

УДК 528. 11/16

П. Д. ДВУЛІТ

Кафедра вищої геодезії та астрономії, Національний університет “Львівська політехніка”, вул. С. Бандери 12, Львів, Україна, 79013, ел. пошта: dvupet@ukr.net

МІСЦЕ ГЕОДЕЗІЇ ТА ГРАВІМЕТРІЇ В КОМПЛЕКСІ НАУК ПРО ЗЕМЛЮ

Метою публікації є оцінка і місце геодезії та гравіметрії у комплексі наук про Землю та вироблення рекомендацій щодо використання їх в різних галузях знань природничих наук. **Постановка проблеми та її зв'язок з важливими науковими і практичними завданнями.** У статті розглянуто деякі питання сучасного стану та перспективи розвитку геодезії та гравіметрії. Так, сучасна геодезія – природнича галузь, яка охоплює декілька напрямів: геодезія і топографія, прикладна або інженерна геодезія, морська геодезія, космічна геодезія, вища геодезія і фізична геодезія та інші. У задачу сучасної геодезії входить не тільки вивчення фізичної поверхні та зовнішнього гравітаційного поля Землі, але і вивчення еквіпотенціальних поверхонь однакового потенціалу сили тяжіння. Сучасний стан розвитку геодезії характеризується створенням єдиної державної або світової системи координат та параметрів зовнішнього гравітаційного поля Землі, а також нової системи нормальних висот і оновленої модернізованої гравіметричної системи. Саме тому зростає потреба у створенні високоточної гравіметричної інформації у зв'язку із широким впровадженням супутникових технологій під час виконання геодезичних завдань. Підкреслюється, що сучасна геодезія незаперечно завоювала статус найбільш фундаментальної, найбільш універсальної, найбільш точної і незамінної галузі науки освіти та виробництва у комплексі наук про Землю. У роботі розглянуто також коротку історію виникнення і розвитку гравіметричних досліджень у світі та Україні. Розвиток гравіметрії визначався технічними можливостями та науковими задачами геодезії та геофізики, а завданням гравіметрії є визначення параметрів гравітаційного поля Землі та інших небесних тіл як функція місця положення і часу за вимірюваннями сили тяжіння і гравітаційних градієнтів. Особливість розвитку гравіметрії за останні три століття полягає у неперервному розширенні вивчених територій континентів і океанів, а точність гравіметричних вимірювань увесь час зростала і досягла рівня одного мікрогала. Наведено аналіз гравіметричної вивченості Землі на основі наземних, морських і аерогравіметричних вимірювань прискорення вільного падіння, а також з використанням даних супутникової альтиметрії та градієнтометрії. Детальність поля сили тяжіння для потреб геодезії, геофізики, геології та океанографії оцінюється величиною 1 мГал для гравіметричних аномалій, а точність визначення висот квазігеоїда 1–2 см. Наведений сучасний стан гравіметричної вивченості території України і відзначається невідповідність гравіметричної мережі за якістю й щільністю пунктів і перспективи побудови нової інтегрованої у світову систему геодезичного забезпечення країни.

Ключові слова: сила тяжіння, гравітаційне поле Землі, гравіметричні аномалії, нормальні висоти, висоти квазігеоїда, складові відхилень прямовисних ліній, гравіметрична і геодезична мережі, супутникова альтиметрія і градієнтометрія.

Вступ

Необхідність обговорювати названу тему зумовлена тим, що в нас у державі склалося зневажливе ставлення до картографо-геодезичної галузі науки, освіти і виробництва. Воно розпочалося з того часу, як Головне управління геодезії і картографії при Кабінеті Міністрів України перетворили на Державну службу геодезії, картографії і кадастру і передали її у відомче підпорядкування. Сьогодні вона уже називається Державна служба з питань геодезії, картографії і кадастру. Значна частина підприємств служби знаходиться в кризовому стані, частина припинила своє існування. Нещодавно чимала гілка дерева геодезичних спеціальностей – інженерна геодезія – віднесена до категорії не дуже потрібних для держави. Відзначимо також, що Кабінет Міністрів України вилучив із переліку галузей знань і спеціальностей весь комплекс геодезичних наук (Постанова КМУ

№ 266 від 29.04.2015 р.). В Україні вона несправедливо принижується і руйнується. Віднесення Геодезії до галузі знань “Архітектура та будівництво” (шифр спеціальності 193 “Геодезія та землеустрій”) є черговим свідченням її руйнування. Крім цього, з 2016–2017 навчального року розпочато підготовку фахівців у галузі знань 10 “Природничі науки” за спеціальністю 103 “Науки про Землю”. Є цілком логічним і правомірним, щоб загальноглобальна галузь знань “Геодезичні науки” значилась окремим рядком в українському державному переліку галузей знань. За таких обставин не можна бути впевненим, що така доля не спіткає інших геодезичних спеціальностей і навчальних дисциплін, зокрема гравіметрії. Зупинимось на деяких питаннях сучасного стану та перспективах розвитку геодезії та гравіметрії

Як відомо, основним науковим завданням геодезії є визначення поверхні та зовнішнього гравітаційного поля Землі на основі астрономічних,

