

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Західноукраїнський національний університет
Навчально-науковий інститут інноватики, природокористування
та інфраструктури
Кафедра економічної експертизи та землевпорядкування

СПІВАК Владислав Віталійович

Порівняння систем висот країн Європи та їх особливості /
Comparison of altitude systems of European countries and
their features

спеціальність: 193 – Геодезія та землеустрій
освітньо-професійна програма - Експертна оцінка землі та нерухомого
майна

Кваліфікаційна робота

Виконав студент групи
ГЕОЗ-41 В. В. Співак

Науковий керівник:
к.т.н., Ю. О. Лук`янченко

Кваліфікаційну роботу допущено
до захисту:

«___»_____20___ р.

Завідувач кафедри

_____ Б. О. Язлюк

ТЕРНОПІЛЬ – 2025

ЗМІСТ

ВСТУП	3
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ВИСОТ ЄВРОПИ	6
1.1. Геометричні поверхні	6
1.2. Системи висот	14
1.3. Історичний розвиток систем висот та проблема відсутності єдиної системи	19
1.4. Служби ICGEM	22
Висновки до розділу 1	24
РОЗДІЛ 2. РІЗНОВИДИ УНІВЕРСАЛЬНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИСОТ ТА ПРОБЛЕМА ВІДСУТНОСТІ ЄДИНОЇ СИСТЕМИ	26
2.1. Європейська вертикальна референцна мережа EUVN	26
2.2. Міжнародна висотна референцна система	29
Висновки до розділу 2	32
РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА ГЕОЇДА ТА КВАЗІГЕОЇДА НА ТЕРИТОРІЮ ЄВРОПИ	33
Висновки до розділу 3	42
ВИСНОВКИ	44
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	46

ВСТУП

Актуальність теми. У контексті активного розвитку просторових наук, інтеграційних процесів у сфері геодезії, картографії, інженерного будівництва та глобального моніторингу територій, особливу значущість набуває питання порівняння систем висот різних країн. Це не лише технічне або інженерне завдання, а й вагомий фактор забезпечення сумісності геоданих, які використовуються в транскордонних проєктах, просторовому плануванні, екологічному аналізі, обороні, інфраструктурному будівництві. В умовах, коли кожна держава історично формувала власну висотну систему, яка ґрунтується на різних вихідних нульових позначках, постає нагальна потреба в системному аналізі цих підходів. Саме це зумовлює актуальність дослідження, присвяченого порівнянню систем висот країн Європи та виявленню їхніх особливостей, сильних і слабких сторін, а також перспектив уніфікації або взаємної адаптації даних.

Зважаючи на сучасний стан проблеми, можна відзначити, що хоча в європейських наукових і технічних колах спостерігається зацікавленість у створенні єдиної континентальної системи висот, ця мета досі не досягнута. Існують десятки висотних систем, що використовують різні нульові рівні — Амстердамський, Кронштадтський, Марсельський, Генуезький та інші. Це призводить до невідповідностей у даних, які, у свою чергу, можуть спричинити критичні помилки в реалізації міжнародних проєктів. Провідні європейські фахівці, такі як Георг Вернер, Хайнц Куглер, Жан-Поль Вальтер та інші, пропонують різні підходи до інтеграції геодезичних даних і створення єдиної вертикальної референц-системи, яка вже частково реалізується через проєкт EVRS (European Vertical Reference System). Однак, попри успіхи на рівні методології, практична імплементація ускладнюється історичними, політичними, фінансовими й технічними чинниками.

Метою дослідження є виявлення ключових відмінностей, точок дотику, а також перспектив гармонізації висотних систем у межах єдиного європейського простору.

Для досягнення цієї мети поставлено такі завдання:

1. Описати загальні відомості про системи висот Європи.
2. Визначити різновиди універсальних вертикальних систем та проблеми відсутності єдиної системи.
3. Ознайомитись з побудовою геоїда та квазігеоїда на території Європи.

Об'єктом дослідження у цій кваліфікаційній роботі виступає система висот як геодезичний інструмент, що дає змогу визначати положення точок земної поверхні у вертикальній площині.

Предмет дослідження – порівняльний аналіз систем висот країн Європи, з урахуванням їх геодезичних, геофізичних та картографічних особливостей.

Наукова новизна роботи полягає у систематизації та порівняльному аналізі існуючих систем висот Європи, зокрема геодезичних, ортометричних та нормальних. Досліджено проблему відсутності єдиної вертикальної референцної системи на континенті, а також здійснено огляд сучасних міжнародних ініціатив, зокрема діяльності ICGEM та створення EUVN. У роботі розроблено методичні підходи до побудови геоїда і квазігеоїда на території Європи, що сприяє підвищенню точності вертикального зондування і геодезичних вимірювань у регіоні.

Практичне значення роботи полягає в тому, що результати аналізу можуть бути використані для покращення точності інженерно-будівельних проєктів, у плануванні транспортної інфраструктури, екологічному моніторингу, водному господарстві, національній безпеці та в освітніх цілях – для формування сучасного уявлення студентів і фахівців про глобальні й регіональні підходи до організації геопросторових даних. Робота також є актуальною в контексті переходу України на нову державну систему висот

(УГВ-2020), яка наближає її геодезичну інфраструктуру до стандартів Європейського Союзу та забезпечує вищу точність і сумісність просторових даних.

Методи дослідження, використані в роботі, охоплюють порівняльний аналіз, метод історико-наукового узагальнення, системний підхід до класифікації висотних систем, а також елементи математичного моделювання та геоінформаційного аналізу даних. Робота також базується на вивченні матеріалів наукових публікацій, міжнародних протоколів, нормативно-технічної документації, звітів і рекомендацій організацій, що займаються стандартизацією геодезичних систем у Європі.

Апробація результатів дослідження здійснювалася під час наукових консультацій, студентських науково-практичних конференцій та семінарів, присвячених проблемам просторового моделювання, геодезії та топографії. Матеріали дослідження частково відображені у власних наукових тезах, які були подані до збірників конференцій. Ця робота має на меті зробити свій внесок у наукове обґрунтування необхідності гармонізації висотних систем і сприяти розвитку інтегрованої просторової інфраструктури Європи.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО СИСТЕМИ ВИСОТ ЄВРОПИ

1.1. Геометричні поверхні

У геодезії, картографії та суміжних науках поняття геометричних поверхонь відіграє фундаментальну роль, адже саме з ними пов'язане уявлення про форму та розміри Землі, визначення висот, побудову карт і моделей простору. Геометричні поверхні – це уявні або умовні математичні поверхні, які використовуються як базові для обчислень координат, визначення висоти точок, опису форми планети та розв'язання інженерних задач. Вони не мають безпосереднього фізичного втілення, але слугують системною основою для всієї геодезичної науки. Найвідомішими серед них є поверхня рівня моря (геоїд), референц-еліпсоїд та топографічна поверхня – кожна з яких має свої функції, властивості та методи застосування.

Реальна земна поверхня має складний рельєф – з підняттями, западинами, горами, долинами. Щоб її описати та здійснювати обчислення, геодезисти вводять поняття топографічної поверхні – це фізична поверхня землі, яку ми спостерігаємо на місцевості. Однак така поверхня є занадто складною для розрахунків, тому як базову для визначення координат і побудови систем висот використовують умовні геометричні поверхні.

Однією з них є геоїд – уявна поверхня, що збігається з середнім рівнем світового океану в стані спокою, і яка продовжується під материками. Геоїд є однією з найточніших моделей форми Землі, оскільки враховує гравітаційне поле планети. Водночас, для спрощення обчислень, особливо в глобальному масштабі, використовують референц-еліпсоїд — математичну модель, яка є оберненим сплюснутим сфероїдом, максимально наближеним до геоїда, але з ідеально гладкою поверхнею. Саме еліпсоїд покладено в основу багатьох геодезичних систем координат, зокрема GPS [2.с.260].

У контексті європейських систем висот питання вибору геометричної поверхні є критичним, оскільки різні країни опираються на різні «нулі» – початкові рівні для відліку висот, які можуть базуватись на різних середніх

рівнях моря. Так, наприклад, Німеччина історично використовує систему DHNN (Deutsches Haupthöhenetz), що орієнтується на нормальну висоту відносно Амстердамського нуля, Франція – на Марсельську нульову точку, а Польща – на Балтійський рівень у Кронштадті. Україна до 2021 року також орієнтувалася на Кронштадтський нуль, але з переходом до нової висотної системи УГВ-2020 впроваджено нову геометричну базу, що значно ближча до європейських стандартів [3.с.295].

Ці особливості мають не лише наукову, а й прикладну вагу. Розбіжності в геометричних моделях спричиняють труднощі у будівництві міжнародної інфраструктури, плануванні водних об'єктів, у проведенні гідротехнічних, інженерно-геологічних робіт, а також в оборонній сфері. Наприклад, різниця між початковими рівнями в Польщі та Німеччині становить кілька десятків сантиметрів, що може мати критичне значення під час будівництва дамб чи транспортних тунелів. Саме тому сьогодні в Європі активно просувається ідея гармонізації висотних систем і переходу до єдиної європейської вертикальної референц-системи – EVRS, яка використовує як базу поверхню геоїда, уточнену за даними супутникової геодезії.

Розуміння сутності геометричних поверхонь, їхніх властивостей і способів застосування лежить в основі створення національних і наднаціональних систем висот. Їхнє правильне визначення є запорукою точності інженерних розрахунків, ефективності міжнародної співпраці та безпеки масштабних геоінженерних проєктів. Системи висот не є відокремленими або ізольованими явищами – вони тісно пов'язані з гравітаційною природою планети, точністю вимірювань, рівнем технологічного розвитку держав і здатністю наукових спільнот до співпраці [4.с.340]. Європейський досвід свідчить про поступове, але впевнене прагнення до уніфікації, яка базується на точних геометричних моделях, зокрема на геоїді, як найбільш обґрунтованій у науковому сенсі поверхні для визначення висот.

1. Еліпсоїд

У сучасній геодезії поняття еліпсоїда має ключове значення, оскільки саме ця геометрична фігура є основою для побудови референцних систем координат, на яких ґрунтуються сучасні системи висот. Еліпсоїд обертання, або сфероїд, є математичною моделлю Землі, яка формується внаслідок обертання еліпса навколо його меншої осі. Така модель, хоча й не враховує нерівномірності гравітаційного поля та відхилення реальної поверхні від ідеальної форми, значно спрощує розрахунки та забезпечує практичну основу для побудови систем координат. Саме через це еліпсоїд використовується як базовий елемент для обчислення висот у геодезичних і картографічних роботах, а також у навігаційних технологіях, таких як GPS.

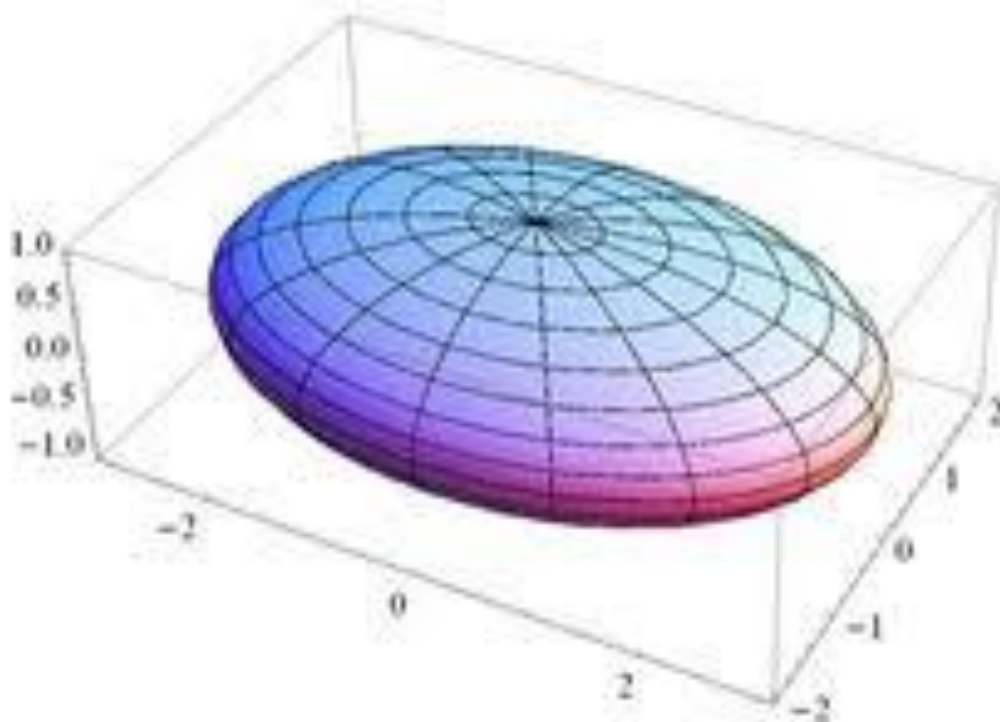


Рис. 1.1 Еліпсоїд

Еліпсоїд у геодезичному сенсі є не просто абстрактною фігурою, а конкретно визначеною математичною поверхнею з заданими параметрами – великою піввіссю (екваторіальним радіусом) та сплюснутістю (або малою піввіссю). Ці параметри визначаються за допомогою супутникових вимірювань і точних спостережень за поведінкою земної кулі [5.с.310].

Найпоширенішим у світі є референц-еліпсоїд WGS 84 (World Geodetic System 1984), який використовується в глобальних супутникових системах навігації, а також як основа для багатьох національних геодезичних систем. Для Європи значення має також еліпсоїд GRS80, що лежить в основі європейської системи координат ETRS89, яка, у свою чергу, використовується в системі висот EVRS.

Перевагою еліпсоїда як геометричної бази є його математична простота та передбачуваність. На відміну від геоїда, який є складною і непостійною поверхнею, що залежить від змін гравітаційного поля, еліпсоїд має точну аналітичну формулу. Це дозволяє легко визначати координати точок, висоти, а також здійснювати перетворення між різними геодезичними системами. Однак ця перевага одночасно є й обмеженням, оскільки еліпсоїд не враховує локальні аномалії гравітації, зміни рівня моря та інші фізичні особливості Землі. Тому для точних робіт його поєднують із моделями геоїда або використанням нормальних чи ортометричних висот, які базуються на гравіметричних даних.

