

## СПЕЦІАЛЬНІ ГЕОДЕЗИЧНІ МЕРЕЖІ В ЕКОЛОГІЧНОМУ МОНІТОРИНГУ

Фінін Г.С., Шевченко Р.Ю.

Державна екологічна академія післядипломної освіти та управління  
вул. Митрополита Василя Липківського, 35, корп. 2, 03035, м. Київ  
azimut90@ukr.net

Геодезична мережа є планово-висотним каркасом, на якому конструюється картографічна основа будь-якої геоінформаційної моделі. В системі екологічного моніторингу топографо-геодезичні знімання не мали до теперішнього часу переважаче застосування. Наслідком цього є неточність передачі важливої геопросторової інформації в оболонку експертних геоінформаційних систем. Розглянута еволюція геометричних побудов для потреб природоохоронної сфери. Розроблена геометрична модель спеціальної геодезичної мережі, що апробується для потреб локального (місцевого) екологічного моніторингу за станом навколишнього природного середовища. Графічний складник моделі вміщує основні координатні лінії топоцентричної системи координат, що визначена основною в процесі застосування спеціалізованого модуля картографічної проєкції потенційно-небезпечних об'єктів із шару земного еліпсоїду обертання на Гауссову площину. Уперше модель спеціальної геодезичної мережі відображає гібридні підходи астрономо-геодезичних та супутникових методів визначення координат. Зазначається, що високва лінія та нормаль до двох основних геодезичних датумів: геоїда та еліпсоїда під час розрахунку поправок значно поліпшує точність математичної обробки супутникових вимірювань екологічного моніторингу. Представлений математичний апарат корекції значень супутникових геодезичних «сірих» даних під впливом електромагнітного та гравіметричного полів. До моделі включені сегменти девіаційного складника навігаційної корекції супутникового сигналу, прецесії та нутації орт геоцентричної системи координат, значення рівневих координатних поверхонь. Зазначена роль сучасних Gadget-геодезичних технологій для підвищення точності визначення координат, рентабельності мобільних геодезичних знімань, надійності девайсових додатків для потреб збору геоінформації в режимі оналайн. Описаний результат апробації зазначеного методу для потреб еколого-природоохоронного геоінформаційного картографування довкілля-простору. Визначена перспектива запровадження віртуальних геодезичних мереж у роботі геointелектуальних експертних систем прийняття екологічних рішень. *Ключові слова:* геодезична мережа, астрономо-геодезичні вимірювання, топологічна схема геодезичної основи, Android-додатки, геодезичні координати, геодезичні датуми.

### Special Geodetic Networks in environmental monitoring. Finin G., Shevchenko R.

The geodetic network is a plan-height framework on which the cartographic basis of any geoinformation model is constructed. In the system of ecological monitoring topographic and geodetic surveys have not had a predominant application so far. The consequence of this is the inaccuracy of the transfer of important geospatial information into the shell of expert geographic information systems. The evolution of geometric constructions for the needs of the nature protection sphere is considered. A geometric model of a special geodetic network has been developed, which is being tested for the needs of local ecological monitoring of the state of the environment. The graphical component of the model includes the main coordinate lines of the topocentric coordinate system, which is defined as the main in the process of applying a specialized module of cartographic projection of potentially dangerous objects from the layer of the Earth's ellipsoid of rotation on the Gauss plane. For the first time, the model of a special geodetic network is a hybrid approach of astronomical-geodetic and satellite methods of determining coordinates. It is noted that the reference line and the normal to the two main geodetic dates: geoid and ellipsoid with the correct calculation of corrections significantly improves the accuracy and result of mathematical processing of satellite measurements in environmental monitoring. The mathematical apparatus of correction of values of satellite geodetic "gray" data under the influence of electromagnetic and gravimetric fields is presented. The formula includes segments of the deviation component of the navigation correction of the satellite signal, precession and nutation of the ort of the geocentric coordinate system, the values of the level coordinate surfaces. The role of modern Gadget-geodetic technologies for increasing the accuracy of coordinates, reducing the cost and profitability of mobile geodetic surveys, the reliability of development applications for the needs of collecting geoinformation online. The result of approbation of the specified method for needs of ecological and nature protection geoinformation mapping of environment – space is described. The prospect of introduction of virtual geodetic networks in the work of geointelligent expert systems of ecological decision – making is indicated. *Key words:* geodetic network, astronomer-geodetic measurements, topological scheme of geodetic basis, Android-applications, geodetic coordinates, geodetic dates.

