

УДК 004.9:528.9

**ДОНЧЕНКО М.В., РЯБЕНЬКИЙ О.О.**, Миколаївський державний гуманітарний університет ім. П. Могили

**Донченко Михайло Васильович** – к.т.н., доцент кафедри інформаційних технологій Миколаївського державного гуманітарного університету ім. П. Могили

**Рябенький Олег Олегович** – аспірант кафедри інформаційних технологій Миколаївського державного гуманітарного університету ім. П. Могили

## **ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ПРЕДСТАВЛЕННЯ КАРТОГРАФІЧНИХ ДАНИХ ШЛЯХОМ ПЕРЕХОДУ ДО ЕЛІПСОЇДАЛЬНИХ ЕЛЕКТРОННИХ КАРТ**

*Стаття присвячена опису методики створення універсальної картографічної моделі, яка б звела всі картографічні похибки до мінімуму.*

*У статті описані недоліки існуючих плоскісних електронних та паперових карт та наведені переваги переходу на еліпсоїдальні карти з географічною системою координат. Наведені методики переходу від плоскісних до еліпсоїдальних карт дозволяють створювати нові точні карти на базі існуючих картографічних даних. В статті наведено базовий опис системи GeoModel, в якій і реалізована модель картографічного еліпсоїда.*

*Стаття є актуальнюю на даний час, оскільки вона демонструє новий підхід до підвищення точності карт в області картографії та геоінформаційних систем.*

*Article “Increasing of representation’s accuracy of cartographical data due to the transition to the ellipsoidal electronic maps” is devoted to the description of principles of universal cartographic model creation, which reduces all cartographic errors to minimum.*

*In article is described inaccuracy of existent electronical and paper plain maps and listed advantages of transition to the ellipsoidal maps with geographical coordinate system. Given principles of conversion from plain maps into ellipsoidal maps let to create new accurate maps on the base of existent cartographic data. In article is adduced a base description of GeoModel system, which is realizing a model of cartographic ellipsoid.*

*An article is actual nowadays. It demonstrates a new point of view of increasing of maps’ accuracy in the fields of cartography and geoinformation systems.*

### **Вступ**

За весь час існування людства ішли пошуки носія концентрованої просторово-атрибутивної інформації. Спочатку це були схематично-топологічні малюнки місцевості, відносно невеликих ділянок місцевості. З часом їх почали називати географічними картами. З часом якість, точність карт, їх відповідність оригіналу зростали, зростав і рівень технологій, які при цьому використовувалися. Але вимоги до карт зростали швидше і завжди випереджали можливості свого часу.

У наш час ми маємо достатньо широкий вибір різних типів паперових карт з різним рівнем відповідності оригіналу (розміри, форма, кути) та різної точності, яку можна було отримати на паперових носіях. З’явився новий рівень технологій: електронна картографія

і геоінформаційні системи. Нові технології значно підвищили можливості електронних карт з точки зору точності і з інформаційного вмісту карти. Але залишилася головна проблема, яка і вносить головну неточність при створенні карт, в тому числі, і сучасних електронних – це спотворення при виконанні проектування на плоску основу з поверхні земної кулі, яка має форму близьку до еліпсоїда обертання. На практиці використовують більше тридцяти картографічних проекцій, які дають хороші результати і широко використовуються в світовій практиці. При цьому досягається також певне локальне зменшення спотворення на нешироких смужках відображення земної поверхні. Так, наприклад, використовуючи проекцію UTM, яка є фактично поперечною січною проекцією Меркатора шириною  $6^{\circ}$  ми отримуємо похибку масштабу не більше 0,1%. Найбільше спотворення ми отримуємо на межі сусідніх зон. Для багатьох практичних задач сучасні карти дають достатню точність. Але життя висуває нові задачі, які висувають підвищені вимоги до точності, зручності, адекватності, інформаційності картографічного матеріалу, особливо для задач навігації, наукових досліджень, моделювання та геоінформаційних систем.