У контексті систем висот європейських країн використання еліпсоїда має низку специфічних аспектів. Різні держави використовували в минулому різні еліпсоїди як базу для своїх геодезичних систем, що призводило до труднощів у гармонізації висот і координат. Наприклад, Франція застосовувала свій еліпсоїд Кларка, у той час як Німеччина орієнтувалася на Бессельовий еліпсоїд. У зв'язку з інтеграційними процесами в Європі, виникла потреба у створенні єдиної системи, яка б ураховувала сучасні супутникові технології та була сумісною з глобальними системами навігації. Саме тому на зміну локальним системам приходить єдиний європейський еліпсоїд GRS80, який забезпечує однакову геометричну основу для всіх країн-членів Європейського Союзу [6.с.275].

Таким чином, еліпсоїд виступає ключовим елементом сучасної геодезичної практики та основою побудови висотних систем. Його значення важко переоцінити, адже саме завдяки ньому можливе точне позиціонування,

створення топографічних карт, проведення інженерних розрахунків і побудова транснаціональної інфраструктури. У майбутньому, із подальшим розвитком супутникової геодезії та точних моделей гравітаційного поля, роль еліпсоїда як базової геометричної поверхні збережеться, але дедалі частіше він поєднуватиметься з високоточними моделями геоїда, що дозволить ще краще узгоджувати математичну простоту з фізичною реальністю Землі.

2. Геоїд

Геоїд є однією з найважливіших концепцій у геодезії та визначенні висот, оскільки він найбільш точно відображає форму Землі, враховуючи її гравітаційне поле. На відміну від еліпсоїда, який є математичною ідеалізацією, геоїд – це фізична поверхня, яка визначається як рівнева поверхня земного гравітаційного поля, що збігається з середнім рівнем світового океану, продовженим під материками. Вона є перпендикулярною до сили тяжіння у кожній своїй точці, тому на практиці вважається найприроднішою основою для вимірювання висот. Саме відносно геоїда визначаються ортометричні висоти, які є найбільш звичними для інженерів, картографів та інших спеціалістів, що працюють з просторовими даними [7.с.340].

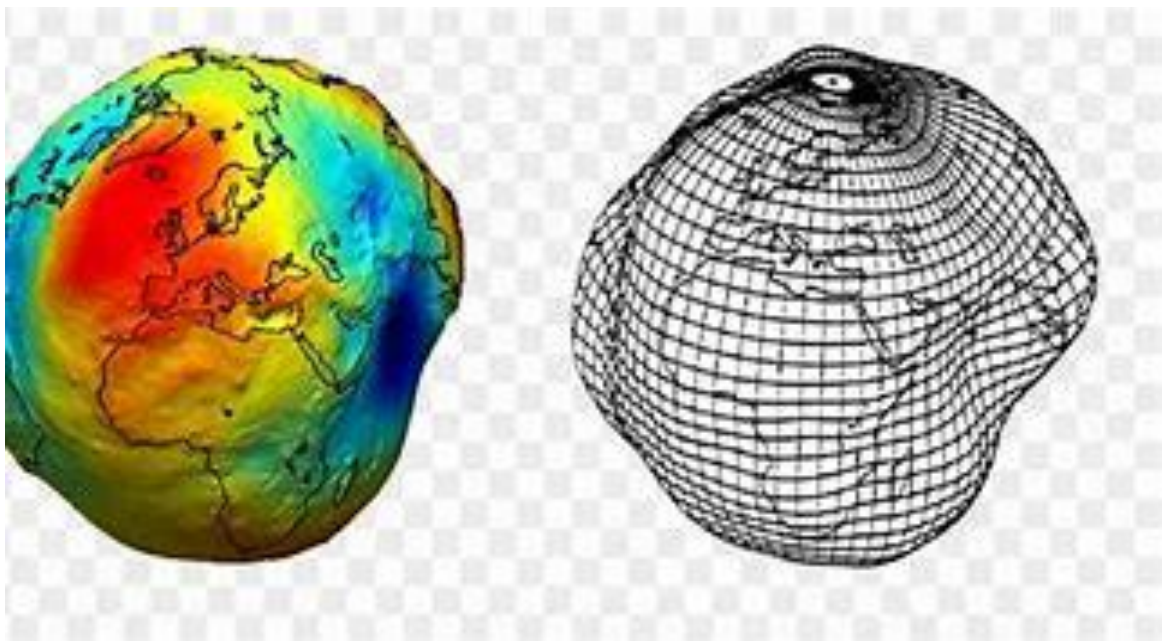


Рис. 1.2 Геоїд

Геоїд не має простої математичної форми – він хвилястий, складний, і його точне визначення потребує значних гравіметричних даних, тобто даних про розподіл гравітаційного поля Землі. У цьому полягає основна складність використання геоїда: для кожного регіону потрібні детальні й точні вимірювання, зокрема супутникові спостереження, гравіметричні дослідження та дані про рівень моря. У країнах Європи геоїд є основою для побудови більшості національних систем висот. Наприклад, Німеччина використовує нормальні висоти відносно так званої нормальної поверхні, яка є гравітаційно згладженим аналогом геоїда, тоді як Швейцарія чи Австрія – ортометричні висоти, що прив'язані безпосередньо до геоїдичної поверхні.

Європейський геоїд EVRF (European Vertical Reference Frame) формується як результат об'єднання національних систем та гравіметричних даних, що дозволяє забезпечити уніфікацію висот у межах континенту. Це особливо важливо в умовах інтеграції транспортної, будівельної та комунікаційної інфраструктури, коли необхідно забезпечити узгодженість геодезичних даних між країнами [8.с.300]. При цьому слід враховувати, що середній рівень моря у різних країнах може значно відрізнятися, і тому зведення до єдиного геоїда є складним, але надзвичайно важливим процесом. Так, у Нідерландах використовується Амстердамський орієнтир, тоді як у Франції – Марсельський. Ці відмінності історично зумовлені географічними та політичними чинниками, але сучасна наука прагне гармонізувати їх.

Підвищення точності визначення геоїда стало можливим завдяки супутниковим місіям, таким як GRACE та GOCE, які забезпечили глобальні моделі гравітаційного поля Землі з безпрецедентною точністю. Це дозволило створити високоточні геоїдичні моделі навіть у важкодоступних регіонах, де раніше була відсутня наземна гравіметрична інформація. У Європі ці моделі активно використовуються для оновлення національних геодезичних систем і переходу до єдиної висотної референц-системи.

Можна сказати, що геоїд як концепція та як практичний інструмент відіграє фундаментальну роль у визначенні систем висот. Його значення

зростає в умовах глобалізації, коли зростає потреба в єдиному підході до просторового позиціювання та побудови інфраструктурних об'єктів. Незважаючи на складність його визначення, саме геоїд дає змогу забезпечити найвищу точність у вимірюваннях висот, що є критично важливим для таких сфер, як авіація, інженерне будівництво, гідрологія та екологічний моніторинг. У майбутньому роль геоїда лише зростатиме, зважаючи на розвиток новітніх технологій у сфері супутникової геодезії та гравіметрії [9.с.420].

3. Квaziгеоїд

Квaziгеоїд є особливим видом геометричної поверхні, що широко використовується в сучасній геодезії для точного визначення висот, особливо в умовах застосування глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS).

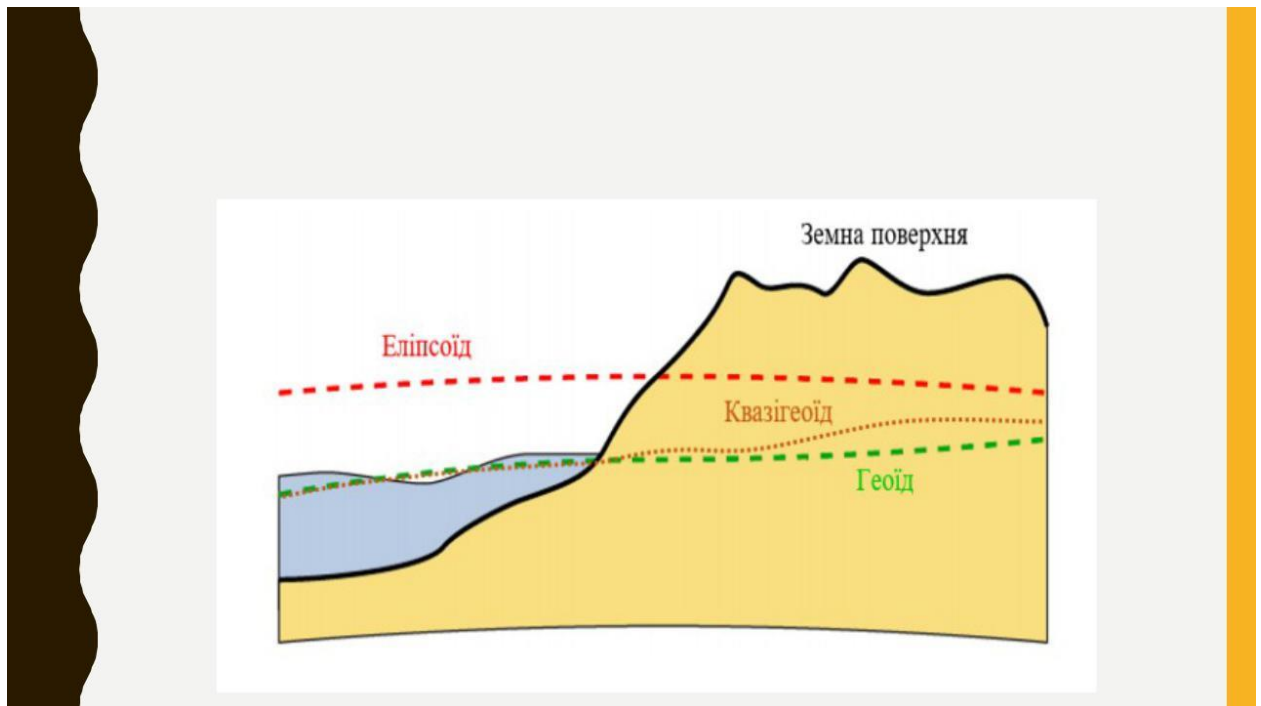


Рис. 1.3 Квaziгеоїд

Цей термін, хоча й не настільки відомий широкому загалу, має фундаментальне значення в науках про Землю, оскільки квaziгеоїд є альтернативою геоїду, яка дозволяє більш точно й практично зручно

переводити еліпсоїдні висоти, отримані від GNSS, у нормальні висоти, що є традиційними для топографічних карт і інженерних розрахунків. Квазігеоїд, на відміну від геоїда, враховує особливості гравітаційного поля Землі у формі нормального гравітаційного потенціалу, який використовується для побудови нормальних висот у національних системах координат [10.с.370].

Головна відмінність квазігеоїда від геоїда полягає в тому, що він не є ізопотенціальною поверхнею – тобто не перпендикулярний до вектора сили тяжіння в усіх точках, як це властиво геоїду. Втім, саме ця особливість і робить його придатним для розрахунків у тих системах, де використовуються нормальні замість ортометричних висот. У більшості країн Європи, зокрема в Німеччині, Польщі, Чехії, Угорщині, Україна, квазігеоїд є ключовим елементом у побудові висотних моделей. Використання квазігеоїда дозволяє суттєво спростити трансформацію висот з глобальних координатних систем до національних, оскільки цей перехід не потребує додаткових корекцій, пов'язаних із розподілом мас усередині Землі, як у випадку з геоїдом.

У контексті порівняння систем висот країн Європи слід зазначити, що використання квазігеоїда є важливим кроком у напрямку уніфікації геодезичних підходів. Завдяки розвитку точних моделей квазігеоїда, що базуються на даних супутникової гравіметрії, наземних вимірюваннях і глобальних моделей гравітаційного поля (наприклад, EGM та EGG), стало можливим забезпечити високоточне вирівнювання національних систем висот. Наприклад, модель EGG08 (European Gravimetric Geoid) була створена саме з урахуванням використання квазігеоїда в європейських країнах і стала підґрунтям для побудови єдиної європейської системи висот EVRF (European Vertical Reference Frame) [11.с. 330].

Перевага квазігеоїда як моделі полягає також у його адаптації до сучасних технологій позиціонування. У той час як ортометричні висоти потребують детальних гравіметричних даних уздовж усієї вертикалі від поверхні до геоїда, нормальні висоти, пов'язані з квазігеоїдом, дозволяють уникати складних розрахунків, оскільки спираються на нормальний

гравітаційний потенціал. Це робить обчислення швидшими та точнішими, що особливо важливо у високотехнологічних сферах — від будівництва мостів до супутникового моніторингу зміщень земної кори [12.с.310].

1.2. Системи висот

Системи висот, що використовуються в Європі, є складною і важливою складовою частиною геодезичних та картографічних досліджень, що забезпечують точність у вимірюванні висот на різних ділянках земної поверхні. Висота будь-якої точки на Землі відносно рівня моря або іншої базової поверхні є важливим елементом при плануванні, будівництві інфраструктури, навігації, а також для наукових досліджень у різних галузях, від астрономії до екології. У Європі існує кілька основних систем висот, які визначають відмінні методи вимірювання і обчислення, що базуються на різних геометричних моделях та теоретичних принципах.

Однією з найпоширеніших моделей є система висот, заснована на геоїді, що вважається найбільш точним відображенням реального рівня Землі. Геоїд є ізольованою поверхнею, що відповідає середньому рівню світового океану, де немає впливу припливів і хвиль. Всі сучасні системи висот у Європі прив'язані саме до цієї моделі, оскільки вона дозволяє найбільш точно виміряти висоти, враховуючи географічні аномалії та варіації гравітаційного поля. Втім, точність цієї системи значною мірою залежить від наявності даних про гравітаційне поле Землі та використання високоточних геодезичних технологій [13.с.300].

Іншим важливим типом є система висот, яка ґрунтується на еліпсоїдній моделі Землі. Еліпсоїд є спрощеною геометричною моделлю, яка допомагає обчислювати висоти за допомогою математичних формул. У цій системі висоти визначаються відносно певного стандартного еліпсоїда, і цей підхід застосовується в багатьох країнах, оскільки дозволяє зменшити складність обчислень, порівняно з використанням геоїда. Проте така система не

враховує місцеві гравітаційні аномалії, що може призвести до невеликої похибки в результатах на певних територіях.

Важливим елементом є й так звані квазігеоїди – моделі, що створюються для покращення точності геодезичних вимірювань на певних територіях. Квазігеоїди часто використовуються для специфічних завдань, де необхідно врахувати локальні географічні особливості, такі як нерівності земної кори або регіональні зміни гравітаційного поля. Вони використовуються у країнах, де є особливі потреби в точних висотних вимірюваннях, наприклад, у великих мегаполісах або на ділянках з особливими геологічними умовами [14.с.250].