**Постановка проблеми.** Планово-висотна мережа є сукупністю геометричних параметрів території, що картографується. В залежності від масштабу реалізації екологічного моніторингу запроваджуються різні параметричні моделі реляційної основи прив'язки природних та техногенних об'єктів. Це насамперед GNSS-мережа космічної триангуляції, астрономо-геодезична мережа I класу, триангуляція II-IV класу, полігонометрія I-IV класу 1-2-их розрядів підвищеної точ-

ності. Для потреб дослідження екологічних параметрів об'єктів промислових майданчиків застосовується трилатерація та латерангуляція, які представляють собою планові та просторові побудови геометричних фігур різної складності під час виносу в натуру, особливостей їх демаркації та делімітації у вигляді сучасних центрів та знаків геодезичної мережі.

У системі екологічного моніторингу раціональний вибір конструкції геодезичної мережі впливає

на розробку спеціалізованого алгоритму математичної обробки результатів геодезичних вимірювань. Її результати використовуються під час проектування місцевої планово-картографічної основи геоінформаційного моделювання проблемних природоохоронних територій.

До теперішнього часу рекогносцивальні топографо-геодезичні партії не забезпечені математично обґрунтованим алгоритмом вибору системи геодезичних датумів на трансформовані ландшафтні територіальні комплекси, що зазнають нищівного антропогенного впливу. Не вирішена проблема маніпуляції вихідними даними місцевих систем координат без прив'язки до загальнопланетарної та державної геодезичної мережі.

**Актуальність дослідження.** Реалізація екологічного моніторингу у будь-якому масштабному вишукуванні потребує оновлення геодезичних датумів або запровадження місцевої картографічної основи локальної системи координат. Сучасні екологічні звіти здебільшого позбавлені координатної прив'язки джерел забруднення, подаючи лише адресне згадування проблемних територій чи небезпечних об'єктів. Важливим залишається складання карток-прив'язок реперів обсерваційних досліджень до державної геодезичної мережі. Геодезична мережа своєю чергою має властивість втрачати значну кількість наземних та цокольних центрів та надцентрових надбудов, особливо у урбанізованих ландшафтах. У природних зонах зазвичай вони зберігаються, але з часом зміщуються під впливом екзогенних та ендегенних процесів.

Таким чином, актуальним стає розробка проекту формування віртуальних геодезичних центрів, яким не загрожують зовнішні патогенні фактори їх втрати. Перманентне їх технологічне функціонування є запорукою точності реалізації моніторингових досліджень та прецизійного еколого-геоінформаційного картографування.

**Зв'язок авторського доробку із важливими науковими та практичними завданнями.** Екологічний моніторинг, як комплексне дослідження геосфери та її складових фацій-одиниць – екотонів, урочищ, біогеоценозів, природних та антропогенних ландшафтів, неможливо реалізувати без застосування високоточних астрономо-геодезичних (аерокосмічних) даних для забезпечення координатної прив'язки в картоінформаційних системах.

У Державній екологічній академії післядипломної освіти та управління розробляється проект створення центру аерокосмічних екологічних досліджень. Одним із пріоритетних наукових досліджень стане астрономо-геодезичне забезпечення інноваційно-інструментарію (Android-додатків) реалізації еколого-природоохоронних досліджень.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання еволюції державної геодезичної мережі, її трансформація, прийоми та методи математичної

обробки геодезичних вимірювань досліджувалися Ю.О. Карпінським (вдосконалений метод скінченних елементів у дослідженні накопичення систематичних похибок у триангуляційних вимірюваннях) [2], Б.І. Волосецьким (запровадження тахеометричних ходів при великомасштабному геодезичному зніманні у природокористуванні, виробітках корисних копалин) [1]. Вацлав Ласка – геодезист, геофізик, сейсмолог, очолював наукову школу сферичної астрономії та вищої геодезії у Львівській політехніці. У листопаді 1895 р. створив експериментальний полігон астрономо-геодезичних вимірювань для еколого-метеорологічних досліджень у Галичині. Ним запроваджена система лінійно-кутових засічок у моніторингу еолових процесів [4].

