgeokadastr-rozpochynaye-vprovadzheniya-vykorystannya-na-terytoriyi-ukrayiny-yevropejskoyi-vertikalnoyi-referencznoyi-systemy-european-vertical-reference-system-evrs/>
6. Country Report of Ukraine - 2018 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://ggim.un.org/country-reports/documents/National_Report_Ukraine_DM_ENG.pdf
7. Інститут геодезії Львівської політехніки - переможець тендеру на виконання робіт із впровадження на території України Європейської системи висот [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://lpnu.ua/news/instytut-geodezii-lvivskoi-politekhniki-peremozhets-tenderu-na-vikonannia-robit-iz>
8. Постанова Кабінету Міністрів України про «Деякі питання використання Європейської вертикальної референцної системи (EVRS)» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/590-2023-%D0%BF#Text>

9. Sossa, R. (2021). Contemporary status of topographic mapping in Ukraine. Polish Cartographical Review, 53, 1-12. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://sciendo.com/article/10.2478/pcr-2021-0001>
10. UKRAINE Country Report 2022-2023 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://ggim.un.org/country-reports/documents/Ukraine_National_Report_2023.pdf
11. Відбулася онлайн-зустріч представників Держгеокадастру з Європейською головною організацією географічної інформації [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.kmu.gov.ua/news/vidbulasya-onlajn-zustrich-predstavnikiv-derzhgeokadastru-z-yevropejskoyu-golovnoyu-organizaciyeyu-geografichnoyi-informaciyi>
12. Закон України «Про геодезію, картографію та просторову інформацію» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/353-14#Text>
13. Постанова Кабінету Міністрів України «Деякі питання реалізації частини першої статті 12 Закону України «Про топографо-геодезичну і картографічну діяльність»» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/646-2013-%D0%BF#Text>
14. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/661-2013-%D0%BF#Text>
15. Постанова Кабінету Міністрів України «Про затвердження Порядку охорони геодезичних пунктів» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/836-2017-%D0%BF#Text>
16. Постанова Кабінету Міністрів України «Деякі питання функціонування Державного картографо-геодезичного фонду України» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/67-2024-%D0%BF#Text>
17. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України «Про затвердження Вимог до технічного і технологічного забезпечення виконавців топографо-