Необхідність створення універсальної карти, яка б зводила всі похибки і спотворення до мінімуму стає все більше і більше очевидною. Крім того універсальна карта повинна бути активним елементом для користувача і надавати не тільки повну та точну інформацію про картографічні дані, але й надавати у розпорядження користувачу ряд нових, сучасних і потужних інструментів для вирішення географічних, геодезичних, гідрографічних, навігаційних та інших задач. Створити таку універсальну карту можна тільки на базі сучасних інформаційних технологій, використовувати всі їх переваги і відповідати вимогам (точність, інформативність, простота модифікації, ...), які постають при використанні сучасних інформаційних та технічних систем. Сучасні комп'ютерні технології дозволяють повернутися до форми матінки Землі і розглядати нову електронну карту як фрагмент електронного глобуса. В якості моделі Земної Кулі можна використати відповідний еліпсоїд. Найбільш повно підходить еліпсоїд WGS-84 і на ньому і створювати електронну еліпсоїdalну карту. Далі можна моделювати реальну модель Землі у формі геоїда.

Поставлена задача є достатньо складною, але реальною. Вона тягне за собою цілу низку проблем, але отриманий результат перекриє всі витрати.

### **Переваги переходу на еліпсоїdalні електронні карти**

Розвиток комп'ютерних технологій та систем автоматизованого проектування в області геоінформаційних систем дозволяють по іншому підійти до створення електронних карт та відображення інформації на електронних картах. Якщо виконати переход до еліпсоїdalних електронних карт, які базуються на певному еліпсоїді і як результат залежать від відповідної системи супутникового позиціонування, то отримаємо просторову картографічну поверхню. Дано поверхня буде мати:

- мінімальне спотворення кутів;
- мінімальне спотворення довжини і площини;
- чітке і однозначне використання географічних координат;
- мінімальне спотворення форми.

За останні роки данні супутниковых зйомок надали геодезистам нові можливості для точного визначення еліпсоїда, який найкращим чином описує форму Землі і який співвідносить центр координат системи відліку з центром маси Землі. Найбільш придатним для опису Землі є еліпсоїд WGS-84. Він має геоцентричний Датум і він максимально точно описує всю поверхню Землі. Враховуючи те, що більшість геоінформаційних систем використовують систему супутникового позиціонування

NAVSTAR на базі еліпсоїда WGS-84, то саме еліпсоїд WGS-84 і необхідно використовувати для побудови максимально точних еліпсоїдальних карт, особливо навігаційних для забезпечення максимально точного позиціонування транспортних засобів.

Глобальна супутникова система NAVSTAR дозволяє отримувати координати будь-якої точки на поверхні Землі з достатньою точністю (до 0,1 м і менше) та нанести її на еліпсоїдальну карту. В результаті побудована карта буде точно відображати реальне положення об'єктів на поверхні Землі (без врахування висоти об'єктів відносно прийнятого еліпсоїду). Це відразу надає значні переваги у порівнянні з існуючими плоскими електронними та паперовими картами, побудованими з використанням тих чи інших проекцій. До цих переваг можна віднести:

- можливість отримати реальні розміри об'єктів та їх положення;
- відсутність похибок кутів та відстаней;
- коректне відображення площини та форми об'єктів;
- використання географічних координат в кутовому вимірі, а не в лінійному представленні через математичні перерахунки.

Перехід до тривимірних еліпсоїдальних електронних карт необхідний не тільки для підвищення точності представлення картографічних даних, а й для значного підвищення точності позиціонування транспортних засобів. Оскільки сучасні транспортні засоби переважно використовують системи супутникового позиціонування WGS-84 та плоскіні (градусних та лінійних) електронні та паперові карти, які, за визначенням, не можуть бути без спотворення, можна зробити висновок, що єдиним реальним шляхом підвищення точності є перехід на використання еліпсоїдальної електронної карти. Використання якої дозволить підвищити точність за рахунок:

- відмови від математичних перерахунків координат (з географічних в лінійні і навпаки), що вносять певні незручності і похибки;
- відмови від картографічних проекцій;
- відмови від використання різних еліпсоїдів;
- використання єдиного картографічного еліпсоїду WGS-84;
- перехід до географічних координат.

Виконуючи всі дані умови можна звести похибку позиціонування транспортних засобів на електронній еліпсоїдальній карті до нуля (з врахуванням факту постійності похибки отримання координат від системи супутникового позиціонування).