**Виділення не вирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячується означена стаття.** Малодослідженими залишаються технічні аспекти фізико-географічного впливу на координати центрів геодезичних мереж, еволюція геометрії планово-висотної основи, технічні аспекти використання відповідних побудов на суходолі, водній поверхні, підземному та навколосемному просторах, архітектурно-конструктивні особливості будови геодезичних надцентрових знаків, прикладне залучення сегментів геодезичної мережі у промислового туризмі.

**Новизна.** Представлена геометрична модель трансформованої системи астрономо-геодезичної координатної системи для потреб реалізації обсерваційного екологічного моніторингу та картографування довкілля-простору. Удосконалений математичний апарат обробки даних супутникових геодезичних координувань за допомогою Gadget-інструментарію.

**Методологічне або загальнонаукове значення.** Астрономо-геодезія, як фундаментальна технічна дисципліна, розвивається надзвичайно бурхливо під впливом сучасних цифрових технологій топографічних зйомок місцевості. Насамперед це стосується широким застосуванням Android (Smart) та iOS-геодезичних додатків в системі екологічного моніторингу.

Успішне випробування технічних характеристик Gadget-систем в геодезичному забезпеченні еколого-природоохоронних досліджень, що висвітлено в роботі, закладає підмурок до формулювання геоматичної парадигми методології обсерваційного моніторингу довкілля-простору.

**Виклад основного матеріалу.** Геодезичні мережі відіграють значну роль під час проектування та реалізації програм екологічного моніторингу. Відповідно до своєї класифікації вони відповідають специфіці тематичних природоохоронних завдань, на які покладають моніторингові рекогносцивальні вишукування потенційно небезпечних природно-техногенних об'єктів або явищ. Завдання розвитку та згущення геодезичних мереж є державною справою національної безпеки.

Екологічний моніторинг розповсюджується на всі просторові об'єкти природно-територіальних та промислово-техногенних систем. Основною геометричною одиницею визначення планово-висотного положення при високоточному координуванні є нормаль. Сучасна цифрова геодезія визначає нормаль, як головну (центральну) координатну лінію при локалізації геопросторових об'єктів на земній поверхні, а також у Близньому Космосі. За положенням нормалі до земного еліпсоїда обертання постає можливість визначення аномалії сили тяжіння та моніторинг за сталими гравіметричного поля планети. Також за відхиленнями прямовисних (вискових) ліній проєктуються карти аномалії тяжіння у гірських районах великих зон складчатості. За відповідними параметрами астрономо-геодезичного та астрономо-гравіметричного нівелювання укладається прогноз коливань земної поверхні, а також вертикальних та горизонтальних рухів земної кори.

Розроблена геометрична схема розпланування локальної (місцевої) геодезичної мережі та її властивості функціонування в екологічному моніторингу (рис. 1).

Позначені наступні компоненти системи:

$OXYZ$  – система прямокутних топоцентричних систем координат, де  $Z$  – zenітальна апліката без надірної напіввісі,  $X$  – горизонтальна абсциса,  $Y$  – широтно-довготна ордината,  $O$  – пункт обсерваційного спостереження. Система координат описує одиничну армілярну (астрономічну) сферу радіусом  $r$ , що представлена земним еліпсоїдом обертання;

лінія  $x'-x''$  – середня поверхня рівневого гравіметричного потенціалу (середній рівень спокійної морської поверхні або спокійний стан водної поверхні);  
 $N - N'$  – ондуляції на фізичній поверхні баричної топографії;