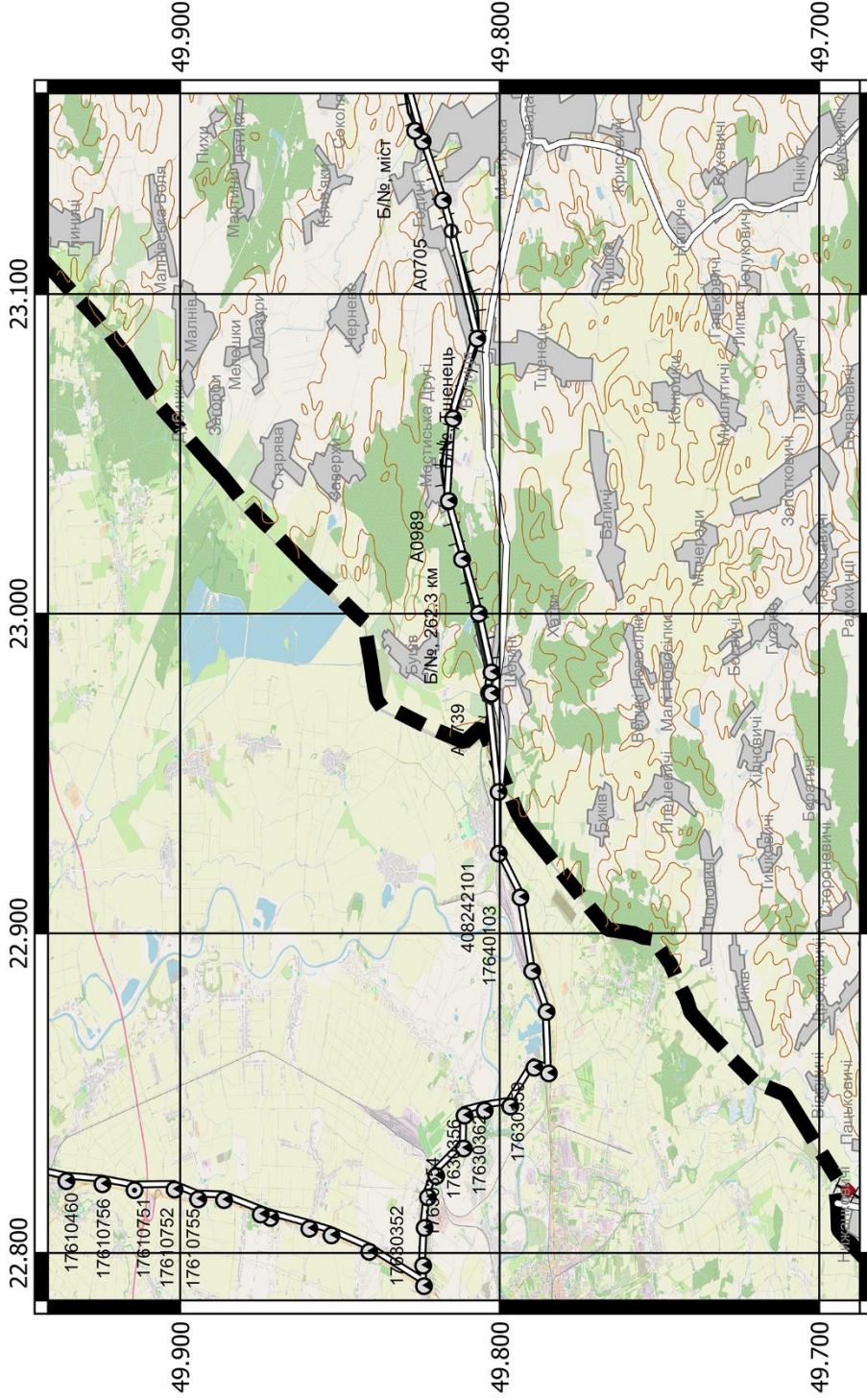
геодезичних і картографічних робіт» [Електронний ресурс]. - Режим доступу:
<https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0395-14#Text>

18. Наказ Міністерства аграрної політики та продовольства України «Про затвердження Порядку обстеження та оновлення пунктів Державної геодезичної мережі» [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1467-14#Text>
19. Zablotskyi, Fedir & Dzhuman, Bohdan & Brusak, Ivan. (2021). Про точність моделей (квазі)геоїда відносно системи висот UELN/EVRS2000. Modern achievements of geodesic science and industry. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: https://www.researchgate.net/publication/351416434_Pro_tocnist_modelej_kvazigeoida_vidnosno_sistemi_visot_UELNEVRS2000
20. Trevoho, I., Zablotskyi, F., Piskorek, A., Dzhuman, B., & Vovk, A. (2021). About modernization of Ukrainian height system. Geodesy, cartography and aerial photography. [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://science.lpnu.ua/sites/default/files/journal-paper/2021/jul/24681/vse-1copy-13-26.pdf>
21. Матеріали конференції Геофорум 2024 [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://zgt.com.ua/wp-content/uploads/2024/04/%D0%A8%D0%BB%D1%8F%D1%85%D0%B8-%D1%80%D0%BE%D0%B7%D0%B2%D0%B8%D1%82%D0%BA%D1%83-%D0%A3%D0%A1%D0%9A-2000-%D0%9A%D0%B0%D1%80%D0%BF.pdf>
22. GeoLab Home page [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <https://www.geolabsolutions.com/>