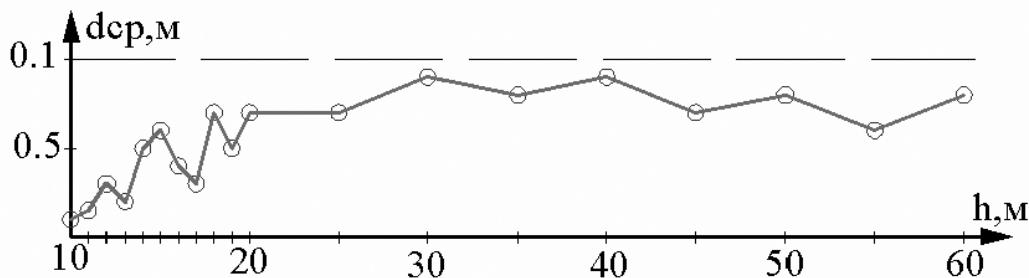
### Врахування висоти на еліпсоїдальних електронних картах

При отриманні координат від системи супутникового позиціювання як один із параметрів отримується висота об'єкта, яка вносить певні похибки в розрахунок його координат, а значить і в еліпсоїдальну карту. Висота об'єкта розраховується як перевищення шуканої точки над еліпсоїдом WGS-84. Вважаючи, що супутники рухаються еліптичними орбітами навколо Землі і координати шуканого пункту розраховуються тріангуляційними методами за даними кількох супутників та з використанням математичної Кеплеровської моделі, можна прийняти припущення, що висота шуканої точки знаходиться на продовженні радіус-вектора з центру еліпсоїда до даної точки. Це дає нам можливість позиціонувати шукану точку на еліпсоїді шляхом прийняття її висоти нульовою. Але висота впливає на розрахунок та отримання географічних координат супутниковими приймачами. Зміщення точки позиціонування з врахуванням висоти виконується згідно руху радіус-вектора з центра еліпсоїда в напрямку вектора-зміщення. Вектор-зміщення перпендикулярний радіус-вектору руху і залежить від перепаду координат через зміну еліпсоїдальної висоти. Дистанція, на яку виконується зміщення,

пропорційна абсолютному значенню висоти шуканої точки. Як показали практичні виміри та розрахунки, похибка зміщення точки на еліпсоїдальній карті в наших регіонах не перевищує 0.1 метра при роботі супутникового приймача в режимах RTK (Real Time Kinematic) або ERTK. Під час розрахунку статистичних даних в режимах RTK та ERTK дана похибка буде ще набагато меншою. Практична залежність похибки перепаду координат від висоти при наборі статистичних даних протягом 10 хвилин при запису сигналу кожну 1 секунду (в кожному положенні) приймачем Ashtech Z-Surveyor в режимі RTK показано в таблиці 1 і на рисунку 1.

**Таблиця 1.**  
**Статистичні дані похибки перепаду координат від висоти**

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
h, м	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	25	30	35	40	45	50	55	60
$\Delta d_{cp}, \text{м}$	0.01	0.015	0.03	0.02	0.05	0.06	0.04	0.03	0.07	0.05	0.07	0.07	0.09	0.08	0.09	0.07	0.08	0.06	0.08



**Рис. 1. Практична залежність похибки перепаду координат від висоти.**

Набір статистичних даних в кожному з дев'ятнадцяти випадків наборів вимірювань відповідає нормальному закону. Тобто для великої кількості вимірювань зміщення або систематична похибка дорівнює нулю. Тобто, можна стверджувати, що Ashtech Z-Surveyor в режимі RTK при наборі статистичних даних протягом 10 хвилин забезпечує похибку не більше ніж 0.1 метра. Це дає можливість знайти середньоквадратичну похибку для визначення кожної з точок як квадратний корінь із суми квадратів відхилень по довготі та широті, поділених на кількість вимірювань:

$$\Delta d_{cp} = \sqrt{\frac{B_1^2 + L_1^2}{n}} + \dots + \sqrt{\frac{B_n^2 + L_n^2}{n}}.$$

Дана похибка і буде представляти максимальне відхилення координат і, як показують практичні дослідження, вона прямує до нуля і слабо залежить від висоти антени приймача системи супутникового позиціонування, а залежить від прийняття супутниковых сигналів та часових поправок по визначеню координат.