Європейські системи висот суттєво відрізняються залежно від країни, і навіть на міжнародному рівні немає єдиної стандартизованої системи, що б охоплювала всю територію континенту. Різні національні системи можуть використовувати різні еліпсоїдні моделі або мати різні стандарти для визначення висот. Наприклад, у Великій Британії застосовується система висот на основі національного геоїда, який визначає висоти щодо середнього рівня моря, тоді як у Німеччині й інших країнах Центральної Європи часто використовуються адаптовані еліпсоїдні системи, що враховують локальні географічні особливості.

У зв'язку з цими відмінностями, важливими є зусилля з уніфікації систем висот на континентальному рівні. Європейські країни мають спільні програми та ініціативи, що дозволяють створювати інтегровані системи для точного визначення висот на великій території. Одним з таких проектів є ETRS89 (European Terrestrial Reference System 1989), який забезпечує єдину систему координат для всієї Європи, і який може бути використаний для перерахунку висот між різними національними системами.

Особливість систем висот Європи полягає в тому, що вони не тільки служать основою для геодезичних вимірювань, але й мають значення для багатьох інших галузей, таких як будівництво, навігація, гідрологія та екологія. Висоти, визначені в межах цих систем, використовуються для

проектування доріг, мостів, тунелів, а також для вимірювання змін в рівні моря, моніторингу екологічних змін, прогнозування повеней та іншого. В результаті, системи висот у Європі є не лише технічними засобами для геодезичних вимірювань, але й важливими інструментами для забезпечення безпеки, сталого розвитку і взаємодії між державами. Існуюча різноманітність цих систем відображає географічні, економічні та наукові потреби кожної країни, однак важливо, що європейські держави активно працюють над покращенням точності та уніфікацією своїх висотних систем для забезпечення сумісності даних на міжнародному рівні.

Загалом, розвиток і вдосконалення систем висот Європи є важливим завданням для забезпечення наукової точності та практичної ефективності в геодезії та суміжних галузях. Врахування різноманітних моделей, таких як геоїд, еліпсоїд та квазігеоїд, дозволяє отримати більш точні дані та знижувати похибки в вимірюваннях, що мають важливе значення для розвитку інфраструктури, безпеки та наукових досліджень.

1. Геодезичні системи висот

Геодезичні системи висот – це системи, у яких висоти точок земної поверхні визначаються відносно певної вихідної поверхні, зазвичай геоїда або квазігеоїда. Основною відмінністю геодезичних систем висот від інших є те, що вони тісно пов'язані з реальним фігурним полем сили тяжіння Землі, тобто враховують її фізичні характеристики. Таке поєднання геометричних та фізичних підходів дає змогу забезпечити високу точність при побудові геодезичних мереж та подальшому використанні даних у прикладних галузях.

У межах геодезичної практики виділяють кілька основних типів висот: нормальні, ортометричні, динамічні та еліпсоїдальні. Найчастіше в інженерній геодезії використовують нормальні висоти, які визначаються відносно рівневої поверхні квазігеоїда. Ця система вважається зручною через те, що не потребує детального знання розподілу густини земної кори — на

відміну від ортометричних висот, які, навпаки, базуються на фізичній поверхні геоїда, але мають обмеження при розрахунках.

Застосування еліпсоїдальних висот у геодезії набуло поширення з розвитком глобальних навігаційних супутникових систем (GNSS). Ці висоти визначаються відносно поверхні референц-еліпсоїда – математичної моделі Землі, яка використовується у глобальних системах координат (наприклад, WGS 84). Проте через значне відхилення еліпсоїда від геоїда, ці висоти потребують корекції, якщо їх використовують у практичних завданнях.

Особливої актуальності геодезичні системи висот набувають у зв'язку з інтеграцією українських геодезичних мереж у європейський простір. З 2020-х років Україна поступово впроваджує Європейську вертикальну референцну систему (EVRN), яка базується на уніфікованих нормальних висотах і забезпечує сумісність з геоданими країн ЄС [15.с.280].

2. Ортометричні системи висот

У науці про вимірювання простору та рельєфу Землі ортометричні системи висот займають особливе місце. Вони належать до так званих фізичних систем, оскільки ґрунтуються не лише на геометричних характеристиках, а й на врахуванні силового поля тяжіння Землі. Цей підхід дозволяє досягнути більшої точності у створенні топографічних карт, проєктуванні інженерних споруд і дослідженнях, пов'язаних з гідрологією, геофізикою та екологією.

Ортометрична висота визначається як довжина дуги по лінії сили тяжіння (лінії вертикалі), яка з'єднує точку на поверхні Землі з рівневою поверхнею геоїда. Геоїд – це уявна поверхня, що збігається з середнім рівнем світового океану в умовах гідростатичної рівноваги і продовжується під континентами. А отже ортометрична висота – це фактична висота над умовним «рівнем моря», з урахуванням гравітаційного впливу Землі.

У практиці геодезії ортометричні висоти є зручними тоді, коли мова йде про реальні фізичні процеси, пов'язані з водотоками, атмосферним тиском чи розподілом мас. Наприклад, для будівництва дамб, мостів або

каналів важливо знати не просто геометричну висоту над еліпсоїдом чи квазігеоїдом, а саме ту, яка визначає потенційну енергію води. Саме тому в багатьох країнах ортометрична система є базовою при складанні державних топографічних карт та веденні кадастрових реєстрів.

Водночас варто враховувати, що точне визначення ортометричних висот – справа складна. Вона потребує знань про розподіл густини речовини всередині Землі, адже від цього залежать значення гравітаційного потенціалу, який впливає на довжину вертикалі. Через це в багатьох випадках використовуються наближення – наприклад, застосування нормальних висот, які простіше обчислювати, але менш фізично точні. На території України ортометричні висоти фігурують у системі Балтійської висотної системи 1977 року, яка донедавна використовувалася як національна референсна. Проте з урахуванням інтеграційних процесів у геодезичній сфері сьогодні дедалі актуальнішим стає перехід до європейських референсних систем, зокрема EVRS (European Vertical Reference System), у якій акцент робиться на нормальних висотах.

3. Нормальні системи висот

У геодезичній практиці питання висоти точки над рівнем моря здається очевидним лише на перший погляд. Насправді ж, за кожним числовим значенням стоїть складна система математичних і фізичних узгоджень. Однією з найсучасніших і водночас зручних у застосуванні форм визначення висоти є нормальні висоти. Вони були впроваджені як альтернатива ортометричним, з метою уникнути деяких складнощів, пов'язаних із необхідністю знання внутрішньої будови Землі.

Нормальна система висот ґрунтується на використанні референц-еліпсоїда та нормального гравітаційного поля, яке є математичною моделлю земного тяжіння. У цій системі висота точки визначається як відстань уздовж лінії нормалі до квазігеоїда – умовної поверхні, що наближено повторює форму геоїда, але розрахована у рамках нормального потенціалу. Це дозволяє

отримувати висоти без залучення даних про фактичний розподіл густини порід у земній корі, що значно спрощує обчислення.

Перевагою нормальних висот є їхня універсальність і математична зручність для побудови великих геодезичних мереж, особливо в умовах, коли точна інформація про внутрішню структуру Землі недоступна. Крім того, система нормальних висот забезпечує високу узгодженість із сучасними глобальними системами координат і супутниковими технологіями, що є критично важливим у добу цифрової картографії та просторових баз даних.

Нормальні висоти є основою Європейської вертикальної референцної системи (EVRS), яка на сьогодні впроваджується в Україні як еталонна. Застосування цієї системи дає змогу гармонізувати просторові дані з іншими країнами ЄС, що має значення у контексті транснаціональних інфраструктурних проєктів, екологічного моніторингу та наукових досліджень.

На практиці це також спрощує інтеграцію GNSS-даних у національні геодезичні мережі. Водночас варто зазначити, що попри свою наближеність до реальних фізичних умов, нормальні висоти не є абсолютно точним еквівалентом ортометричних. Це означає, що в особливо чутливих інженерних чи наукових задачах потрібні додаткові поправки. Однак з позиції балансу між точністю та зручністю — нормальні висоти залишаються найбільш прийнятною системою для широкого кола геодезичних і картографічних робіт [16.с.290].

1.3. Історичний розвиток систем висот та проблема відсутності єдиної системи

Історія розвитку систем висот тісно пов'язана з еволюцією геодезії та картографії, адже потреба в точних вимірюваннях висот виникла разом із розвитком цивілізацій, що прагнули до організації та розвитку власної інфраструктури, зокрема доріг, мостів, будівель та інших об'єктів. Спочатку

визначення висот здійснювалося на основі простих спостережень за рівнем води в річках та морях, однак з часом з'явилася потреба в більш точних і стандартизованих методах, що призвело до розвитку сучасних систем висот.

Перші спроби визначити висоту над рівнем моря з'явилися ще в Давньому Римі, коли будівельники та інженери намагалися проектувати і будувати дороги, акведуки та інші споруди. Вони використовували рівень води в річках, щоб встановити горизонтальні лінії, проте ці методи мали велику похибку через варіації рівня води та інші фактори. Вже в XVII столітті з'явилися перші спроби створити більш наукові основи для вимірювання висот. В Європі в цей період активно розвивалися астрономічні методи, за допомогою яких можна було визначити точне місце розташування точок на земній поверхні, а отже й обчислювати їх висоту [17.с.350].

Від кінця XVIII століття, з розвитком геодезії та точних вимірювань, стало можливим створення більш чітких систем висот. Відзначимо важливу роль геодезистів того часу, таких як Генріх Мензель та Карл Рейнгардт, які працювали над створенням математичних моделей Землі для визначення висот. Вже на початку XIX століття був запропонований перший стандарт для вимірювання висот на основі середнього рівня моря. Це стало основою для багатьох національних систем висот, що були розроблені в різних країнах Європи. Однак, проблеми із встановленням єдиної системи висот на міжнародному рівні залишалися актуальними до кінця XIX — початку XX століття. Це зумовлювалося різними підходами до визначення середнього рівня моря в різних країнах, а також впливом регіональних географічних особливостей на вимірювання висот.

У XX столітті наукові досягнення, зокрема в галузі астрономії, геофізики та математичної геодезії, дозволили значно підвищити точність вимірювань висот. Розробка нових математичних моделей Землі, таких як еліпсоїд, значно спростила визначення висот. Наприкінці 1950-х років з'явилися перші глобальні системи висот, що базувалися на гравітаційних вимірюваннях і враховували різноманітні геофізичні аномалії, характерні для

кожного регіону [18.с.370]. Проте в середині XX століття виникла необхідність у створенні єдиної міжнародної системи висот, яка б дозволила здійснювати обчислення висот з максимальною точністю на глобальному рівні. У 1970-1980-х роках було зроблено кілька спроб створити спільну європейську систему висот. Зокрема, в 1989 році була запроваджена Європейська система висот ETRS89, яка дозволила здійснювати інтеграцію різних національних систем висот у єдину систему координат.

Незважаючи на значний прогрес у розвитку геодезії, проблема відсутності єдиної системи висот на міжнародному рівні залишається актуальною до цього часу. Причини цього криються у кількох аспектах. По-перше, кожна країна має свої унікальні географічні умови, які визначають специфіку використання геодезичних технологій та систем висот. У деяких країнах необхідно враховувати локальні гравітаційні аномалії або особливості геологічної структури, що ускладнює інтеграцію різних систем. По-друге, різні національні геодезичні інститути використовують свої стандарти і еліпсоїдні моделі, що ускладнює порівняння висот між країнами. Також важливим фактором є різноманітність технічних засобів і методів вимірювання, які використовуються в різних системах. Сучасні технології, такі як супутникові системи GPS та геодезичні мережі, значно підвищують точність вимірювань, однак вони вимагають постійного оновлення та вдосконалення системи координат [19.с.330].

У глобалізованому світі питання інтеграції систем висот стає все більш важливим. Різноманітні проекти та ініціативи, такі як ETRS89, дозволяють здійснювати перерахунки висот між різними національними системами, однак повна інтеграція ще не досягнута. У найближчому майбутньому можливе подальше удосконалення міжнародних стандартів, що дозволить зменшити різницю між національними системами висот і забезпечити більшу точність при проведенні глобальних вимірювань. Завдяки співпраці між різними країнами, можливе створення універсальної моделі, яка враховує

особливості різних регіонів, що дозволить усунути проблему відсутності єдиної системи висот на міжнародному рівні [20].

1.4. Служби ICGEM

Міжнародна служба гравіметрії та геодезії (International Centre for Global Earth Models, ICGEM) є ключовою організацією, яка забезпечує наукові дослідження та стандартизацію в галузі гравіметрії та геодезії на глобальному рівні. Її основною метою є забезпечення доступу до даних, моделей та інструментів, що стосуються глобальних гравітаційних полів Землі, а також стандартизація методів їх вимірювання. ICGEM відіграє важливу роль у розвитку глобальних систем координат, вимірювання висот і вивченні гравітаційних аномалій, що є важливим аспектом для точних геодезичних вимірювань і картографії.

ICGEM була заснована з метою сприяння розвитку міжнародної співпраці в області гравіметрії та геодезії. Вона є частиною більшої наукової ініціативи, спрямованої на створення глобальних моделей земної поверхні, включаючи точні моделі гравітаційного поля, що використовуються для визначення висот і координат на Землі. Служба була створена в рамках Міжнародної асоціації геодезистів (IAG) і є важливим інститутом для обміну даними та методами між вченими та геодезистами з усього світу [21].

Основними завданнями ICGEM є:

1. Розробка та підтримка глобальних гравітаційних моделей Землі, таких як глобальні моделі гравітаційного поля, що використовуються для визначення точних висот і координат.
2. Забезпечення доступу до даних і інструментів для аналізу гравітаційних полів.
3. Координація міжнародної співпраці між геодезистами, вченими та іншими фахівцями, що займаються гравіметрією і створенням моделей Землі.

4. Розвиток методів та стандартів для точних вимірювань гравітаційних аномалій та їх інтеграції в глобальні системи координат.

5. Забезпечення наукових досліджень у галузі гравіметрії, зокрема щодо змін гравітаційного поля Землі, що важливо для розуміння процесів в гідросфері, атмосфері та літосфері.

ICGEM зробила значний внесок у розвиток геодезії завдяки своїм глобальним моделям гравітаційного поля. Одним із важливих досягнень є розробка глобальних гравітаційних моделей, таких як EGM2008 (Earth Gravitational Model 2008) і EGM96. Ці моделі дають змогу створювати точні 3D-моделі Землі, що використовуються для різноманітних наукових і практичних завдань, зокрема для визначення висот, створення геодезичних карт, а також у процесах планування інфраструктурних проектів, що потребують високої точності вимірювань.