ДОДАТКИ

Додаток А

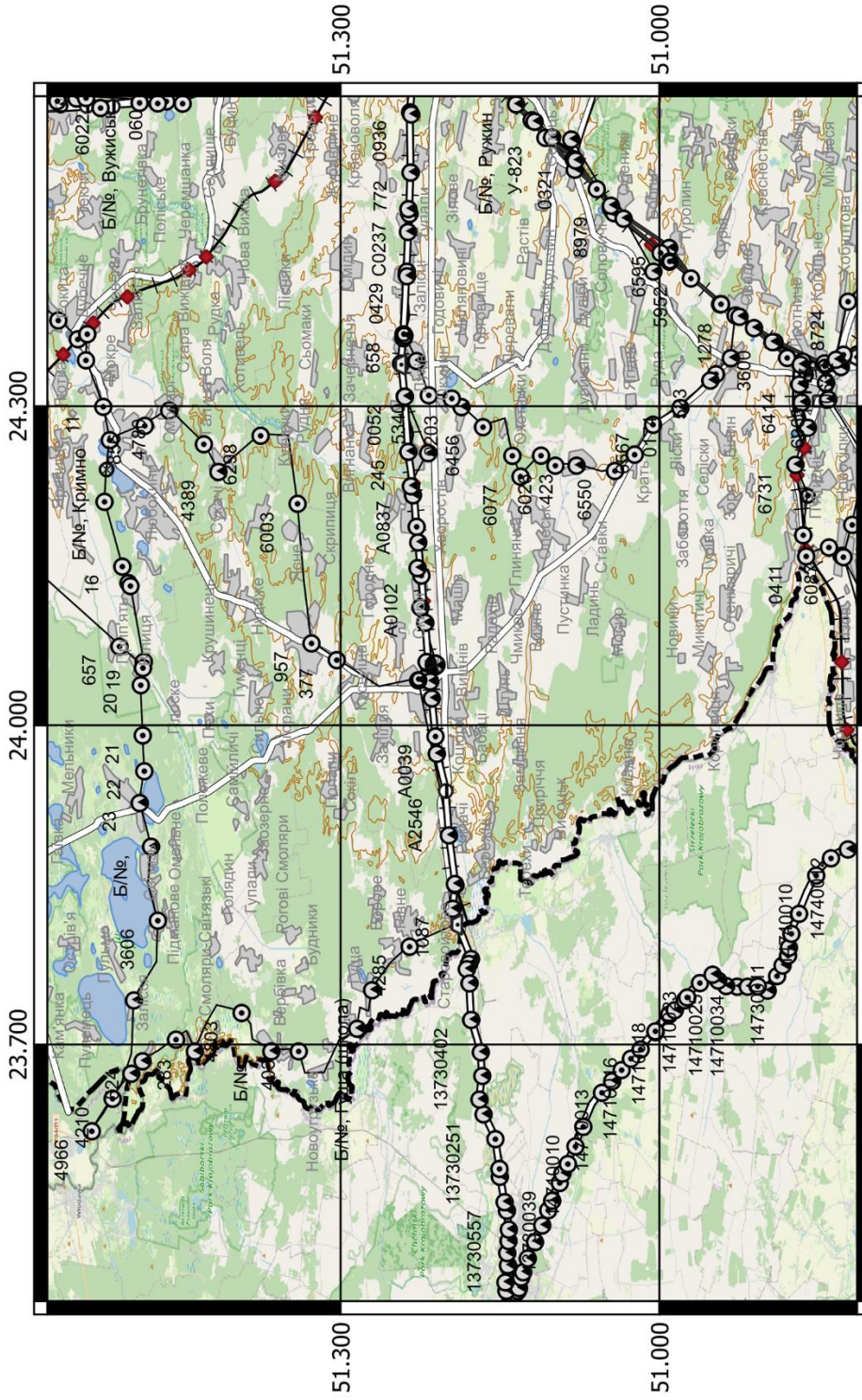
Складові елементи нівелірного ходу Ковель – Ягодин – Хелм



Умовні позначення

- | | | | | | | |
|---------------------------------|----------------|------------|----------|---------|--------------------------|---------|
| пункти нівелірної мережі | Б | вод. пост. | □ | футшток | ⊗ | тм. рп. |
| ▲ | глуб. рп. | * | астр. | ⊙ | ст. рп. | |
| ▼ | нуль бар. мет. | ▲ | вік. рп. | ⊙ | гр. рп. | |
| ⊙ | ст. марка | ▲ | фнд. рп. | ⊗ | Державний кордон України | |
| ⊙ | гор. марка | ⊙ | ск. рп. | | | |