При використанні супутникової системи нового покоління в режимі RTK з новими протоколами передачі даних WAAS, EGNOS, MSAS та GAGAN похибка зміщення точки на еліпсоїдальній карті в залежності від висоти буде прямувати до нуля, тобто даною похибкою можна знехтувати, а отже точність визначення положення об'єкта на поверхні

еліптичної карти буде залежати тільки від точності отриманих географічних координат від системи супутникового позиціювання.

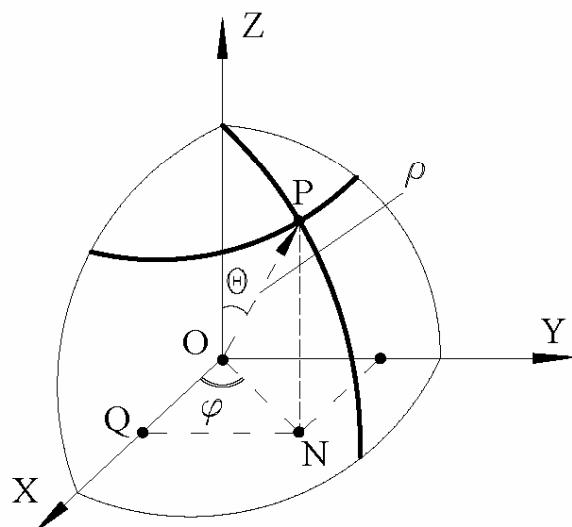
### Математичне представлення координат в системі GeoModel

Так як всі комп'ютерні програмні продукти фізично працюють з лінійною системою координат, то при створенні та відображені об'єктів еліпсоїdalnoї карти в системі автоматизованого проектування GeoModel необхідно виконати неявний для користувача перехід від географічних координат до лінійних. При проектуванні картографічного еліпсоїда в САПР AutoCAD перехід до лінійних координат необхідний для коректного вводу команд в систему та для коректного відображення даних. Надбудова GeoModel, створена для САПР AutoCAD, дозволяє користувачу працювати з полярними та географічними координатами і не задумуватися над сутністю побудови тривимірної еліпсоїdalnoї електронної карти в системі автоматизованого проектування. Система GeoModel надає користувачу тривимірний еліпсоїд для створення еліпсоїdalnoї карти і ряд інструментів для створення та модифікації карти, які працюють з географічними координатами. Ядро і робочий простір в САПР AutoCAD працюють з лінійними одиницями виміру, а тому для забезпечення користувача необхідними засобами для роботи з тривимірною картографічною моделлю еліпсоїда в географічних координатах, необхідне коректне перетворення координат з географічних в лінійні.

При практичній побудові поверхні еліпсоїdalnoї карти в просторі та об'єктів на її поверхні необхідно знати множину точок з координатами  $(x,y,z)$ , яка описує необхідний об'єкт. Враховуючи той фактор, що з системи супутникового позиціювання отримуємо географічні координати  $(\phi, \lambda, h)$ , а для програмування в САПР AutoCAD необхідно лінійне представлення даних, то необхідно виконати коректний перерахунок отриманих даних в лінійні координати:

$$(\phi, \lambda, h) \rightarrow (x, y, z)$$

Припустимо, що необхідно побудувати точку Р на поверхні еліпсоїду (рисунок 2).



**Рис. 2. Схема перерахунку географічних координат в лінійні**

Положення точки Р в просторі можна визначити наступними трьома величинами:

- 1) радіус-вектор  $\rho = OP$ ;

- 2) кут  $\theta = \angle ZOP$  між променями OZ і OP;  
 3) кут  $\varphi = \angle XON$  площинами ZOX і ZOP.