ICGEM активно бере участь у розробці нових методів вимірювання гравітаційного поля, використовуючи як традиційні, так і новітні технології. Наприклад, сучасні супутникові місії, такі як GRACE (Gravity Recovery and Climate Experiment), які здійснюються в партнерстві з NASA, дозволяють точно вимірювати зміни гравітаційного поля Землі і надавати дані для побудови нових моделей гравітації. Це відкриває нові можливості для дослідження глобальних змін у гідрологічних і кліматичних процесах [22].

Однією з важливих задач ICGEM є інтеграція даних з різних національних і регіональних систем висот в єдину глобальну систему. Існуючі національні системи висот часто використовують різні еліпсоїдні моделі і базуються на різних геодезичних принципах, що ускладнює обмін даними та їх взаємодію. ICGEM відіграє важливу роль у стандартизації і інтеграції цих даних, сприяючи розвитку єдиної системи висот, що охоплює всі країни.

Цей процес є необхідним для забезпечення точних вимірювань і для того, щоб зберігати кореляцію між різними системами висот і координат на глобальному рівні. Оскільки глобальна система висот забезпечує точність у

різних галузях науки і техніки, таких як картографія, інженерія, екологія, а також у повсякденних завданнях, таких як транспорт, будівництво і планування територій, ICGEM є ключовим гравцем у формуванні таких стандартів.

Діяльність ICGEM має значний вплив не лише на академічні дослідження, а й на практичні застосування в різних галузях. Геодезисти, картографи, інженери та науковці, що працюють у таких областях, як будівництво, екологія, дослідження землетрусів і зміни клімату, активно використовують дані ICGEM для підвищення точності своїх робіт. Наприклад, дані про зміни гравітаційного поля допомагають відслідковувати зміни в обсягах льодовиків, рівні води в океанах, а також передбачати природні катастрофи [23].

Висновки розділу 1

У першому розділі розглянуто теоретичні основи систем висот у Європі, їх історичний розвиток та актуальний стан. Проведене дослідження дозволяє зробити наступні висновки:

1. Еліпсоїд є ключовою математичною моделлю Землі завдяки своїй простоті й передбачуваності. Геоїд, збігаючись із середнім рівнем світового океану, найточніше відображає форму Землі з урахуванням гравітаційного поля. Квазігеоїд слугує альтернативою геоїду для зручного переведення еліпсоїдних висот у нормальні та широко використовується в країнах Європи.

2. В Європі найпоширенішими є геодезичні, ортометричні та нормальні системи висот. Геодезичні системи пов'язані з полем сили тяжіння Землі. Ортометричні визначають висоту як дугу по лінії сили тяжіння від поверхні до геоїда. Нормальні, базуючись на референц-еліпсоїді, забезпечують математичну зручність для великих геодезичних мереж і є основою Європейської вертикальної референцної системи.

3. Підходи до вимірювання висот еволюціонували від простих спостережень до сучасних високоточних систем. Проблема відсутності

єдиної системи висот зберігається через унікальні географічні умови країн, різні стандарти й методи вимірювання. В умовах глобалізації зростає важливість гармонізації національних систем, зокрема через впровадження ETRS89.

4. Міжнародна служба гравіметрії та геодезії розробляє глобальні гравітаційні моделі, забезпечує доступ до даних та координує міжнародну співпрацю. Її внесок у створення моделей EGM2008 та EGM96 сприяє інтеграції національних систем висот у єдину глобальну систему, що має практичне застосування в картографії, будівництві та екологічному моніторингу.

У результаті проведеного дослідження стає очевидним, що системи висот Європи продовжують розвиватися в напрямку більшої інтеграції та стандартизації, що є необхідною умовою для ефективної міжнародної співпраці в галузі геодезії, картографії та інженерних наук.

РОЗДІЛ 2. РІЗНОВИДИ УНІВЕРСАЛЬНИХ ВЕРТИКАЛЬНИХ СИСТЕМ ВИСОТ ТА ПРОБЛЕМА ВІДСУТНОСТІ ЄДИНОЇ СИСТЕМИ

2.1. Європейська вертикальна референсна мережа EUVN

Упродовж останніх десятиліть геодезія та споріднені дисципліни дедалі частіше зіштовхуються з викликом – потребою в такій системі відліку висот, яка була б не лише технічно досконалою, але й уніфікованою на рівні континенту. В умовах зростаючої інтеграції європейського наукового простору, розширення спільних проєктів у сферах транспорту, екології, урбаністики, критично важливим стає створення єдиної вертикальної системи, яка б відповідала вимогам точності, стабільності та сумісності між державами. Це не просто питання зручності – без спільної висотної основи будь-яке координування або суміщення просторових даних у масштабах Європи неминуче призводить до неточностей, конфліктів у вимірах і навіть техногенних ризиків.

Саме на цьому тлі з'явилася ініціатива створення Європейської вертикальної референсної мережі – European Vertical Reference Network, або скорочено EUVN. Вона постала як відповідь на потребу подолати фрагментованість у підходах до висотних систем, що сформувалася історично: кожна країна спиралася на власну нульову точку, пов'язану з рівнем того чи іншого моря, використовувала свої національні геоїдальні моделі, методики нівелювання та супутникового позиціонування. У результаті, навіть при однаковій назві «висота над рівнем моря», цифри могли суттєво відрізнятись від країни до країни – на десятки сантиметрів і навіть більше. EUVN стала першою масштабною спробою гармонізувати ці різноманітні дані та створити спільну основу, яку можна було б прийняти всіма державами Європи [24].

Ключовою особливістю цієї мережі є її багатокomпонентна структура: в основі лежать високоточні координати спеціально відібраних пунктів, які обчислені з використанням найсучасніших технологій – як супутникової

геодезії, так і класичного прецизійного нівелювання. Поєднання цих двох підходів дало змогу забезпечити як точне планове положення кожної точки, так і її висотну характеристику у межах узгодженої системи. Важливо підкреслити, що EUVN не є просто технічним набором даних – це стратегічний інструмент, який дозволяє на рівні континенту перейти до якісно нової моделі просторової координації. У цьому полягає її справжня цінність: вона забезпечує спільну мову для фахівців із різних країн, дає змогу інтегрувати дані без спотворень, підвищує точність та ефективність спільних досліджень, проєктів і прогнозів [25].

Однією з найбільш складних і водночас стратегічно важливих проблем у сфері геодезичних досліджень Європи тривалий час залишалася відсутність єдиної висотної системи, спільної для всіх країн континенту. Ця проблема виходить далеко за межі академічної дискусії чи суто наукових суперечок — вона має реальний вплив на точність і сумісність просторових даних, без яких сьогодні неможливо уявити розбудову сучасної інфраструктури. Зокрема, відсутність гармонізованої вертикальної основи унеможливорює точне поєднання картографічних і топографічних матеріалів, що створюються у різних країнах. Актуальність цієї проблеми особливо зростає у межах транскордонного співробітництва, де навіть незначна різниця у вихідних даних може призвести до серйозних помилок у проєктуванні мостів, тунелів, дамб, водогосподарських споруд, а також при моделюванні природних ризиків, таких як повені чи зсуви ґрунту.

Проблема ускладнюється тим, що кожна європейська держава впродовж тривалого історичного періоду розвивала власну систему висот, яка базувалася на різних нульових рівнях, прив'язаних до морських поверхонь: Балтійського, Північного, Адріатичного, а подекуди навіть Чорного моря. У результаті, одна й та ж сама точка на території Європи могла мати різні значення висоти залежно від того, у якій національній системі вона була зафіксована. Такі розбіжності інколи сягали десятків сантиметрів, а подекуди й перевищували один метр – що абсолютно

неприйнятно в умовах високоточної інженерії, супутникової геодезії та геофізичних досліджень. Саме ці обставини і стали поштовхом до створення цілеспрямованої ініціативи, яка мала на меті подолати цю фрагментованість.

Виходячи з реальних потреб науки, інженерії та міждержавного співробітництва, у 1997 році було започатковано масштабний проект під назвою European Vertical Reference Network (EUVN). Його ключовою метою стало створення системи координат, що спиралася б на реальні дані з різних джерел – сучасних GPS-спостережень, нівелювальних вимірювань і моделей геоїда. Особливо важливим було те, що в основі проекту лежало поєднання класичних геодезичних традицій із новітніми технологіями супутникової геодезії. Завдяки такому підходу стало можливим не просто формально погодити різні системи, а закласти підґрунтя для створення стійкої й достовірної вертикальної референцної структури, яка була б однаково ефективною і в Західній, і в Східній Європі. Таким чином, EUVN відкрив нову сторінку в історії європейської геодезії, заклавши фундамент для подальшої інтеграції в науковому, технічному та інфраструктурному вимірах [26].

Варто зазначити, що EUVN має не лише практичне, а й наукове значення, оскільки дозволяє проводити дослідження динаміки земної кори, моделювання гравітаційного поля та зміни рівня Світового океану. Крім того, розширення EUVN у рамках оновленого проекту EUVN-DA (EUVN Densification and Alignment) забезпечило ще більш щільне покриття континенту опорними пунктами, що підвищує точність як локальних, так і регіональних геодезичних робіт. Утім, слід визнати, що, попри значні зусилля, уніфікація висотної системи в Європі досі залишається незавершеним процесом, що обумовлюється як технічними, так і політичними та адміністративними бар'єрами. Національні служби нерідко продовжують користуватися традиційними системами, адаптованими до місцевих умов, а інтеграція уніфікованої європейської вертикальної системи вимагає оновлення нормативної бази, технологічної інфраструктури та

значних фінансових ресурсів. Проте значення EUVN як кроку до єдиного європейського вертикального простору залишається беззаперечним – це не лише наукова ініціатива, а й практична потреба об'єднаної Європи у спільному геодезичному фундаменті [27].

2.2. Міжнародна висотна референцна система

У сучасному світі, де міжнародне співробітництво у сфері геодезії, картографії, інженерних проєктів та моніторингу навколишнього середовища набуває дедалі більшого значення, питання створення єдиної глобальної висотної системи постає як надзвичайно актуальне. Історично склалося так, що різні держави і навіть окремі регіони використовували власні національні висотні системи, що базувались на локальних початкових рівнях, прив'язаних до рівнів різних морів – Балтійського, Чорного, Північного тощо.

Це породжувало розбіжності у визначенні висот, іноді у межах десятків сантиметрів або навіть метрів, що в умовах точного будівництва, супутникового моніторингу, прогнозування кліматичних змін або обробки даних дистанційного зондування є вкрай недопустимим. Саме для розв'язання цієї проблеми було ініційовано створення Міжнародної висотної референцної системи (International Height Reference System – IHRIS) [28].

Сучасні потреби глобального геодезичного простору дедалі більше вимагають єдиного, узгодженого підходу до визначення висотних координат, який був би універсальним і застосовним у будь-якому куточку планети. У відповідь на ці виклики було започатковано концепцію Міжнародної висотної референцної системи (IHRIS), яка покликана стати основою для формування єдиної глобальної системи висот. Її розробка стала важливим кроком на шляху до подолання фрагментації, що виникла внаслідок використання численних локальних систем з різними нульовими рівнями, що базувалися на різних морських еталонах. Така ситуація призводила до труднощів при інтеграції даних з різних країн та континентів, особливо в

міжнародних наукових дослідженнях, будівництві інфраструктурних об'єктів і в екологічному моніторингу.

Суть IHRС полягає у створенні такої моделі висотного простору, яка базувалася б на єдиному фізичному принципі – гравітаційному полі Землі, представленому через модель геоїда. Геоїд у цьому випадку виступає еталонною поверхнею, що найближче відповідає середньому рівню світового океану і, таким чином, є найбільш точним фізичним орієнтиром для вимірювання висот.

Відмова від традиційних локальних систем на користь такої універсальної бази дозволяє уникнути неоднозначностей та суттєво підвищує точність геодезичних обчислень. У результаті IHRС не просто створює нову систему координат, а закладає основу для нового мислення у сфері геопросторових наук, яке спирається на міждисциплінарний підхід і новітні досягнення в геофізиці, гравіметрії, супутникових технологіях і математичному моделюванні.

Одним із найважливіших елементів IHRС є побудова єдиної глобальної моделі гравітаційного потенціалу, яка дозволяє точно порівнювати висоти будь-якої точки земної поверхні. Такий підхід не лише усуває похибки, пов'язані з розбіжностями між національними висотними системами, а й дає змогу забезпечити повну узгодженість геоданих незалежно від географічного розташування.

Це відкриває широкі перспективи для розвитку як фундаментальних досліджень у сфері наук про Землю, так і для практичного застосування – від глобального моніторингу зміни клімату до реалізації міжнародних інженерних проєктів. Зрештою, IHRС постає не просто як технічна система, а як ключовий інструмент у побудові цілісного бачення земного простору у 21 столітті.

Розгортання Міжнародної висотної референцної системи (IHRС) неможливе без створення її практичної основи – глобальної мережі спеціалізованих пунктів, що формують так звану Міжнародну висотну

референцну структуру (IHRF). Ця структура виконує функцію фундаменту всієї системи, адже кожен з пунктів мережі має ретельно визначені координати і в просторовому, і в гравітаційному аспекті. Йдеться про те, що до опису кожної точки додається інформація про потенціал сили тяжіння, що дозволяє досягати вражаючої точності при висотному позиціюванні. Таким чином, IHRF виконує роль опорної сітки, яка служить зразком для усіх національних чи регіональних висотних систем. У довгостроковій перспективі саме на ці пункти орієнтуватиметься вся геодезична спільнота світу при оновленні або уніфікації локальних систем висот [29].

Унікальність підходу, що закладений у IHRF, полягає у врахуванні широкого спектра природних чинників, які впливають на положення земної поверхні. На відміну від традиційних, статичних систем координат, IHRF передбачає інтеграцію змін, що відбуваються внаслідок геодинамічних процесів. Це, зокрема, повільні вертикальні рухи земної кори, які можуть бути спричинені тектонічними силами або ж поступовим підняттям земної поверхні після танення льодовиків (постгlačіальне підняття).

Крім того, сучасні дослідження все частіше вказують на зміну рівня Світового океану як на чинник, що потребує регулярного оновлення референцних висот. Усі ці процеси відстежуються за допомогою супутникових технологій, гравіметричних вимірювань та постійного аналізу гравітаційного поля Землі.

Слід зазначити, що впровадження IHRS на глобальному рівні вимагає глибокого наукового діалогу та технічної співпраці між державами, що мають різні традиції у побудові національних висотних систем. Необхідно не лише погодити спільні технічні стандарти, але й адаптувати національні інституції до роботи в межах нових координатних реалій. Тим не менш, успішна реалізація IHRS відкриває шлях до створення справді інтегрованого простору геопросторових даних, де висотні характеристики будуть уніфіковані на глобальному рівні, а отже – точніші, надійніші та зручніші у

застосуванні для потреб науки, інфраструктури, захисту довкілля і безпеки [30].