Складові елементи нівелірного ходу Львів – Шегині – Перемишль



Умовні позначення

- | | | | |
|---------------------------------|------------------|------------|----------------------------|
| пункти нівелірної мережі | Б вод. пост | футшток | ⊗ т.м. рп. |
| Δ УІМ ГНСС | ▲ глибок. рп. | * астр. | ⊙ ст. рп. |
| ▽ грав. пункт | ▲ нуль бар. мет. | ▲ вік. рп. | ⊙ гр. рп. |
| ⊙ гор. марка | ⊙ ст. марка | ▲ фнд. рп. | ⊞ Державний кордон України |
| | ⊙ паля | ⊙ ск. рп. | |

Додаток В

Фрагмент списку вихідних нівелірних пунктів для вирівнювання нівелірної мережі I, II та III класів наданих ВКГ Федерального агентства картографії і геодезії Німеччини

N з/п	Індекс пункту в БГД	Назва пункту (українська)	Назва пункту (в_мережі UELN)	Широта в ETRS89 градуси	Довгота в ETRS89 градуси	Геопотенціальні числа kgal·m	Нормальні висоти м
1	M3418A0330	16710018	1723666	50.283200	23.576980	240.9835	245.6364
2	M3418A0340	16710017	1723667	50.290150	23.567520	247.1262	251.8978
3	M3418A0350	16710023	1723668	50.298210	23.556560	237.6656	242.2540
4	M3418A0360	16710015	1723669	50.305530	23.542340	241.4967	246.1590
5	M3429A0890	35к	1900044	48.952281	22.429880	237.0650	241.6714
6	M3429A0670	7	1900058	48.886769	22.418710	204.4921	208.4657
7	M3435A2060	9.2	1900081	48.656787	22.265049	127.3715	129.8476
8	M3435A2830	20	1905008	48.431597	22.137392	98.6433	100.5626
9	M3506A0270	2388	2600001	51.609272	29.059731	126.6971	129.1255
10	M3501A0420	80	2600019	51.895371	24.136120	149.0200	151.8729
11	M3435A2610	K-4404	1100739	48.410278	22.173611	102.0417	104.0273
12	M3701A0130	9583	3031001	51.676390	36.296235	160.3148	163.3874
13	M3704A0010	0612	3031002	51.716188	39.228477	104.8179	106.8256
14	M3704A0020	2482	3031003	51.022407	39.505822	132.8894	135.4438
15	M3716A0010	6761	3031004	50.201202	39.602140	93.7599	95.5686
16	M3729A0210	Б/№, Міллерове	3031005	48.920537	40.373912	139.6105	142.3215
17	L3635A0140	3316	3100001	44.480927	34.139890	244.0537	248.8986
18	L3634A1160	60	3100002	44.637182	33.588393	92.6936	94.5301
19	L3629A0910	4307	3100003	44.686794	34.401250	35.8885	36.5990
20	L3628A0100	9191	3100004	44.698943	33.792150	116.9419	119.2586
21	L3629A1480	8170	3100005	44.877765	34.993110	82.0244	83.6475
22	L3629A0010	7432	3100006	44.972683	34.096348	236.6461	241.3327
23	L3629A1430	9613	3100007	45.015994	34.961111	293.0662	298.8717
24	L3630A0200	1836	3100008	45.049975	35.353242	40.8926	41.7008
25	L3630A1590	6206	3100009	45.141768	35.791843	74.3880	75.8580
26	L3725A0280	6197	3100010	45.165537	36.181684	44.6735	45.5560
27	L3630A0190	4418	3100011	45.174389	35.365923	36.4385	37.1582
28	L3630A1110	7143	3100012	45.307166	35.755920	16.8957	17.2292
29	L3725A0430	6010	3100013	45.325851	36.448571	21.4179	21.8406
30	L3719A0060	1731	3100014	45.368897	36.147721	73.2913	74.7381