геодезичних і гравіметричних вимірювань. Близько двох з половиною тисячоліть тому поняття плоскої Землі змінилося на кулеподібну Землю і поставило завдання визначення її радіуса. За часів І. Ньютона під фігурою Землі розуміли стиснутий еліпсоїд обертання, а завданням геодезії стало визначення двох його параметрів – великої піввісі і стиснення. У кінці XVIII і на початку XIX ст. геодезисти й астрономи виявили розходження параметрів еліпсоїда, визначених у різних частинах світу, величини яких значно перебільшували помилки вимірювань. Це призвело до появи поняття геоїда – рівневої поверхні потенціалу сили тяжіння, яка проходить через початок відліку висот і яку запропонував німецький вчений Лістінг у 1873 році. З введенням поняття геоїда почався період, у якому основна задача геодезії полягала у визначенні поверхні геоїда і найбільш близького до нього поверхні еліпсоїда. Цей період тривав понад 100 років і був завершений у середині XX ст. Сучасний період розвитку вищої геодезії почався роботами М. С. Молоденського, який сформулював основну задачу геодезії як задачу визначення фізичної поверхні та зовнішнього гравітаційного поля Землі та їхніх змін з часом. Задача Молоденського є найповнішою порівняно із задачею визначення геоїда, оскільки за Молоденським можна визначити зовнішнє гравітаційне поле Землі, тобто всіх рівневих поверхонь, а не однієї єдиної поверхні геоїда. Але поверхня геоїда на континентах не визначається за вимірюваннями на її поверхні. Визначення поверхні Землі зводиться до встановлення єдиної системи координат положення опорних пунктів, закріплених на ній.

Сучасна геодезія – природнича галузь, яка містить декілька напрямів, які ґрунтуються на різних видах вимірювань і різних методах дослідження. Сьогодні у комплексі наук про Землю геодезія не заперечно завоювала статус найфундаментальнішої, найуніверсальнішої, найточнішої, найвсеосяжнішої і незамінної галузі науки, освіти і виробництва. Про це свідчить велика кількість її різновидів. Жоден із тих різновидів геодезії не може набути статусу непотрібної для людей, як це дехто говорить зараз.

Так, сучасну геодезію поділяють на декілька основних розділів: геодезія і топографія, прикладна або інженерна геодезія, морська геодезія, космічна геодезія, вища геодезія і фізична геодезія.

Геодезія у вузькому змісті розглядає методи і техніку вимірювань на місцевості в локальному районі для побудови планів і карт. Сукупність цих робіт називають топографічним зніманням або топографією. Прикладна або інженерна геодезія – розділ геодезії, в якому розглядаються методи і засоби геодезичних вимірювань, необхідних для забезпечення будівництва й експлуатації різних інженерних споруд. Морська геодезія – розділ геодезії, задачею якої є створення опорної мережі на поверхні або на дні океану для забезпечення геофізичних знімань континентального шельфу та дослідженні океанічного дна. Космічна геодезія –

розділ геодезії, в якому для визначення поверхні і гравітаційного поля використовують результати спостережень штучних і природних небесних тіл. Вища геодезія займається визначенням поверхні усієї Землі, визначаючи координати опорних точок цієї поверхні й елементи гравітаційного поля в єдиній координатній системі на основі вимірювань, які виконують на фізичній поверхні Землі. Фізична геодезія або геодезична гравіметрія розв'язує задачу визначення поверхні та гравітаційного поля Землі, використовуючи вимірювання елементів гравітаційного поля на її поверхні. Усі ці окремі розділи тісно взаємопов'язані. Поверхня Землі змінюється з плином часу в силу різних причин. Вивченням цих змін займається геодинаміка – наука, що досліджує причини, характер і зміни в часі динамічних процесів, які відбуваються під дією геофізичних силових полів (гравітаційного, магнітного, термічного тощо).

Геодезія вивчає поверхню Землі за допомогою вимірювань відстаней і кутів між точками цієї поверхні. Вимірювання виконують за допомогою геодезичних приладів, орієнтованих за напрямком прямовисної лінії або напрямку лінії виска. Прямовисна лінія – лінія дії сили тяжіння, тобто рівнодійної сили притягання усіма масами Землі і відцентрової сили, зумовленої обертанням Землі навколо полярної осі. Поверхня рідини в стані спокою завжди буде перпендикулярною до прямовисних ліній, а сам висок розміститься за напрямком лінії до цієї сили. Площину, яка перпендикулярна до вискової лінії, називають горизонтальною площиною, а площини, які проходять через прямовисну лінію – вертикальними площинами. Якщо переміщатися вздовж прямовисної лінії або у горизонтальній площині на деяку відстань, то тоді напрямком прискорення вільного падіння зміниться і в цих нових точках напрямком вискової лінії і положення горизонтальної площини буде іншими. Якщо ж переміщатися так, щоб зміщення відбувалося завжди перпендикулярно до напрямку прискорення вільного падіння, то буде утворена поверхня, яку називають рівневою або екіпотенціальною поверхнею. З цією поверхнею збігається вільна поверхня рідини, на яку діє тільки сила тяжіння. Лінія, яка проходить перпендикулярно до рівневих поверхонь, називається силовою лінією. У кожній точці силової лінії дотична до неї збігається з напрямком сили тяжіння. Отже, в задачу геодезії входить вивчення як фізичної поверхні Землі, так і рівневих поверхонь. А сама сила тяжіння змінюється за величиною і напрямком за просторового переміщення. Внаслідок цієї зміни сили тяжіння рівневі поверхні не є паралельними і мають дуже складну форму. Тому таке силове поле є не постійне за величиною та напрямком і його називають неоднорідним. В однорідному полі всі рівневі поверхні є горизонтальними площинами, а прямовисні лінії – паралельними прямими. Силі лінії та рівневі поверхні використовують у геодезії за матеріалізованої

прямокутної системи координат. Гравітаційне поле Землі вважають однорідним у геодезії (топографії) і прикладній геодезії. Вища, космічна і фізична геодезії завжди розв'язують задачі в неоднорідному гравітаційному полі реальної Землі.