Висновки до розділу 2

У результаті дослідження різновидів універсальних вертикальних систем висот можна зробити такі висновки:

1. Європейська вертикальна референсна мережа (EUVN), започаткована у 1997 році, стала першою масштабною спробою подолати історичну фрагментацію висотних систем на континенті. Її особливістю є поєднання даних супутникової геодезії та класичного нівелювання для забезпечення точних просторових і висотних координат.

2. Розширення мережі в рамках проєкту EUVN-DA підвищило щільність покриття континенту опорними пунктами, однак повна уніфікація висотної системи в Європі залишається незавершеною через технічні, політичні та адміністративні бар'єри.

3. Міжнародна висотна референсна система (IHRF) спрямована на створення глобальної уніфікованої системи висот, що базується на єдиній моделі гравітаційного потенціалу Землі. Її практичною реалізацією є Міжнародна висотна референсна структура (IHRF).

4. На відміну від традиційних статичних систем, IHRF враховує геодинамічні процеси – вертикальні рухи земної кори, постглюціальне підняття та зміни рівня Світового океану.

5. Впровадження уніфікованих систем висот ускладнюється необхідністю адаптації національних інституцій до нових координатних реалій, оновлення нормативної бази та технологічної інфраструктури, а також значними фінансовими затратами.

6. Незважаючи на ці труднощі, розвиток універсальних вертикальних систем висот є критично важливим для підвищення точності геодезичних обчислень, інтеграції просторових даних з різних країн та реалізації міжнародних інфраструктурних проєктів.

РОЗДІЛ 3. ПОБУДОВА ГЕОЇДА ТА КВАЗІГЕОЇДА НА ТЕРИТОРІЮ ЄВРОПИ

У сучасній геодезії одним із ключових завдань є точне відображення форми та гравітаційного поля Землі. У цьому контексті особливої уваги заслуговує процес побудови геоїда та квазігеоїда, зокрема в межах Європейського континенту. Геоїд, як відома у науці модель, що відображає середній рівень Світового океану в стані спокою, служить фізичною референсною поверхнею для вимірювання ортометричних висот. У той час як квазігеоїд базується на аналогічному принципі, але використовується при визначенні нормальних висот, що стали стандартом у багатьох країнах Європи. Побудова таких моделей потребує високоточних вимірювань сили тяжіння, врахування локальних аномалій гравітаційного поля, а також застосування сучасних супутникових технологій, які дозволяють охопити великі території з безпрецедентною деталізацією [31].

Для побудови геоїда та квазігеоїда території Європи я скористався програмою служби ICGEM (International Center for Global Earth Models), яка спеціалізується на їхньому створенні та моделюванні. Ознайомився з його структурою та призначенням [32].

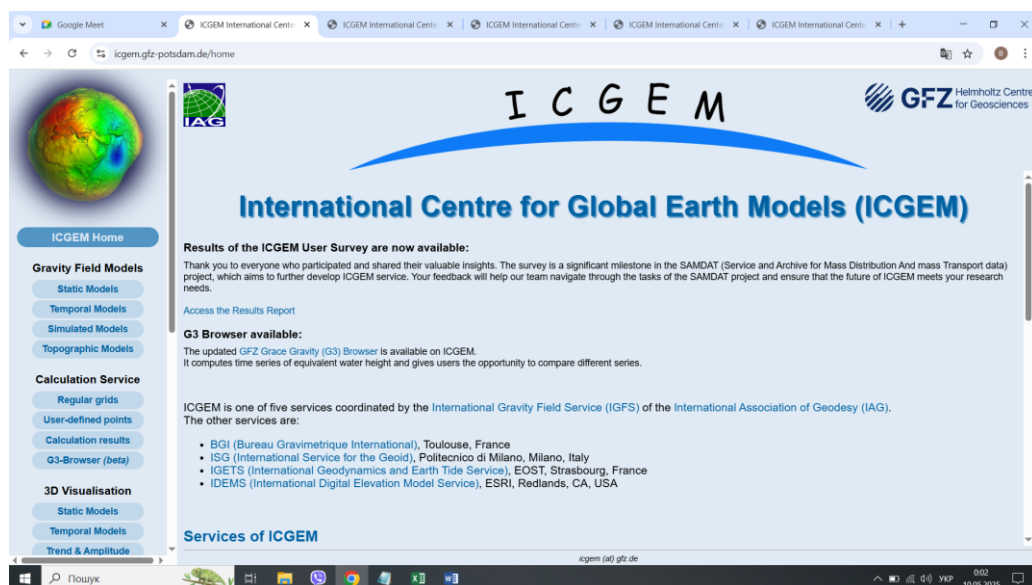


Рис. 3.1 Початкова сторінка сайту служби ICGEM

Зайшов на розділ «Static Models» та обрав режим під номером 148 EIGEN-6C4. Після цього нажав на «Calculate».

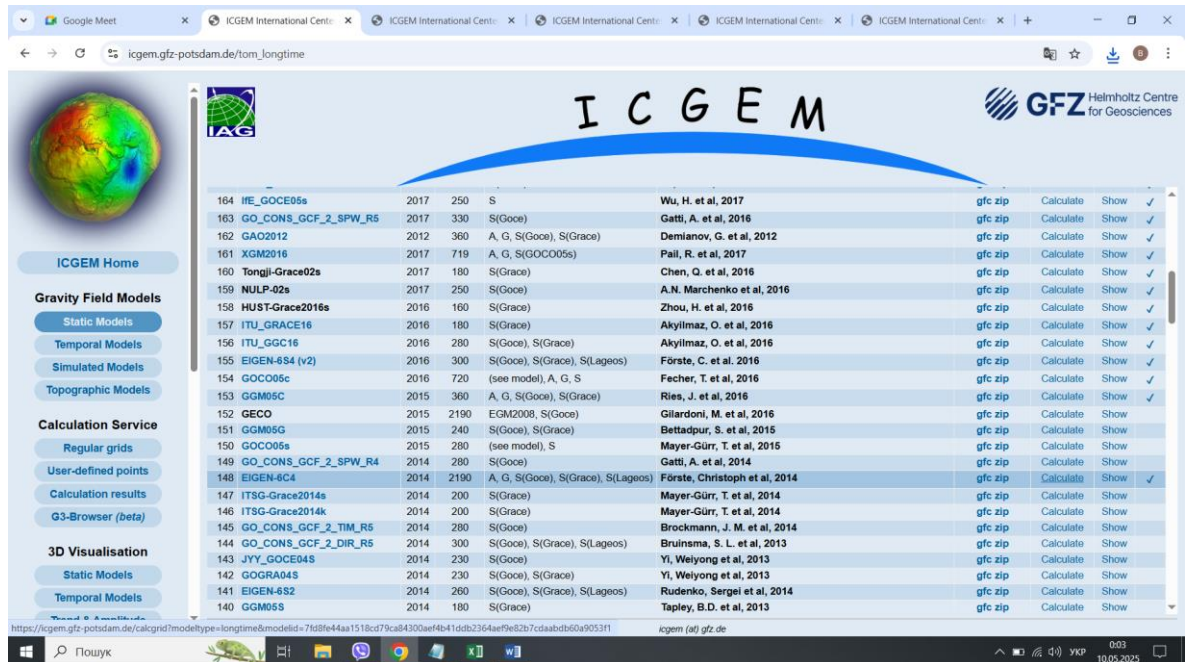
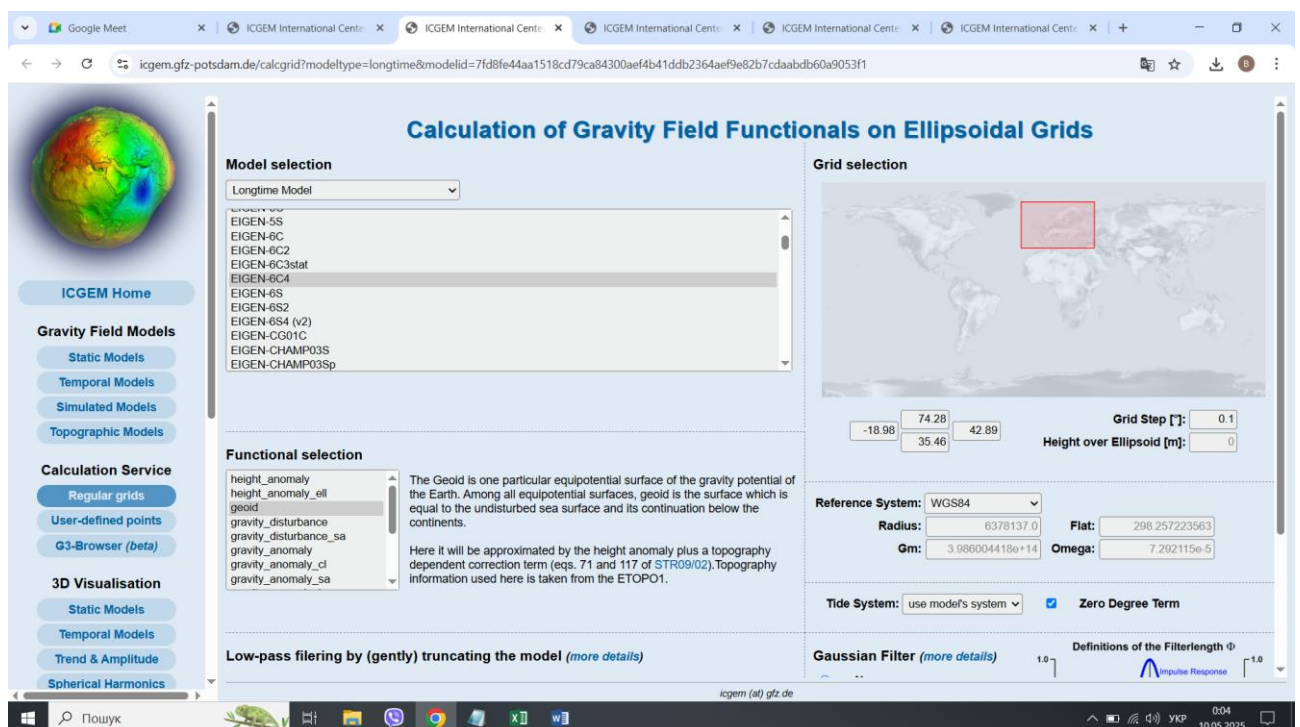


Рис. 3.2 Розділ «Static Models»

Вибрав відповідну широту та довготу, там де крок сітки то набрав $0,1^\circ$. В розділі «Functional selection» обрав «geoid» і після цього натиснув на «start computation».



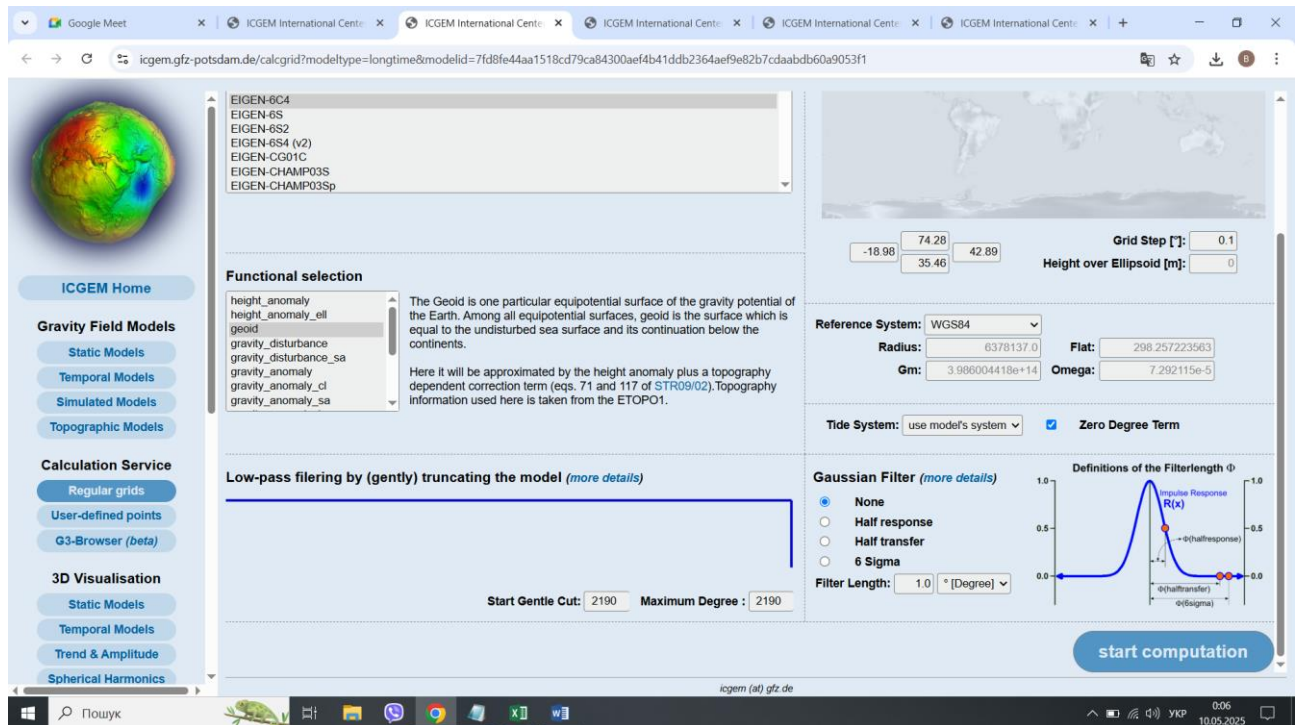


Рис. 3.3 та 3.4 Сторінка розрахунку функціоналів гравітаційного поля на еліпсоїдних сітках

Після того як завантажився файл, то натиснув на «Results».