Де  $(\varphi, \theta, \rho) = (\varphi, \lambda, h)$  – полярні координати точки Р. Розглянемо спочатку знаходження лінійних координат  $(x, y, z)$  для сфераїда, а потім перейдемо до еліпсоїда WGS-84.

$$\begin{aligned} X=OQ & \left\{ \begin{array}{l} \frac{ON}{\rho} = \sin \theta \\ \frac{OQ}{ON} = \cos \varphi \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} ON = \rho \sin \theta \\ OQ = ON \cdot \cos \varphi = \rho \sin \theta \cos \varphi \end{array} \right. \Rightarrow X = \rho \sin \theta \cos \varphi \\ Y=QN & \left\{ \begin{array}{l} \frac{ON}{\rho} = \sin \theta \\ \frac{NQ}{ON} = \sin \varphi \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} ON = \rho \sin \theta \\ NQ = ON \cdot \sin \varphi = \rho \sin \theta \sin \varphi \end{array} \right. \Rightarrow Y = \rho \sin \theta \sin \varphi \\ \frac{Z}{\rho} = \cos \theta & \Rightarrow Z = \rho \cos \theta \end{aligned}$$

За допомогою вищевказаних формул виконується перехід від географічних координат в лінійні, які дозволяють виконувати будь-які просторові побудови. Перехід від сфери до еліпсоїда пов'язаний з накладанням додаткових умов на вищевказані розрахунки.

$$\begin{cases} \rho \in [a; b] \\ \theta \in [-90; 90] \\ \varphi \in [0, 360] \end{cases}$$

де  $a, b$  – велика та мала півосі еліпсоїда, які відповідно дорівнюють:

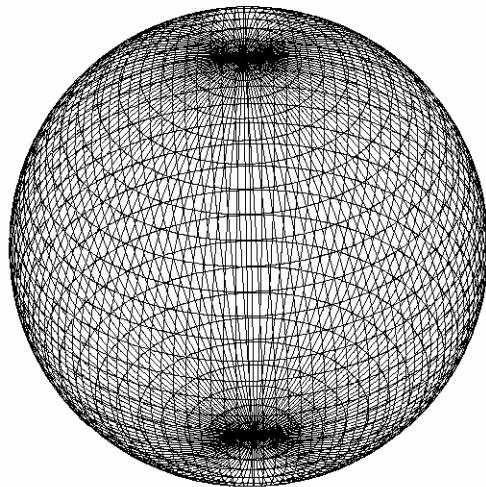
$$\begin{aligned} a &= 6378137 \text{ – велика піввісь;} \\ b &= 6356752.3142 \text{ – мала піввісь.} \end{aligned}$$

Таким чином, виконуючи дані перерахунки можна визначити положення в просторі будь-якого точкового об'єкта. Для визначення в просторі певної лінії – необхідна множина точок. Якщо взяти еліпсоїдальну карту, то для точного відображення на ній лінії необхідно щоб кількість точок, яка описує певну лінію прямувала до нескінченості. Це пов'язано з тим, що реально будь-яка лінія в просторі представляється у вигляді еліптичної дуги або із послідовності еліптичних дуг (у випадку ломаної лінії). Ось чому для точного представлення картографічних об'єктів виконується проектування об'єктів на еліпсоїд з подальшими тривимірними побудовами.

### Проектування картографічного еліпсоїда в системі GeoModel

В системі автоматизованого проектування AutoCAD розроблена нами прикладна програма GeoModel, дозволяє користувачу створювати та модифікувати еліпсоїдальну електронну карту, працюючи з географічними координатами. Перш за все система надає користувачу картографічний еліпсоїд WGS-84, на базі якого і буде виконуватися побудова

картографічної моделі. Так як мала та велика півосі відомі, то приймаючи за центр еліпсоїда – центр тривимірного простору моделювання AutoCAD, можна отримати базовий каркас еліпсоїда з нанесеною на нього градусною сіткою (рисунок 3).



**Рис. 3. Каркасна модель еліпсоїду WGS-84.**

Масштаб градусної сітки є зміною величиною і може задаватися чи змінюватися користувачем (масштабний коефіцієнт дорівнює одному градусу за замовченнем). При побудові каркаса картографічного еліпсоїда використовується наступна методика:

- 1) на двовимірній площині створюється еліпс з півосями  $a$  і  $b$ , які відповідають малій та великій півосям еліпсоїда WGS-84 з центром в початку координат  $(0,0,0)$ ;
- 2) вибирається шаг градусної сітки і розраховується кількість шагів повороту відносно малої осі за формулою:

$$K_{\text{ш1}} = (\alpha_{\text{max1}} / \alpha_n) - 1, \quad (1)$$

де  $\alpha_{\text{max1}} = 180^\circ$ , так як маємо повний еліпс;

$\alpha_n$  – кут повороту, який дорівнює шагу градусної сітки;