Сучасний стан розвитку геодезії характеризується створенням єдиної державної або світової системи геодезичних координат та параметрів зовнішнього гравітаційного поля Землі, в яку увійдуть пункти високоточних супутникових мереж і нові тривимірні геоцентричні системи координат, а також нова система нормальних висот, оновлена або модернізована гравіметрична система, нова міжнародна земна опорна система (ITRS) і міжнародна небесна опорна система (IGRS) [Бровар, 1999; Віго Р., 1983].

Так зросла потреба в створенні високоточної гравіметричної інформації у зв'язку із широким впровадженням супутникових технологій під час внесення геодезичних завдань і навігаційного забезпечення. У великих обсягах виконують гравіметричні вимірювання, проводять науково-дослідні роботи в галузі інструментальної та геодезичної гравіметрії. Це передусім відбувається у високорозвинутих країнах світу. В багатьох країнах такі вимірювання виконують на супутникових пунктах спостережень балістичними гравіметрами, а неперервні вимірювання прискорення вільного падіння виконують кріогенними гравіметрами [Torge W., 1989]. Підвищення точності визначення просторових координат гравіметричних пунктів за допомогою супутникових технологій дає змогу розглянути можливості визначення прискорення сили притягання за вимірюваннями прискорення вільного падіння і геодезичними просторовими координатами. Розвиток геодезії, гравіметрії, астрономії та інших наук дає можливість створювати комплексні системи вимірювань даних про координати, орієнтуванню та різних характеристик гравітаційного поля.

За допомогою теоретичної геодезії, яка використовує геодезичні та гравіметричні дані, визначена світова геодезична система на основі наявних у різних районах земної кулі. Подальше підвищення точності представлення гравітаційного поля Землі пов'язано із підвищенням точності теорії, із приведенням геодезичних та гравітаційних вимірювань у єдину систему координат усіх державних (національних) мереж, висот (нормальних) і гравіметричних аномалій, а також підвищенням точності та густоти гравіметричних визначень та їхнє місцезнаходження [Бровар, Гусев, Юркина, 2005; Hofmann – Wellenhof B., Moritz H., 2005].

Коротка історія виникнення і розвитку гравіметричних досліджень у світі та на Україні

Сучасна гравіметрія і теорія фігури Землі почалася науковими роботами Г. Галілея і І. Ньютона. Історія вивчення гравіметричного поля Землі за

вимірюваннями прискорення вільного падіння починається від відкриття Г. Галілеєм законів руху тіл, а саме закон вільного падіння і закон руху маятника. У 1590 році, спостерігаючи за рухом тіл, і вимірюючи шлях падіння та час, Г. Галілей вперше визначив прискорення вільного падіння. Теоретичні основи гравіметрії були реалізовані у період кульмінації наукової революції одночасно із розвитком теорії тяжіння, механіки твердого тіла і гідростатики.

Г. Галілей встановив, що вільне падіння – це рівноприскорений рух, а Х. Гюйгенс розвинув теорію математичного і фізичного маятників і створив перший маятниковий годинник. Після цих відкриттів стало можливим дослідження фігур рівноваги обертальної рідини. І. Ньютон і Х. Гюйгенс визначили фігури рівноваги рідкої однорідної Землі і виявили ефект полярного стиснення. Сама фігура – це еліпсоїд обертання, на поверхні якого прискорення вільного падіння повинно збільшуватися від екватора до полюсів. Глобальні дослідження Землі гравіметричним методом ґрунтується на залежності, яку встановив І. Ньютон, сили тяжіння від широти, а також знаменитої теореми А. Клеро, яка зв'язує закон тяжіння на Землі з її формою.

$$\rho = a(1 - \alpha \sin^2 \varphi),$$

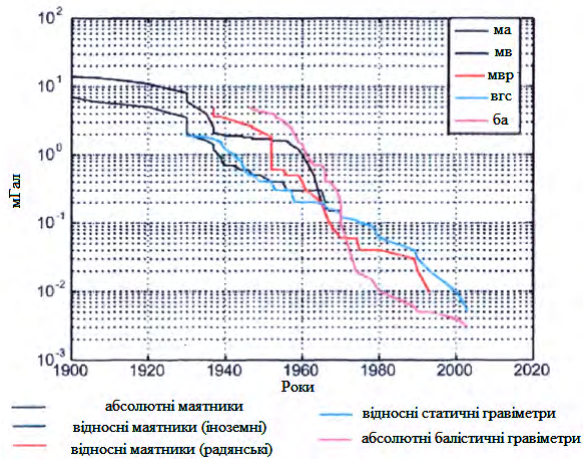
$$\gamma = \gamma_e(1 + \beta \sin^2 \varphi),$$

$$\alpha + \beta = \frac{5}{2} \cdot \frac{\omega^2 a}{\gamma_e},$$

де ρ – радіус вектор земного еліпсоїда; γ , γ_e – сила тяжіння на поверхні еліпсоїда і на екваторі відповідно; β – коефіцієнт, що виражає зміну сили тяжіння з широтою; ω – кутова швидкість обертання Землі.