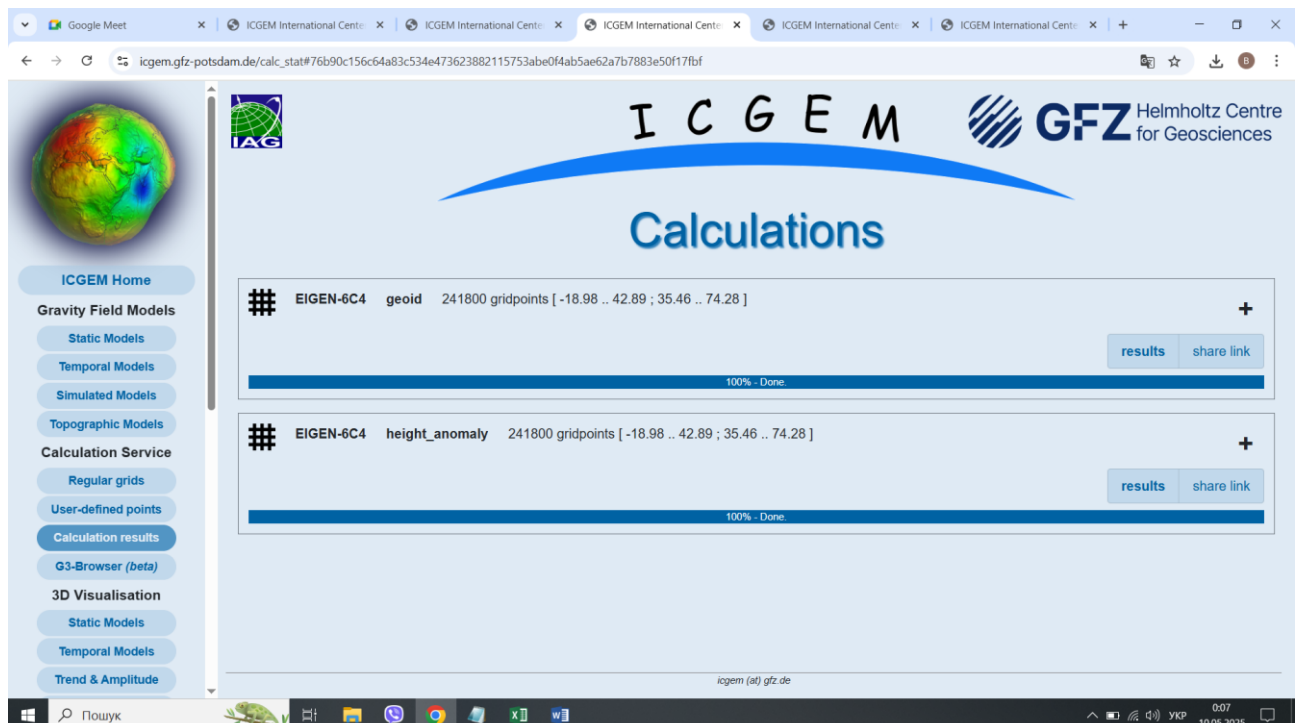


Рис. 3.5 Калькуляція

Мене перекинуло на іншу вкладку сайту, де показаний результат побудови геоїда території Європи.

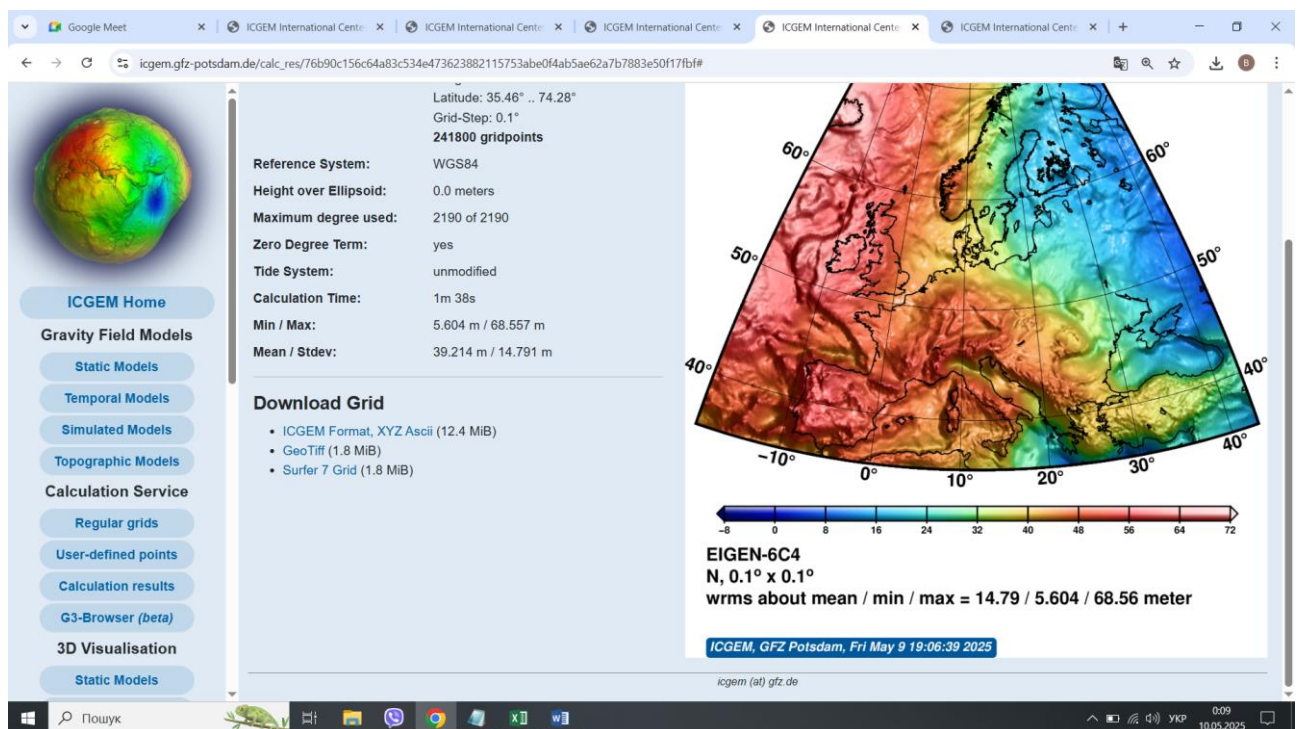
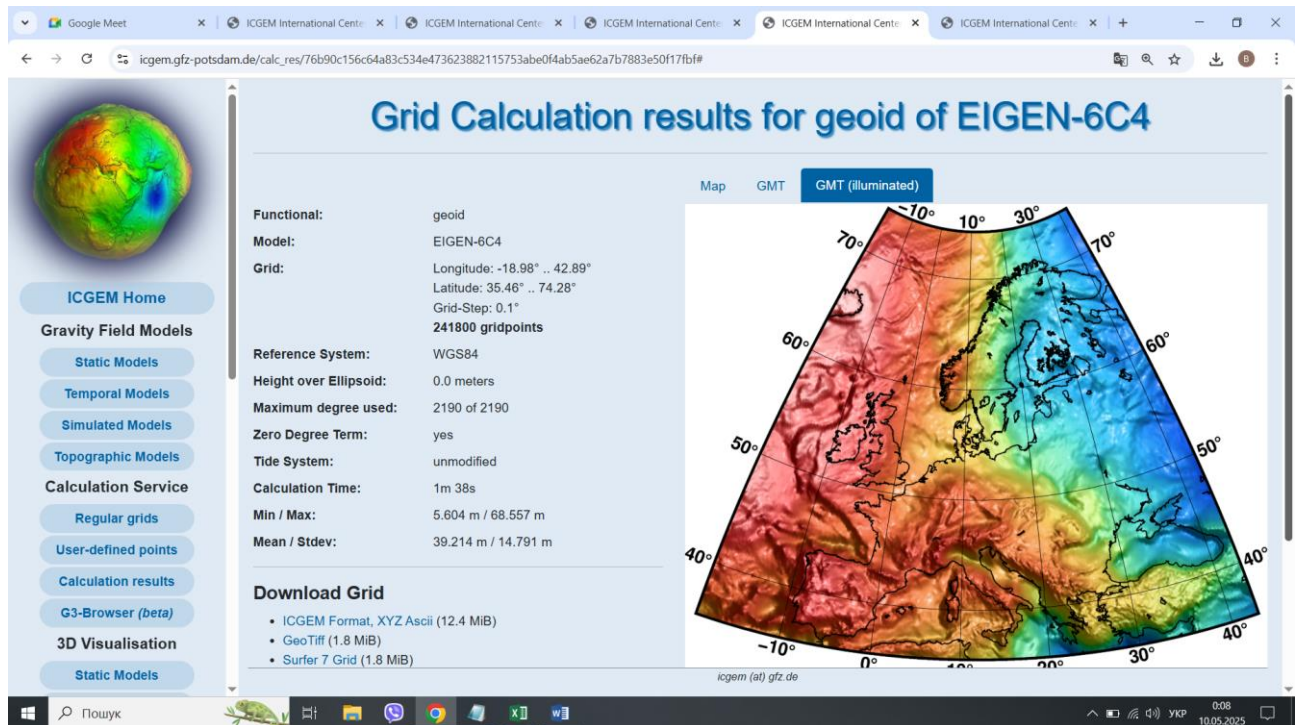


Рис. 3.6 та 3.7 Результат у вигляді геоїда території Європи

Там, де «Download Grid» я натиснув на кнопку «ICGEM Format, XYZ Ascii (12,4 MiB)», після чого мені в Блокноті завантажився файл зі всіма даними геоїда.

Значення широти, довготи та висоти я перемістив у Excel.

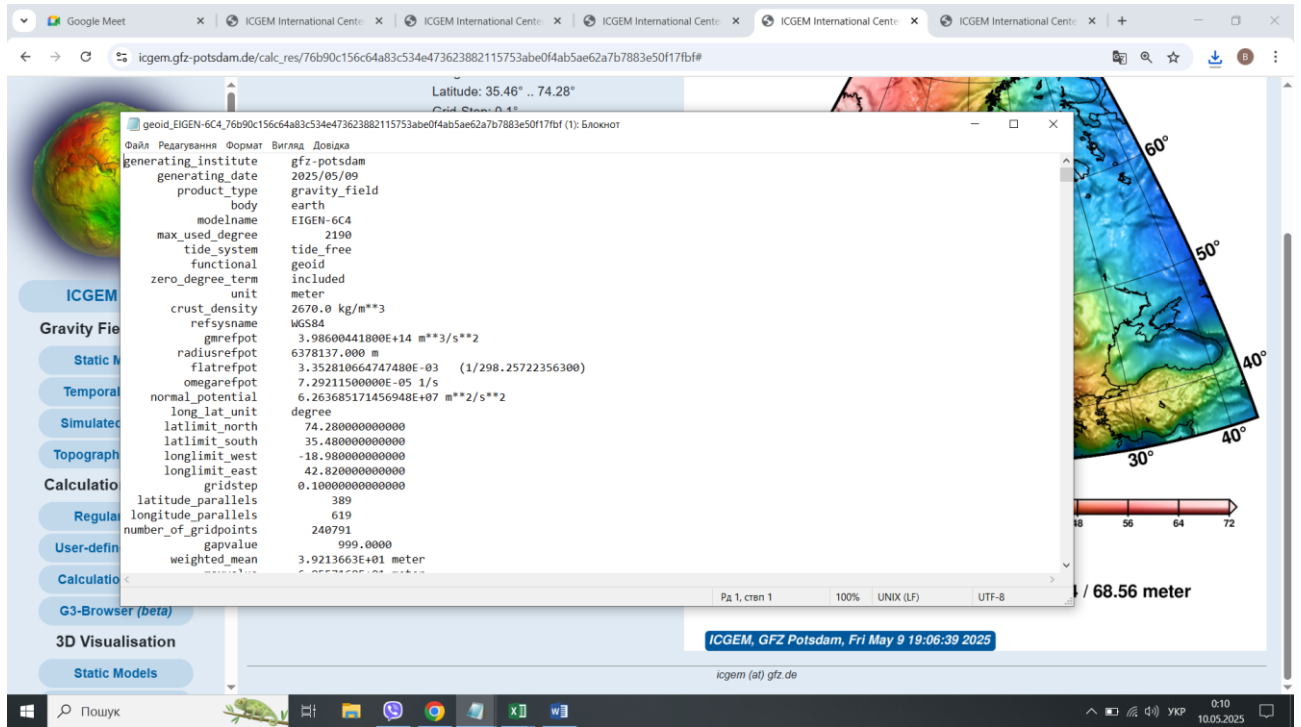


Рис. 3.8 Дані про геоїд території Європи

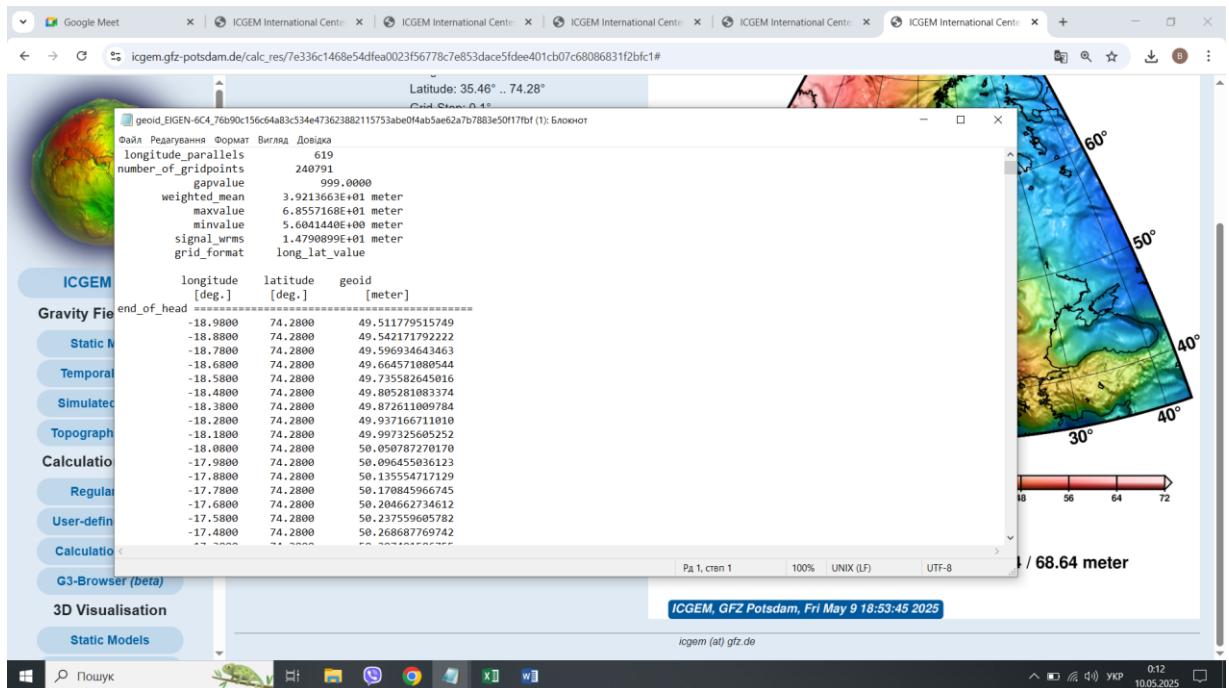


Рис. 3.9 Показники широти, довготи та висоти геоїда території Європи

Аналогічний порядок дій я зробив і з квазігеоїдом.