$W''$  – горизонтальна рівнокутна (конформна) проєкція місцевості;

$w$  – нормаль до земного еліпсоїда обертання;

$v$  – вискова лінія, що перпендикулярна до фізичної (денної) поверхні;

$c'$  – відхилення прямовисної лінії від нормалі до фізичної поверхні;

$c$  – азимут обертання (прецесії) вискової лінії навколо нормалі до земної поверхні;

$c''$  – азимут коливання (прецесії) нормалі навколо надірної лінії системи координат  $OXYZ$ ;

$R_w$  – середній радіус орбіти сузір'я навігаційних супутників  $GNSS - 1 \dots 4$ ;

$r^{*...****}$  – радіус-вектори руху супутників;

$r'$  – астронометрична відстань до одиничної навігаційної зірки або космічного джерела магнітота радіовипромінювання чи астеризмів;

$Q-21487$  – кодова інтерпретація навігаційного небесного тіла;

$1 \dots 7$  – пункти місцевої державної геодезичної мережі.

Безумовно, що метод спостереження небесних тіл для потреб навігації та орієнтування під час екологічного моніторингу на пунктах Лапласа астрономо-геодезичної мережі є застарілим і може використовуватися лише як демонстраційний при-

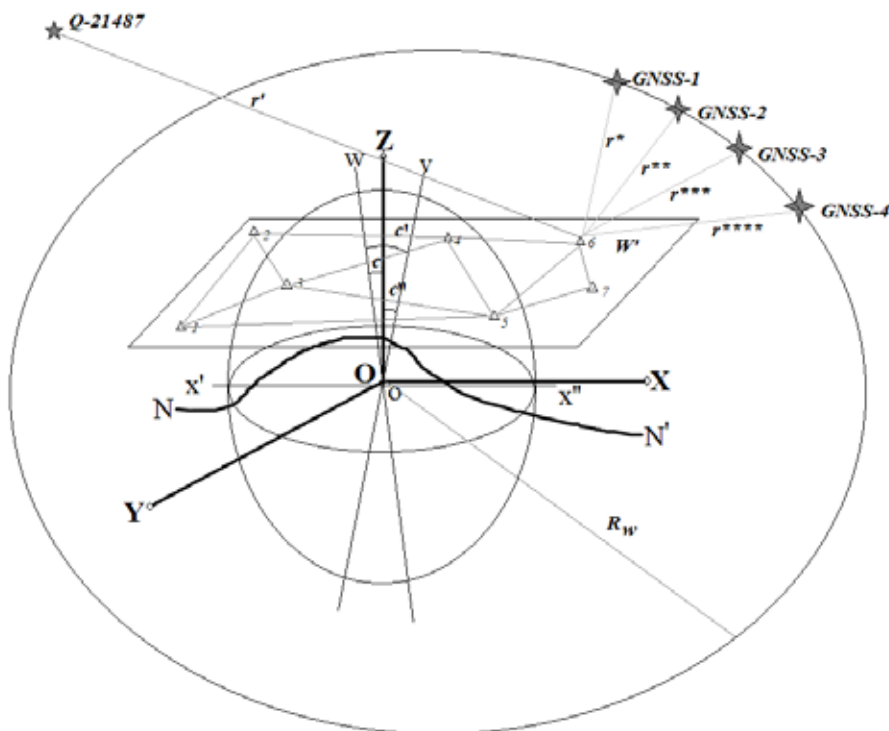


Рис. 1. Геометричний каркас геодезичної мережі для потреб екологічного моніторингу

йом визначення координат місцевості. Зараз застосовуються виключно супутникові методи, але математичні співвідношення обробки результатів знімань за допомогою Gadget-систем є подібними до оптичних геодезичних спостережень із додаванням показників радіоелектронної затримки сигналів від навігаційних супутників. Це відображується у розрахунку значень складників системи прямокутних топоцентричних систем координат  $OXYZ$  з урахуванням похибки за іоносферну затримку сигналу від GPS-супутника [3]:

$$\begin{aligned} X &= \frac{R}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} \cos B \cos L, \\ Y &= \frac{R}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} \cos B \sin L, \\ Z &= \frac{R}{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}} (1-e^2) \sin B, \end{aligned} \quad (1)$$

де,  $R = 6378$  км (середній радіус Землі),  $B$  – геодезична широта місця спостереження,  $L$  – геодезична довгота спостереження,  $\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}$  – значення першого ексцентриситету земного еліпсоїда,  $e$  – коефіцієнт ексцентриситету, що залежить від широти спостереження GPS-супутника або навігаційної зірки.