Початком використання гравіметричного методу для детального дослідження поверхні Землі можна вважати 1849 рік, у якому англійський фізик Д. Стокс отримав формулу визначення висоти геоїда над еліпсоїдом за вимірюваними значеннями сили тяжіння на геоїді. Математичним апаратом для гравіметрії стала теорія потенціалу, розвитком якого є заслуги французьких математиків Ж. Лагранж, П. Лаплас, А. Лежандр і С. Пуассон. Розвиток гравіметрії визначався технічними можливостями та науковими задачами геодезії та геофізики. Завданням гравіметрії є визначення параметрів гравітаційного поля Землі та інших небесних тіл як функція місця положення і часу за вимірюваннями прискорення вільного падіння і гравітаційних градієнтів на поверхні тіла або поблизу неї.

Особливість розвитку гравіметрії за останні три століття полягає у неперервному розширенні вивчених територій континентів і океанів, але в такому разі точність вимірювання прискорення вільного падіння весь час зростає [Вольфганг Торге, 1999; Віго Р., 1983] (див. рисунок).



*Зменшення похибок
гравіметричних приладів з часом
Reducing errors of gravimetric
instruments with time*

Відповідно до завдань і використовуваної вимірювальної апаратури виділяють чотири етапи розвитку гравіметрії:

— теоретичні основи розвитку гравіметрії у XVII–XVIII ст. Галілео Галілей виконував експерименти з падаючими тілами і ним були відкриті закони інерції та вільного падіння, а Християн Гюйгенс створив теорію математичних і фізичних маятників та перших маятникових годинників і перших маятникових приладів;

— удосконалення маятникових приладів і початок їх використання в глобальних задачах геодезії та геофізики у XVIII–XIX ст.;

— розвиток варіометрів, градієнтометрів та статичних гравіметрів, регіональні гравіметричні знімання для геофізики у першій половині XX ст. У цей час точність статичних гравіметрів становить 10^{-8} м·с⁻² – 10^{-7} м·с⁻²;

— розвиток балістичних гравіметрів та створення прецензійних гравіметричних мереж для вирішення завдань геодезії, геофізики і геодинаміки у другій половині XX ст. та на початку XXI ст.

Гравіметрична вивченість Землі

Гравіметричні зйомки земної поверхні й акваторій морів і океанів дають необхідну вихідну інформацію для вирішення наукових завдань фізичної геодезії, наукових і прикладних завдань геофізики, а також інших прикладних задач. Це перш за все: вивчення гравітаційного поля, фігури та розмірів Землі, розвідування корисних копалин та вивчення будови літосфери. До появи штучних супутників Землі гравіметричні зйомки були основним і єдиним джерелом інформації для вивчення гравітаційного поля Землі. Але із запуском ШСЗ і появою супутникової альтиметрії гравіметричні знімання не втратили свого значення і продовжують займати важливе місце серед

основних джерел інформації про тонку структуру гравітаційного поля Землі [Бровар, 1970, 1971].

Гравіметрична вивченість Землі за наземними і морськими гравіметричними зйомками до середини 80-х років XX ст. була дуже нерівномірною, а в даний час гравіметричними зніманнями покриті значні площі як на континентах, так і на морях і океанах. Наведемо загалом узагальнені відомості про загальну картину гравіметричної вивченості [3]. Картосхема середніх значень аномалій у вільному повітрі для трапецій $1^\circ \times 1^\circ$ для усієї поверхні Землі складена на основі матеріалів Міжнародного гравіметричного бюро і Ламонтської геологічної обсерваторії.

Гравіметрична вивченість держав Європи переважно покрита детальними гравіметричними зйомками, але для деяких країн (колишня Югославія, Албанія) взагалі немає матеріалів гравіметричного знімання або дуже мало цих даних (Греція). На територію Західної Європи і Північну Африку складено карту аномалій Буге Міжнародним гравіметричним бюро у масштабі 1:10 000 000.

Гравіметрична вивченість держав Азії є дуже нерівномірною. Так, гравіметричні знімання інтенсивно проводять у більшій частині території країн (Індія, Японія, Сирія, Ірак), водночас у багатьох державах Азії залишаються невивченими високогірні області Тибету та Гімалаїв, а також території Туреччини, Південного Афганістану.

За останні роки є значний прогрес у розвитку гравіметричних зйомок на Африканському континенті. Але гравіметрична вивченість держав Африки є дуже неоднорідною. Найкраще вивчена північно-західна частина Африканського континенту, менш вивчені північно-східні і південно-східні райони Африки.

Гравіметрична вивченість Північної Америки більш однорідна, ніж Азії і Африки. На території США і більшої частини Канади є складені гравіметричні карти масштабу 1:250 000. Порівняно слабше вивчені Аляска, західні та північні райони Канади. Слабко вивчені значні території Мексики і Центральної Америки. Держави Південної Америки також вивчені дуже слабко. У значному ступені покриті гравіметричними зніманнями лише Аргентина, Чилі й Уругвай.

Достатньо рівномірно вивчена територія Австралії та акваторія до неї шельфу. Більша частина території суходолу покрита детальними зйомками.

Вивченням гравітаційного поля Антарктиди та прибережних районів океану займались у багатьох країнах світу. Гравіметричними вимірюваннями займались у колишньому СРСР, США, Японія, Англія, Австралія, Франція, Нова Зеландія, Бельгія, Чилі. Загалом в Антарктиді, за даними таких досліджень, створено близько восьми тисяч гравіметричних пунктів.