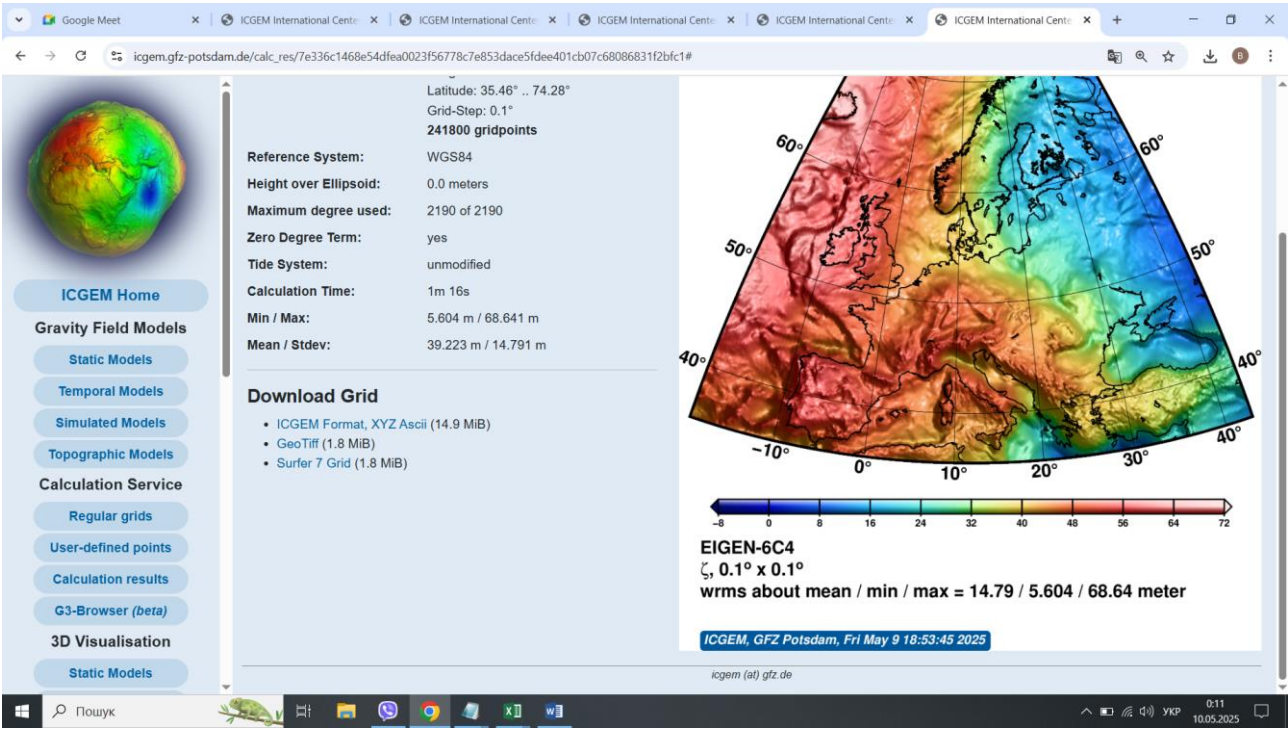
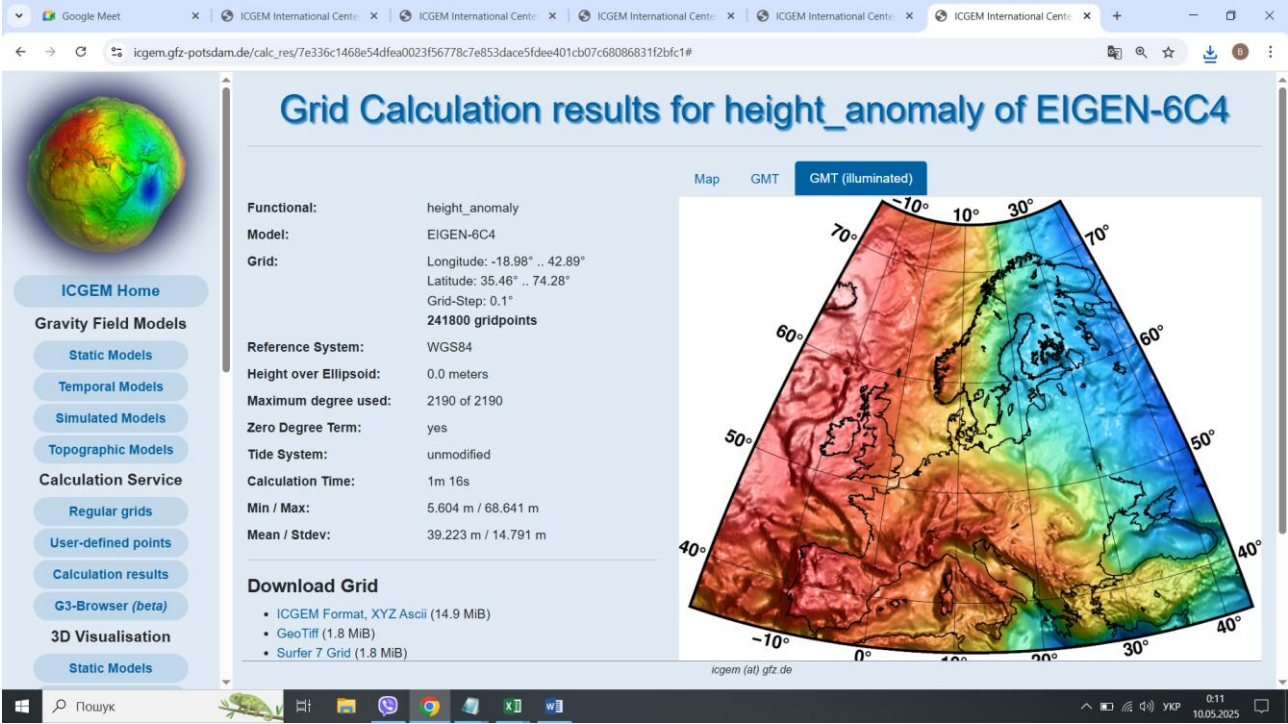


Рис. 3.10 та 3.11. Результат у вигляді квазігеоїда території Європи

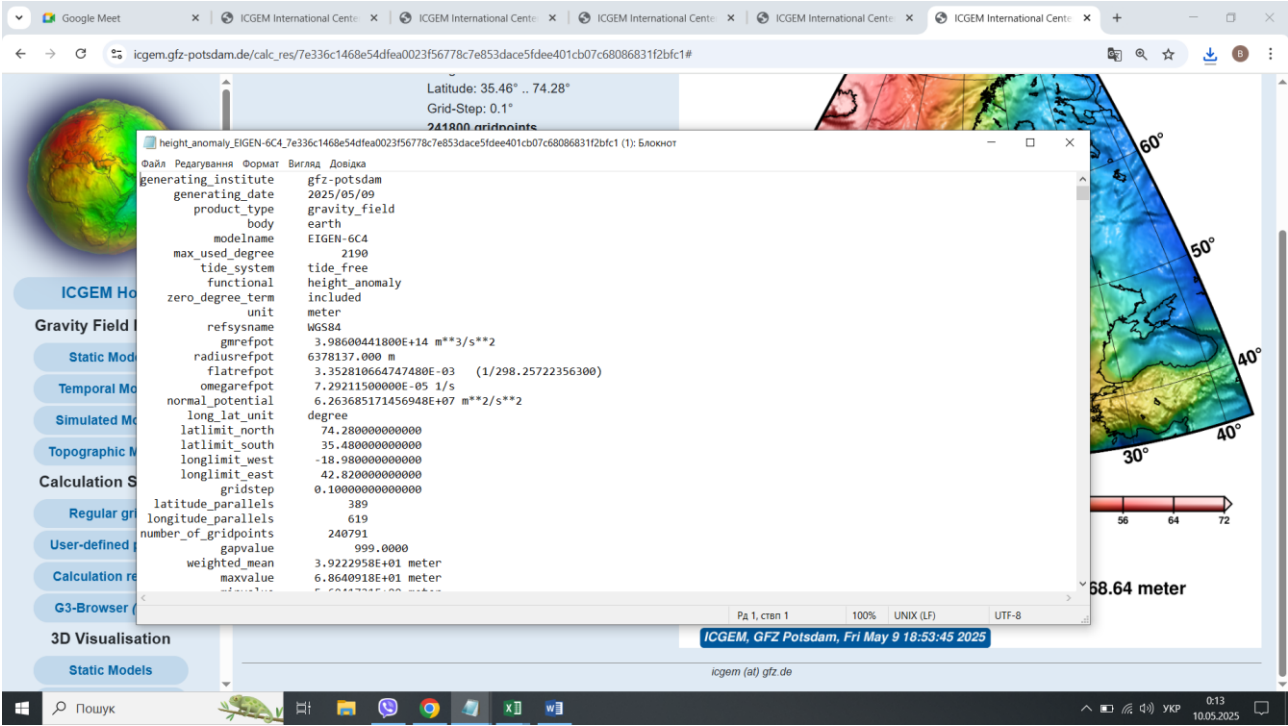


Рис. 3.12 Дані про квазігеоїд території Європи

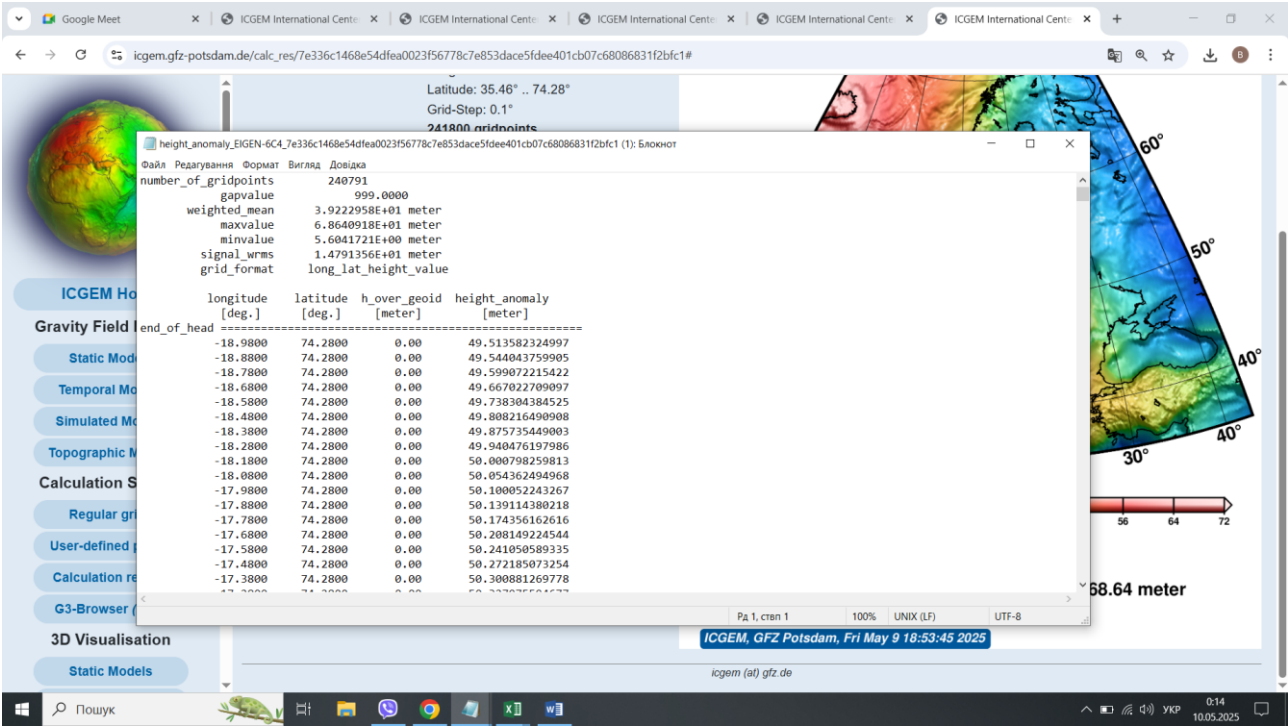


Рис. 3.13 Показники широти, довготи та висоти квазігеоїда території Європи

В Excel показані значення даних геоїда та квазігеоїда.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	-18.9800	74.2800	49.511779515749																				
2	-18.8800	74.2800	49.542171792222																				
3	-18.7800	74.2800	49.596934643463																				
4	-18.6800	74.2800	49.664571080544																				
5	-18.5800	74.2800	49.735582645016																				
6	-18.4800	74.2800	49.805281083374																				
7	-18.3800	74.2800	49.872611009784																				
8	-18.2800	74.2800	49.937166711010																				
9	-18.1800	74.2800	49.997325605252																				
10	-18.0800	74.2800	50.050787270170																				
11	-17.9800	74.2800	50.096455036123																				
12	-17.8800	74.2800	50.135554717129																				
13	-17.7800	74.2800	50.170845966745																				
14	-17.6800	74.2800	50.204662734612																				
15	-17.5800	74.2800	50.237559605782																				
16	-17.4800	74.2800	50.268687769742																				
17	-17.3800	74.2800	50.297401586755																				
18	-17.2800	74.2800	50.324538116741																				
19	-17.1800	74.2800	50.352232783814																				
20	-17.0800	74.2800	50.382550172631																				
21	-16.9800	74.2800	50.416262127441																				
22	-16.8800	74.2800	50.452851647097																				
23	-16.7800	74.2800	50.491573764630																				
24	-16.6800	74.2800	50.532387673663																				
25	-16.5800	74.2800	50.575750251575																				
26	-16.4800	74.2800	50.621439049025																				
27	-16.3800	74.2800	50.667611608121																				
28	-16.2800	74.2800	50.711199131430																				
29	-16.1800	74.2800	50.749545409010																				
30	-16.0800	74.2800	50.782020052508																				