Дійсне значення просторових координат точки обчислюється за формулами:

$$\begin{aligned} X &= \sqrt{\frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}{r_1} + c} \\ Y &= \sqrt{\frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}{r_2} + c'}, \\ Z &= \sqrt{\frac{\sqrt{1-e^2 \sin^2 B}}{r_3} + c''} \end{aligned} \quad (2)$$

де  $r_{1...3}$  – радіус-вектор до орбіти навігаційного супутника,  $c$  – гравіметрична девіація прецесії (обирається із навігаційних таблиць),  $c'$  – значення відхилення прямої лінії від нормалі до візичної поверхні,  $c''$  – значення азимуту коливання (прецесії) нормалі навколо надірної лінії системи координат  $OXYZ$ . Деякі із відповідних показників знаходять у технічних супортах до роботи Gadget-геодезичних додатків.

Відповідні складники формул (1 і 2) можуть змінюватися від широти спостереження, висоти обсервації над рівнем моря, сили електромагнітного випромінювання навколо енергетичних установок та реакторів.

Розглянемо приклад розрахунку перетворення геодезичних координат, отриманих з даних матеріалів польової геодезичної експедиції (одночасна робота із астрономічним універсалом та GPS-станцією), до значень параметрів, які конформно підходять до проєктованої у камеральних умовах планової картографічної основи екологічної цифрової карти. Фактично це співвідношення між геопросторовими прямокутними (декартовими)  $X, Y, Z$  та геоцентричними координатами:  $\Phi$  – геоцентрична

широта,  $L$  – геоцентрична довгота, що виражається наступним чином:

$$\begin{aligned} X &= R \cos L, \\ Y &= R \sin L, \\ Z &= z. \end{aligned} \quad (3)$$

Запровадимо наступну математичну залежність між геопросторовими координатами, геоцентричними та радіусом-вектором на GPS-супутник або навігаційну зірку [3]:

$$\begin{aligned} X &= r_e \cos \Phi \cos L, \\ Y &= r_e \cos \Phi \sin L, \\ Z &= z \sin \Phi. \end{aligned} \quad (4)$$

Радіус-вектор еліпсоїда  $r_e$  визначається із наступного виразу:

$$r_e = \left( \frac{\cos^2 \Phi}{a^2} + \frac{\sin^2 \Phi}{b^2} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (5)$$

де  $a$  – екваторіальна та  $b$  – полярна піввісь земного еліпсоїда.

Обернені залежності на основі (4) будуть мають вигляд трансформованих значень геоцентричних координат:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} L &= \frac{Y}{X}, \\ \operatorname{tg} \Phi &= \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}}. \end{aligned} \quad (6)$$

Між просторовими прямокутними координатами  $X, Y, Z$ , приведеною широтою  $u$  та геодезичною довготою  $L$  існують наступні залежності, які визначають кутові співвідношення ексцентриситету земного еліпсоїда, кутових значень ліній орієнтування та гравіметричного показника девіації  $c$ :

$$\begin{aligned} X &= a \cos u \cos L, \\ Y &= a \cos u \sin L, \\ Z &= a \sqrt{1-e^2} \sin u. \end{aligned} \quad (7)$$