Гравіметричні дослідження у Світовому океані проводили спеціалісти колишнього СРСР, США, Японії, Австралії, Нідерландів, Канади, Англії,

Італії, Данії і багатьох інших держав. На акваторії Світового океану найкраще вивченим є Атлантичний океан. За осередненими аномаліями за трапеціями $1^\circ \times 1^\circ$ у північній і центральній частинах океану майже немає невивчених областей. Гірше вивчена південна частина океану, особливо у самих південних широтах. Складені гравіметричні карти в трьох редуціях – аномаліях у вільному повітрі, Буге та ізостатичних.

В Індійському океані достатньо добре вивчені лише акваторії північної півкулі, у південній півкулі прокладені лише окремі гравіметричні маршрути. На акваторію Індійського океану складена гравіметрична карта масштабу 1:5 000 000 для геолого-геофізичного атласу Індійського океану. Також опублікована гравіметрична карта осереднених аномалій Буге за трапеціями $1^\circ \times 1^\circ$.

Гравіметрична вивченість Тихого океану істотно покращена за останні роки. Добре вивчена північна частина океану, де ще гірше вивчена центральна частина і тільки прокладені окремі маршрути надводних гравіметричних вимірювань у південних областях океану.

У Північно-Льодовитому океані гравіметричними зніманнями покрита значна частина прибережних районів і південна частина океану масштабу 1:1 000 000, враховуючи шельф Росії.

Суттєвим доповненням гравіметричної вивченості Світового океану, які отримані за безпосередніми морськими гравіметричними вимірюваннями, слугує інформація про гравітаційне поле з використанням даних супутникової альтиметрії. За такими спостереженнями визначені аномалії у вільному повітрі для трапецій $15' \times 15'$, отриманих у Міжнародному гравіметричному бюро за даними із ШСЗ «Seasat» і «Geos-3» для акваторій Світового океану, обмеженими паралелями 72° північної широти і 60° південної широти, а також з використанням геодезичних програм ШСЗ «Geosat» і «ERS-1».

У досупутниковий час гравітаційне поле було відомим з високою точністю тільки в деяких регіонах світу й отримане за допомогою наземних і на борту літаків вимірювань. У цей час детальність поля прискорення вільного падіння для потреб геодезії, геофізики і океанографії оцінюється величиною 1 мГал для гравіметричних аномалій, а відповідна точність висот геоїда (квазігеоїда) від 1 до 2 см. Отже, потреба в точному визначенні гравітаційного поля Землі є очевидною.

Сучасний стан гравіметричної вивченості України

Побудова нових гравіметричних мереж у різних країнах стало необхідними завдяки появі Міжнародної стандартної гравіметричної мережі (IGSN-71), підвищенні вимог до точності і надійності мереж, можливості використовувати нові абсолютні та відносні прилади, нові методики вимірювань, а також зростання інтересу до

моніторингу часових вимірювань прискорення вільного падіння тощо.

Державна гравіметрична мережа України є основою для виконання гравіметричних досліджень, які спрямовані на вивчення гравітаційного поля і зовнішньої фігури Землі та їхніх змін з плином часу, виконання інших наукових і народногосподарських завдань та метрологічного забезпечення гравіметричних знімань. Вона слугує єдиною гравіметричною системою на територію України. Високоточна державна гравіметрична мережа – це сукупність закріплених на місцевості системою гравіметрично пов'язаних між собою пунктів, у яких виконують абсолютні та відносні вимірювання прискорення вільного падіння, а також визначають висоти і координати цих пунктів. Її ділять на Державну фундаментальну гравіметричну мережу (ДФГМ) і Державну гравіметричну мережу I-го класу (ДГМ-1).

До початку 60-х років ХХ ст. в Україні існувало лише три маятникові пункти опорної гравіметричної мережі I класу, які були визначені Центральним науково-дослідним інститутом геодезії і картографії (ЦНДГІК) СРСР. Ці пункти перебували в підвальних приміщеннях фундаментальних будівель міст Полтава, Харків і Одеса.

Надалі в зв'язку з появою нових, точніших гравіметрів, упродовж 1965–1970 років Інститут фізики Землі АН СРСР на території СРСР побудував опорну гравіметричну мережу I класу, яка на території України, охоплювала вищезгадані пункти плюс опорний пункт в аеропорту «Жуляни» міста Київ. Мережа цих пунктів створена з використанням гравіметрів ГАГ-1 і ГАГ-2, зі застосуванням способу багатократних групових замкнутих полігонів, прив'язаних до маятникових пунктів, та мала прямі зв'язки з пунктом «Москва» (клас А) – головним опорним пунктом СРСР. Середня квадратична похибка передачі абсолютних значень прискорення сили тяжіння (ПСТ) на пунктах становила $\pm 0,035$ мГал [Двуліт, 2009, № 1, № 6].

Останній раз роботи зі створення в Україні Державної опорної гравіметричної мережі I класу (ДГМ-I класу) проводилось у 1979–1983 роках Підприємством № 7 Головного управління геодезії і картографії (ГУГК) СРСР.