Рис. 3.14 Показники геоїда в Excel

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	-18.9800	74.2800	0.00	49.513582324997																			
2	-18.8800	74.2800	0.00	49.544043759905																			
3	-18.7800	74.2800	0.00	49.599072215422																			
4	-18.6800	74.2800	0.00	49.667022709097																			
5	-18.5800	74.2800	0.00	49.738304384525																			
6	-18.4800	74.2800	0.00	49.808216490908																			
7	-18.3800	74.2800	0.00	49.875735449003																			
8	-18.2800	74.2800	0.00	49.940476197986																			
9	-18.1800	74.2800	0.00	50.000798259813																			
10	-18.0800	74.2800	0.00	50.054362494968																			
11	-17.9800	74.2800	0.00	50.100052243267																			
12	-17.8800	74.2800	0.00	50.139114380218																			
13	-17.7800	74.2800	0.00	50.174356162616																			
14	-17.6800	74.2800	0.00	50.208149224544																			
15	-17.5800	74.2800	0.00	50.241050589335																			
16	-17.4800	74.2800	0.00	50.272185073254																			
17	-17.3800	74.2800	0.00	50.300881269778																			
18	-17.2800	74.2800	0.00	50.327975594677																			
19	-17.1800	74.2800	0.00	50.355626904692																			
20	-17.0800	74.2800	0.00	50.385925038205																			
21	-16.9800	74.2800	0.00	50.419648563314																			
22	-16.8800	74.2800	0.00	50.456269152040																			
23	-16.7800	74.2800	0.00	50.495031049324																			
24	-16.6800	74.2800	0.00	50.535899375261																			
25	-16.5800	74.2800	0.00	50.579349704474																			
26	-16.4800	74.2800	0.00	50.625169617441																			
27	-16.3800	74.2800	0.00	50.671499862962																			
28	-16.2800	74.2800	0.00	50.715232399873																			
29	-16.1800	74.2800	0.00	50.753675304778																			
30	-16.0800	74.2800	0.00	50.786192343206																			

Рис. 3.15 Показники квазігеоїда в Excel

Завдання полягає в тому, щоб визначити різницю висот між ними.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	-18,9800	74,2800																					
2	-18,8800	74,2800																					
3	-18,7800	74,2800																					
4	-18,6800	74,2800																					
5	-18,5800	74,2800																					
6	-18,4800	74,2800																					
7	-18,3800	74,2800																					
8	-18,2800	74,2800																					
9	-18,1800	74,2800																					
10	-18,0800	74,2800																					
11	-17,9800	74,2800																					
12	-17,8800	74,2800																					
13	-17,7800	74,2800																					
14	-17,6800	74,2800																					
15	-17,5800	74,2800																					
16	-17,4800	74,2800																					
17	-17,3800	74,2800																					
18	-17,2800	74,2800																					
19	-17,1800	74,2800																					
20	-17,0800	74,2800																					
21	-16,9800	74,2800																					
22	-16,8800	74,2800																					
23	-16,7800	74,2800																					
24	-16,6800	74,2800																					
25	-16,5800	74,2800																					
26	-16,4800	74,2800																					
27	-16,3800	74,2800																					
28	-16,2800	74,2800																					
29	-16,1800	74,2800																					
30	-16,0800	74,2800																					

Рис. 3.16 Вкладка перед визначенням різниці висот між ними

Для цього по формулі віднімаємо значення висот геоїда і квазігеоїда, і отримуємо такі результати.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W
1	-18,9800	74,2800	-0,001802809																				
2	-18,8800	74,2800	-0,001871968																				
3	-18,7800	74,2800	-0,002137572																				
4	-18,6800	74,2800	-0,002451629																				
5	-18,5800	74,2800	-0,00272174																				
6	-18,4800	74,2800	-0,002935408																				
7	-18,3800	74,2800	-0,003124439																				
8	-18,2800	74,2800	-0,003309487																				
9	-18,1800	74,2800	-0,003472655																				
10	-18,0800	74,2800	-0,003575225																				
11	-17,9800	74,2800	-0,003597207																				
12	-17,8800	74,2800	-0,003559663																				
13	-17,7800	74,2800	-0,003510196																				
14	-17,6800	74,2800	-0,00348649																				
15	-17,5800	74,2800	-0,003490984																				
16	-17,4800	74,2800	-0,003497304																				
17	-17,3800	74,2800	-0,003479683																				
18	-17,2800	74,2800	-0,003437478																				
19	-17,1800	74,2800	-0,003394121																				
20	-17,0800	74,2800	-0,003374866																				
21	-16,9800	74,2800	-0,003386436																				
22	-16,8800	74,2800	-0,003417505																				
23	-16,7800	74,2800	-0,003457285																				
24	-16,6800	74,2800	-0,003511702																				
25	-16,5800	74,2800	-0,003599453																				
26	-16,4800	74,2800	-0,003730568																				
27	-16,3800	74,2800	-0,003888255																				
28	-16,2800	74,2800	-0,004033268																				
29	-16,1800	74,2800	-0,004129896																				
30	-16,0800	74,2800	-0,004172291																				

Рис. 3.17 Визначення різниці висот за допомогою формули

Після цього я експортував файл у CSV режим і зберіг окремо.

Висновки до розділу 3

У третьому розділі було представлено методологію та результати побудови моделей геоїда та квазігеоїда на територію Європи. Проведена робота демонструє сучасний підхід до вирішення однієї з ключових задач вищої геодезії - математичного опису фізичної фігури Землі та її гравітаційного поля.

Для реалізації цього завдання було використано сервіс Міжнародного центру глобальних моделей Землі (ICGEM), що надає широкий спектр інструментів для аналізу та візуалізації гравітаційного поля. У процесі дослідження було застосовано модель EIGEN-6C4, яка є однією з найбільш точних сучасних глобальних моделей гравітаційного поля Землі.

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити такі висновки:

1. Методика побудови геоїда та квазігеоїда з використанням онлайн-сервісу ICGEM є ефективним та доступним інструментом для проведення подібних досліджень, забезпечуючи високу точність та репрезентативність даних.
2. Використана модель EIGEN-6C4 дозволила отримати детальні дані про висоти геоїда та квазігеоїда на території Європи з кроком сітки $0,1^\circ$, що забезпечує достатню роздільну здатність для аналізу локальних особливостей гравітаційного поля.
3. Побудовані моделі демонструють варіації висот геоїда та квазігеоїда на території Європи, що відображає неоднорідність розподілу мас в земній корі та мантиї континенту.
4. Обчислені різниці між висотами геоїда та квазігеоїда дозволяють оцінити величину та характер відхилень між цими референцними поверхнями, що має практичне значення для геодезичних робіт та наукових досліджень.
5. Отримані дані можуть бути використані для коректного переходу між різними системами висот, що особливо актуально для транскордонних геодезичних проектів на території Європи.

Проведене дослідження підтверджує важливість використання сучасних глобальних моделей гравітаційного поля Землі для вирішення теоретичних та практичних задач вищої геодезії, зокрема для уточнення параметрів фігури Землі та систем висот.

ВИСНОВКИ

Проблематика систем висот в Європі є важливим аспектом у сфері геодезії та картографії, оскільки правильне визначення висоти точок на земній поверхні має безпосереднє значення для різних галузей науки та техніки, включаючи будівництво, транспортування, екологію, а також для збереження природних ресурсів. Вивчення та порівняння різних систем висот дозволяє зрозуміти, як застосовуються геодезичні методи для визначення висоти, які стандарти і принципи існують для цієї мети, а також якими технічними засобами забезпечується точність вимірювань.

Європа має ряд різних систем висот, оскільки кожна країна з часом розробляла свою власну вертикальну систему вимірювання висот для забезпечення своїх геодезичних потреб. Однією з основних категорій таких систем є універсальні вертикальні системи, що мають широке застосування в різних країнах для точного вимірювання висоти відносно рівня моря. Такі системи визначають вертикальні координати точок на земній поверхні, що є важливими для складання топографічних карт, геодезичних розрахунків, інженерних проектів та визначення рівнів різних природних явищ, таких як рівень води в річках та озерах.

Однак відсутність єдиної загальноєвропейської системи висот є серйозною проблемою для точності міжкраїнних вимірювань і взаємодії геодезичних даних, а також для ефективного виконання міжнародних проектів. Більшість країн використовує свої національні системи висот, засновані на різних підходах до визначення нульового рівня. Це може бути рівень моря, який визначений для конкретної місцевості, або інші технічні параметри. Відсутність єдиного стандарту призводить до труднощів при обміні геодезичними даними, створенні міжнародних проектів і здійсненні спільних досліджень, де точність вимірювань висот є критично важливою.

Також важливим фактором є різниця у визначенні нульового рівня в різних країнах. Для багатьох геодезичних систем у Європі нульовий рівень

висоти, від якого ведуться вимірювання, є рівень моря. Проте рівень моря в різних точках Європи може відрізнятися, що створює додаткові складнощі в порівнянні даних між різними країнами. Наприклад, через відмінності в рівні моря в Балтійському та Чорному морях виникають труднощі при інтеграції геодезичних вимірів з різних регіонів. У цьому контексті, побудова геоїда і квазігеоїда для території Європи стає надзвичайно важливою задачею. Геоїд, як математична модель, що представляє собою поверхню, яка збігається з рівнем середнього океану, є основним еталоном для визначення висоти точок на земній поверхні. Однак геоїд є складною поверхнею, яку важко безпосередньо виміряти, тому використовуються численні математичні моделі для її побудови. Геодезисти застосовують методи гравіметрії та сучасні супутникові технології для точного визначення форм геоїда, що дозволяє забезпечити високу точність при вимірюванні висот на великих територіях.

Квазігеоїд є спрощеною математичною моделлю геоїда, яка використовується для розв'язання деяких практичних завдань, таких як визначення висот на конкретних ділянках земної поверхні. Квазігеоїд враховує ряд факторів, таких як гравітаційне поле Землі, що робить його корисним інструментом для геодезичних досліджень, але з деякими допущеннями щодо його точності порівняно з геоїдом. Підсумовуючи, можна стверджувати, що аналіз систем висот в Європі є важливим кроком до розуміння сучасних проблем геодезії та картографії. Врахування різних вертикальних систем і підходів до вимірювання висоти, а також детальне вивчення побудови геоїда і квазігеоїда, сприяє розвитку точних методик вимірювань і сприяє створенню єдиної і інтегрованої системи для міжкраїнних геодезичних робіт. Завдяки цим дослідженням можна покращити взаємодію геодезичних даних між країнами, що є важливим для розвитку міжнародних інфраструктурних проектів і забезпечення точності в різних галузях, таких як будівництво, навігація, екологія та багато інших.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. EUREF Permanent GNSS Network. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.epncb.oma.be/>.
2. EUVN - Європейська вертикальна опорна мережа. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://evrs.bkg.bund.de/Subsites/EVRS/EN/Projects/EUVN/euvn_cont.html.
3. GFZ Helmholtz Centre for Geosciences. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.gfz.de/en/section/global-geomonitoring-and-gravity-field/data-products-services/icgem-international-centre-for-global-earth-models>.
4. ICGEM – International Centre for Global Earth Models. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ggos.org/item/icgem/>.
5. IHRF CC: International Height Reference Frame Coordination Center. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ihrfcc.topo.auth.gr/>.
6. The Height Solution of the European Vertical Reference Network (EUVN). [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://evrs.bkg.bund.de/SharedDocs/Downloads/EVRS/EN/Publications/TheEUVNHeightSolution.pdf?__blob=publicationFile&v=2.
7. Боднар А.О. Основи геодезії для студентів технічних спеціальностей. — Чернівці: Букрек, 2021. — 350 с.
8. Бойко Ю.В. Геодезія в будівництві: Теорія та практика. — Дніпро: Наука, 2022. — 310 с.
9. Вербицький П.В. Геодезичні технології в інженерії. — Київ: Академвидав, 2021. — 300 с.
10. Вербицький П.С. Основи геодезії та геоінформатики. — Київ: Техніка, 2020. — 340 с.
11. Геоїд та квазігеоїд території Європи. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.isgeoid.polimi.it/Geoid/Europe/europe_g.html.
12. Грицай І.О. Геодезичні системи координат: Теорія та застосування. — Львів: Світ, 2021. — 295 с.

13. Європейська наземна референсна система 89 (ETRS89). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://etrs89.ensg.ign.fr/>.
14. Ковальчук В.М. Вимірювання висот: Теорія та практика. — Харків: ХНУ, 2021. — 250 с.
15. Козак І.В. Вимірювання висот в геодезії: Сучасний погляд. — Київ: Книга, 2022. — 370 с.
16. Литвинова І.В. Геодезія та картографія: Навчальний посібник. — Харків: ХНУ, 2022. — 260 с.
17. Літвинов М.В. Геодезичні системи координат в Україні та Європі. — Київ: Техніка, 2021. — 280 с.
18. Лук`янченко Ю.О. Застосування супутникових та наземних даних для побудови моделей гравітаційного поля Землі. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук / Національний університет «Львівська політехніка», 2016.
19. Лук`янченко Ю.О., Лопушанський О.М., Гуменний М.І., Музика Н.М., Тартачинська З.Р. Опрацювання сучасних часових серій руху полюсів землі / Український журнал прикладної економіки та техніки. 2025. Том 10. № 1.
20. Лук`янченко Ю.О., Лопушанський О.М., Гуменний М.І., Перович І.Л., Лопушанська М.Р. Теоретичні аспекти аналізу сучасного руху полюсів землі / Український журнал прикладної економіки та техніки. 2024. Том 9. № 3.
21. Міжнародна висотна референсна структура IHRF – Координаційний центр. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ggos.org/2024/01/29/ihrf-coordination-centre/>.
22. Міжнародний центр глобальних моделей Землі (ICGEM). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://icgem.gfz-potsdam.de/home>.

23. Місії GRACE (2002–2017) та GRACE-FO (від 2018): вимірювання змін гравітації Землі. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.fizyka.ua.com/post/misi%C3%AF-grace-ta-grace-fo>.
24. Морозов І.П. Теоретичні аспекти геодезії: Навчальний посібник. — Київ: Вища школа, 2022. — 420 с.
25. Петров С.О. Геодезичні роботи: Підручник. — Київ: Літера, 2022. — 275 с.
26. Робоча група з питань стратегії реалізації Міжнародної системи відліку висот (IHRs). [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ggos.org/about/org/fa/unified-height-system/wg/ihrs-realization/>.
27. Руденко М.І. Основи геоінформатики та геодезії. — Чернівці: Букрек, 2020. — 370 с.
28. Руденко О.М. Геодезичні вимірювання: Теорія та практика. — Чернівці: Букрек, 2020. — 380 с.
29. Степанов А.С. Основи геодезії та картографії. — Львів: Університет, 2021. — 340 с.
30. Степанов О.М. Геоінформаційні системи: Основи та технології. — Львів: Світ, 2022. — 290 с.
31. Тараненко В.М. Геодезія: Методи та техніки. — Одеса: ОДУ, 2021. — 310 с.
32. Федоренко І.П. Геодезія для інженерів. — Київ: Кондор, 2020. — 330 с.
33. Шевченко В.С. Геодезичні системи: Стандарти та практика. — Харків: ХНУ, 2020. — 330 с.