Обернені залежності на основі (6) закладаються в програму модулів геоінформаційного картографування і мають наступний вигляд [3]:

$$\begin{aligned} \operatorname{tg} L &= \frac{Y}{X}, \\ \operatorname{tg} u &= \frac{Z \sqrt{1-e^2}}{\sqrt{X^2 + Y^2}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Геодезична мережа, як загальнодержавного, так і локального значення, закріплюється на місцевості геодезичними знаками. До останнього часу це були піраміди, сигнали, тури, репери, пікети тощо. На цей час при розвитку віртуальних (дистанційних) технологій топографічного знімання відповідні конструктивні надбудови стали частиною історії геодезичної науки. Із вересня 2020 р. застосовується віртуальна мережа системи геодезичних знаків планово-висотної мережі. Це забезпечується використанням координованих пікетів, які закладені у роботу операційної системи геоінформаційного моделювання геометричного каркасу геодезичної мережі. Немає потреби у складанні карток-прив'язки (кроків геоде-

зичного пункту), механічного вишукування на місцевості та відновлення другого підцентрового знаку.

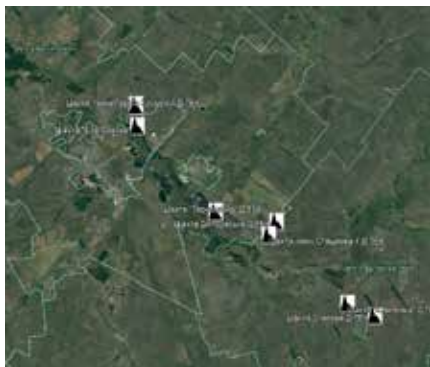


Рис. 2. Фрагмент інтерактивної карти «Розміщення шахт Д.ТЕК» (із позначенням умовного знаку «Шахта») у середовищі геопорталу Google Earth

Gadget-система автоматизованого геоінформаційного геодезичного знімання повністю забезпечує цей процес і перетворює його на звичайне накопичення геоданих у різних інформаційно-систематологічних архітектурних банках даних. Це полегшує інженерний процес топографо-геодезичної зйомки та робить будь-яку знімальну сесію рентабельною.

Технологія цифрової геодезії XXI ст. ґрунтується на Gadget-системах портативного визначення координат місцевості для реалізації прикладних програм у галузі екологічного моніторингу, природоохоронній справі, картографічного забезпеченню еколого-туристичної та рекреаційно-екскурсійної діяльності.

У процесі реалізації вищевикладеного методу на кафедрі екологічного моніторингу та геоінформаційних технологій Державної екологічної академії післядипломної освіти та управління, апробована Gadget-технологія дистанційного геодезичного знімання під час укладання геопорталу критичної шахтної інфраструктури вуглевидобувної галузі. Розроблена загально-топографічна карта Ічнянського національного природного парку. Геодезичні знаки історичної Дуги Струве включені до еколого-туристичних маршрутів НПП «Кременецькі гори».

**Головні висновки.** Еволюція розпланування астрономо-геодезичних мереж пройшла через всі технологічні епохи розвитку інструментарію геодезії: від перших реперних знаків – копців, вікових та тимчасових реперів, ординарів, футштоків, які визначають метричні параметри трансформації навколишнього природного середовища до віртуальних геоінформаційних мереж дистанційного Gadget-топографічного знімання. Такі мережі є достатньо низьковартісними, надвисокоточними та оперативними системами онлайн-моделювання довкілля, діджиталізації параметрів навколишнього природного середовища.

**Перспективи використання результатів дослідження.** Новітні космічні віртуальні геодезичні мережі знімання є основою проектування загальнопланетарної геоінтелектуальної системи візуалізації цифрової реальності довкілля-простору. Вони стають наступним еволюційним етапом розвитку геоінформаційних систем, картоінформаційних технологій моніторингу та прогнозу оточуючого світу.

#### Література

1. Волосецький Б.І. Геодезія у природокористуванні. Навч. посібн. Львів. 2012. 292 с.
2. Карпінський Ю.О. Скінченноелементні моделі геодезичних вимірів. Київ, 2001. 399 с.
3. Савчук С.Г. Вища геодезія. Підручник. Львів. 2005. 147 с.
4. Iaska W. Astronomia sferyczna i geodezja wyzsza. Lvov. 1898. 419 s.