Державна гравіметрична мережа України як складова гравіметричної мережі СРСР залучає до свого складу гравіметричні мережі I, II, III класів. Наявна гравіметрична мережа України I класу складається зі 17-ти основних пунктів, одного вихідного фундаментального гравіметричного національного пункту Полтава та 37-ми рядових пунктів. Вона не відповідає сучасним вимогам щодо точності й щільності пунктів. Упровадження в практику гравіметричних робіт абсолютних балістичних гравіметрів високої точності й супутникових технологій для визначення просторових геодезичних координат зумовлює необхідність модернізації мережі на новому рівні точності.

Наразі державна гравіметрична мережа I класу країни, створена ще за часів існування СРСР, оцінюється зі середньою квадратичною похибкою значення прискорення вільного падіння пунктів приблизно в 30 мГал. Прогнозована точність модернізованої мережі має підвищитися не менше ніж утричі, тоді вона слугуватиме основою для розвитку мереж нижчих класів і гравіметричних зніманих усіх масштабів. Зауважимо, що пункти державної гравіметричної мережі II класу не забезпечують за точністю обґрунтування гравіметричного знімання масштабу 1: 50 000 і більше. Останніми роками, у зв'язку з масовим запровадженням супутникових технологій визначення місцеположення географічних об'єктів місцевості, а особливо з розвитком методів GPS-нівелювання, які дають можливість визначати висоти над рівнем моря, виникла потреба побудови високоточної моделі поверхні квазігеоїда для всієї території України на базі достовірної й точної гравіметричної інформації. Для вирішення вказаних завдань точність вимірювання прискорення вільного падіння в будь-якій точці Землі має бути в межах 0,01–0,1 мГал щодо початкового світового гравіметричного рівня [Двуліт, 2009, № 1, № 6; Крюков і ін., 1998]. Як ми вже зазначали вище, для певної території України існує невідповідність гравіметричної мережі за якістю й щільністю пунктів, що не дає змогу в межах європейських проектів здійснити її у зв'язку з нівелірними мережами сусідніх країн, побудувати модель квазігеоїда сантиметрової точності. Тільки за умови поєднання високоточного гравіметричного вимірювання на базі зйомок масштабу 1:50 000 та більше з супутниковими геодезичними спостереженнями можна побудувати нову, інтегровану у світову, систему геодезичного забезпечення країни [Двуліт, Ентін, Кучер, 2010; Двуліт, Смелянець, 2013].

Висновки і подальший розвиток гравіметричних досліджень в Україні

- Найпоширенішими видами рухів у Всесвіті є рухи, що обумовлені силами тяжіння і силами обертання. Ці сили є визначальними і для нашої планети – Землі. Саме сили земного тяжіння, обертання Землі навколо своєї осі і навколо Сонця формували, формують і будуть формувати фігуру Землі.
- Визначення напрямку дії сили тяжіння зарховують до найдавніших вимірювань, а винайдений для цього пристрій – висок відносять до найдавніших засобів геодезичних і геофізичних вимірювань.
- У комплексі наук про Землю геодезія має займати одне із перших основоположних і поважних місць. А в сукупності геодезичних наук таке основоположне фундаментальне місце має займати гравіметрія.
- Гравіметрія – одна із основоположних, фундаментальних геодезичних дисциплін. Гравіметричні дослідження потрібно розвивати, бо їх результати завжди були, є і будуть потрібні

людству, поки існує планета Земля. Цей факт потрібно визнавати апіорі, а не з погляду екологічної чи комерційної доцільності.

- Необхідно вдосконалити проект модернізації гравіметричної системи України із врахуванням сучасних вимог та досвіду європейських країн. Модернізація Державної гравіметричної мережі України повинна проводитись у частині гравіметричних пунктів, що включені до Європейської гравіметричної мережі.

- Систематично виконувати абсолютні вимірювання прискорення вільного падіння сучасними балістичними високоточними гравіметрами на запроєктованих фундаментальних гравіметричних пунктах України.

- Розробити і затвердити окрему Державну програму виконання гравіметричної зйомки масштабу 1: 50 000 на всіх ще не охоплених зйомками детальності площах України.

- Використовувати гравіметричні визначення під час вивчення геодинамічних явищ, зумовлених дією сили тяжіння, обертанням Землі, техногенними процесами тощо.

- Побудувати моделі поверхні квазігеоїда України сантиметрової точності для ув'язки з нівелірними мережами сусідніх країн у межах європейських проектів.

- Вирішення сучасних картувальних і пошукових завдань у геології, розвиток методів GPS-нівелювання потребують точності вимірювання сили тяжіння в будь-якій точці Землі в межах 0,01–0,1 мГал стосовно початкового гравіметричного рівня.

- Для подальшого підвищення точності визначення параметрів геопотенціалу Землі слід активніше використовувати гравіметричний метод, адже точність сучасних балістичних гравіметрів становить 5 мГал.

- Для успішного інтегрування висотної основи України у світові та європейські проекти рекомендувати використовувати Амстердамський футшок як вихідний пункт, а також геопотенціальні числа на основі вимірних перевищень і значень прискорення вільного падіння між пунктами.

- Створити спеціальні гравіметричні обсерваторії для вивчення руху полюсів, припливних і неприпливних змін прискорення вільного падіння та інше.

- Створення декількох еталонних станцій визначення часових змін положення прямовисних ліній з високою точністю, використовуючи високоточні інструменти на рівні сучасної точності визначення положення полюсів Землі Міжнародною службою руху полюса.

Література

Бровар В. В. Роль гравітаційного поля в геодезії // Изв. Вузів, Геодезія і аерофото-съемка. – 1970. – Вып. 2. – С. 66–72.

- Бровар В. В. О возможности повышения точности гравиметрических выводов в геодезии // *Астроном. Журнал.* – 1971, Т. 48, № 6. – С. 1327–1332.
- Бровар Б. В. и др. *Гравиметрия и геодезия.* – М.: Мир, 1999. – 428 с.
- Бровар Б. В., Гусев Н. А., Юркина М. И. О развитии гравиметрических работ в интересах геодезии // *Геодезия и картография.* – 2005. – № 6. – С. 9–16.
- Двуліт П. Д. Гравіметрична мережа України: сучасний стан і перспективи розвитку // *Геодинаміка.* – 2009. – № 1. – С. 44–46.
- Двуліт П. Д., Кучер О. В. Основні напрями розвитку державної гравіметричної мережі України, *Вісник геодезії та картографії.* – К., 2009. – № 6. – С. 11–13.
- Двуліт П. Д., Ентін В. А., Кучер О. В. Розвиток державної гравіметричної мережі України як пріоритетна складова програм із проблем мінерально-сировинного забезпечення країни, *Мінеральні ресурси України // Науковий журнал.* – К.: Укр.ДГРІ, 2010. – № 2. – С. 5–6.
- Двуліт П. Д., Смелянець О. В. Завдання модернізації гравіметричної мережі України // *Вісник геодезії та картографії.* – К., 2013. – № 6. – С. 6–10.
- Торге В. *Гравиметрия.* – М.: Мир, 1999. – 428 с.
- Крюков О. М., Чинков В. М., Мірошніченко О. М., Сидоренко Г. С. Стан та перспективи гравіметричного дослідження території України // *Укр. Метрол. Журн.* – 1998. – Вип. 3. – С. 42–45.
- Biro P. *Time variations of height and gravity.* Ak. Kiado, Budapest, 1983.
- Hofmann – Wellenhof B., Moritz H. *Physical Geodesy,* Springer, Wien; New York, 2005, 403 p.
- Torge W. *Gravimetry,* W. de Gruyter. Berlin; New York, 1989.

П. Д. ДВУЛИТ

Кафедра высшей геодезии и астрономии, Национальный университет “Львовская политехника”, ул. С. Бандеры, 12, Украина, 79013, эл. почта: dvupet@ukr.net

МЕСТО ГЕОДЕЗИИ И ГРАВИМЕТРИИ В КОМПЛЕКСЕ НАУК О ЗЕМЛЕ

Цель публикации – роль и место геодезии и гравиметрии в комплексе наук о Земле и выработка рекомендаций относительно использования их в разных отраслях знаний естественных наук. **Постановка проблемы и их связь с важными научными и практическими задачами.** Рассматриваются некоторые вопросы современного состояния та перспективы развития геодезии и гравиметрии. Так, современная геодезия – естественная отрасль, которая включает несколько направлений: геодезия и топография, прикладная или инженерная геодезия, морская геодезия, космическая геодезия, высшая геодезия, физическая геодезия и другие. В задачу современной геодезии входит не только изучения физической поверхности и внешнего гравитационного поля Земли, а изучение эквипотенциальных поверхностей равного потенциала силы тяжести. Так, современное состояние развития геодезии характеризуется созданием единой государственной или мировой системы координат та параметров внешнего гравитационного поля Земли, а также новой системы нормальных высот и обновленной модернизированной гравиметрической системы. Поэтому возникла необходимость создания высокоточной гравиметрической информации в связи с внедрением спутниковых технологий при решении геодезических задач. Отмечается, что в мире современная геодезия бесспорно занимает статус наиболее фундаментальной, наиболее универсальной, наиболее точной и незаменимой отрасли науки, образования и производства в комплексе наук о Земле. Рассматривается краткая история возникновения и развития гравиметрических исследований в мире и на Украине. Развитие гравиметрии определялось техническими возможностями и научными задачами геодезии и геофизики, а задачей гравиметрии было определение параметров гравитационного поля Земли и других небесных тел как функция местоположения и времени за измерениями силы тяжести и гравитационных градиентов. Особенность развития гравиметрии за последние три столетия состоит в непрерывном расширении изучаемых территорий континентов и океанов, а при этом точность гравиметрических измерений все время увеличивается и достигло уровня 1 мкГал. Приводится анализ гравиметрической изученности Земли на основе наземных, морских и аэрогравиметрических измерений силы тяжести, а также используют данные спутниковой альтиметрии и градиентометрии. Детальность поля силы тяжести для нужд геодезии, геофизики, геологии и океанографии оценивается 1 мГал для гравиметрических аномалий, а точность высот квазигеоида 1–2 см. Приводится современное состояние гравиметрической изученности и отмечается при этом несоответствие гравиметрической сети относительно качества и плотности пунктов, рекомендуются перспективы построения новой интегрированной в мировую систему геодезического обеспечения государства.

Ключевые слова: сила тяжести, гравитационное поле Земли, гравиметрические аномалии, высоты квазигеоида, составляющие уклонений отвесных линий, гравиметрическая и геодезическая сеть, спутниковая альтиметрия и градиентометрия.

P. D. DVULIT

Department of Higher Geodesy and Astronomy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandera, 12 str., Lviv, Ukraine, 79013, el. mail: dvupet@ukr.net

THE PLACE OF GEODESY AND GRAVIMETRY IN THE COMPLEX EARTH SCIENCES

The aim of this article is the role and place of geodesy and gravimetry in the complex Earth Sciences and making recommendations for their using in various fields of knowledge of science. **Problem and its relation with important scientific and practical tasks.** In the article we consider some issues of the current state and prospects of geodesy and gravimetry. So modern geodesy – natural branch, which includes several areas: geodesy and topography, applied engineering or surveying, marine surveying, space geodesy, higher geodesy and physical geodesy and others. The task of modern geodesy is not only the study of the physical surface and external gravitational field of the Earth, but also the study of equipotential surfaces of equal gravity potential. The current state of geodesy is characterized by the creation of a unified state or global coordinate system and parameters of the external Earth's gravitational field, and a new system of normal heights and updated modernized gravimetric system. Because of that the need for a high-precision gravimetric information has increased in connection with the widespread introduction of satellite technology for solving geodetic problems. It is emphasized that modern geodesy conclusively has won the status of the most fundamental, most versatile, most accurate and essential area of science education and production in complex of the Earth sciences. In the article we also considered the short history of appearance and development the gravimetric studies in the world and in Ukraine. Development of gravimetry is defined by technical capabilities and scientific tasks of geodesy and geophysics, and the gravimetry task is to determine the parameters of the Earth gravitational field and other celestial bodies as a function of location and time using measurements of gravity and gravity gradient. Feature of gravity development during the last three centuries is the continuous extension of the studied areas of continents and oceans, and thus precision of gravimetric measurements kept increasing and reached to the level of one microGal. We make analysis of Earth gravimetric study based on land and sea measuring of gravity using data of satellite altimetry and gradiometry. The detail of gravity field for the needs of geodesy, geophysics, geology and oceanography is estimated nearly 1 mGal for gravity anomalies and the accuracy of the quasigeoid heights is nearly 1 – 2 cm. We adjusted the current state of gravimetric knowledge on Ukraine area and noted the discrepancy of gravimetric network by quality and density of points and prospect of construction the new country integrated into the global system of geodetic providing.

Key words: gravity, the Earth gravitational field, gravity anomalies, normal heights, quasigeoid heights, deviations of plumb lines, gravimetric and geodetic networks, satellite altimetry and gradiometry.

REFERENCES

- Brovar V. V. *Rol' gravitacionnogo polja v geodezii* [The role of the gravitational field in geodesy]. *Izv. Vuzov, Geodezija i ajerofotos'mka* [Geodesy and aerial photography]. 1970, issue 2, pp. 66–72.
- Brovar V. V. *O vozmozhnosti povyshenija tochnosti gravimetricheskikh vyvodov v geodezii*. *Astronom. Zhurnal*, 1971, Vol. 48, No. 6, pp. 1327–1332.
- Brovar B. V. i drugie. *Gravimetrija i geodezija* [Gravimetry and geodesy], Moscow. Mir, 1999, 428 p.
- Brovar B. V., Gusev N. A., Jurkina M. I. *O razvitii gravimetricheskikh rabot v interesah geodezii Geodezija i kartografija* [Geodesy and Cartography]. 2005, No. 6, pp. 9–16.
- Dvulit P. D. *Hravimetrychna merezha Ukrayiny: suchasnyy stan i perspektyvy rozvytku* [Gravimetric Ukraine Network: current state and prospects of development]. *Geodynamics*, 2009, No. 1, pp.44–46.
- Dvulit P. D., Kucher O. V. *Osnovni napryamy rozvytku derzhavnoyi hravimetrychnoyi merezhi Ukrayiny* [The main development directions of the state gravimetric network in Ukraine] *Visnyk heodeziyi ta kartografiji* [Journal of Geodesy and Cartography]. Kyiv, 2009, No. 6, pp. 11–13.
- Dvulit P. D., Entin V. A., Kucher O. V. *Rozvytok derzhavnoyi hravimetrychnoyi merezhi Ukrayiny yak priorytetna skladova prohram iz problem mineral'no-syrovynnoho zabezpechennya krayiny* [The development of the state gravimetric network in Ukraine as a priority component of the problems of the mineral resource providing country]. *Mineral'ni resursy Ukrayiny* [Ukraine Mineral Resources], Kyiv, *Ukr.DHRI*, 2010, No. 2, pp. 5–6.
- Dvulit P. D., Smelyanets' O. V. *Zavdannya modernizatsiyi hravimetrychnoyi merezhi Ukrayiny* [The task of modernization of Ukraine gravimetric network] *Visnyk heodeziyi ta kartografiji* [Journal of Geodesy and Cartography] Kyiv, 2013, No. 6, pp. 6–10.
- Vol'fhanh Torhe Hravymetryya, Moscow, *Myr*, 1999, 428 p.
- Kryukov O. M., Chynkov V. M., Miroshnychenko O. M., Sydorenko H. S. *Stan ta perspektyvy hravimetrychnoho doslidzhennya terytoriyi Ukrayiny* [Status and prospects of gravimetric research in Ukraine]. *Ukr. Metrol. Zhurn.*, 1998, issue 3, pp. 42–45.
- Biro P. *Time variations of height and gravity*. Ak. Kiado, Budapest, 1983.
- Hofmann – Wellenhof B., Moritz H. *Physical Geodesy*, Springer, Wien; New York, 2005, 403 p.
- Torge W. *Gravimetry*, W. de Gruyter. Berlin; New York, 1989.

Надійшла 10.05.2016 р.