- 3) виконується пошаговий поворот з копіюванням еліпса відносно меншої півосі згідно куту поворота і кількості шагів та отримується набір каркасних еліпсів;
- 4) головний меридіан ділиться променями, які виходять з початку координат з шагом, який дорівнює шагу градусної сітки;
- 5) через точки поділу проводяться кола паралельно екватору і з центром на малій осі еліпса та отримується набір каркасних кіл (паралелей);
- 6) з каркасних наборів еліпсів та кіл створюється єдиний каркасний об'єкт, який представляє собою модель картографічного еліпсоїда;
- 7) установлюється система відліку на отриманому каркасному еліпсоїді з паралелей і меридіан з шагом, який дорівнює шагу градусної сітки (нуль по Гринвічу).

Створений еліпсоїд представляє собою єдину каркасну еліпсоїdalну картографічну модель у вигляді тривимірної еліпсоїdalної поверхні (градусної сітки). Дано поверхня має свої властивості, характеристики та атрибути. Це такі дані як колір,

товщина каркасних ліній, стиль каркасних ліній, властивості представлення та відображення, градусний масштаб, то що. Всі дані еліпсоїда можна змінювати і пристосовувати картографічний еліпсоїд для вирішення певних задач.

Для створення і роботи з еліпсоїдальною картою в системі GeoModel передбачено ряд об'єктів, інструментів та засобів. Базовими картографічними об'єктами в системі GeoModel є точка, лінія, майданний об'єкт (послідовність ліній), вектор, текстовий напис та бібліотека картографічних знаків. Точка та еліптична дуга є основними об'єктами при створенні еліптичної карти. Всі інші об'єкти є похідними від них.

Точкове зображення в картографії використовується для зображення різних знаків, пунктів. Знаходиться точкове зображення як точка перетину радіус-вектора в заданих географічних координатах з картографічним еліпсоїдом. Таким чином точка наноситься на еліпсоїдальну карту за чіткими географічними координатам та масштабом позначення.

Лінійне зображення в картографії використовується для нанесення на карту різних доріг, магістралей, мостів і т.д. Особливістю зображення лінійного елементу на картографічному еліпсоїді є те, що фактично отримується еліптична дуга, що є більш точним відображенням дійсної геометрії лінії в картографії. Лінія наноситься на картографічний еліпсоїд шляхом проектування лінії, побудованої по географічним координатам, на еліпсоїд. Як результат, отримуємо еліптичну дугу у вигляді полілінії.

Майданний об'єкт в електронній картографії використовується для зображення будинків, кварталів, виділення певних територій (в залежності від специфікації карти) і т.д. Якщо майданний об'єкт представляє собою трикутник, то на картографічному еліпсоїді він буде відображатися трьома послідовно з'єднаними еліптичними дугами; якщо чотирикутник – то чотирма еліптичними дугами, т.д. Еліптичні дуги отримуємо шляхом проектування послідовності ліній, які описують майданний об'єкт, на картографічний еліпсоїд. Результатом дуги групуються для представлення майданного об'єкта на еліпсоїдальній карті як единого цілого.

Векторний об'єкт в електронній картографії використовується для вказування напрямків або для вказування виносок на інші картографічні об'єкти. Даний об'єкт як і лінійний об'єкт теж визначається двома точками, але відрізняється тим, що має напрямок. Дані об'єкти представляють собою зовсім різні типи даних і займають різні блоки іменних даних. В даному об'єкті перша точка – це початок вектора, друга точка – кінець вектора, який показує напрямок. Об'єкт-вектор на електронній карті може позначатися по різному та може мати різні семантичні характеристики - лежати в іншому шарі, групуватися з іншими об'єктами і т.д. На еліпсоїдальну карту даний об'єкт наноситься як дотичний до поверхні в заданій точці вставки.

Підпис, як об'єкт електронної карти, використовується для підпису картографічних об'єктів даних (споруди, знаки, пояснлювальна інформація). Підпис характеризується точкою вставки, довжиною текстового поля та вектором вставки. Довжина текстового поля залежить від дожини, розміру та шрифту текстового надпису. Підпис виводиться таким чином, що він має одну точку дотику до картографічного еліпсоїду, розташовується перпендикулярно нормалі до еліпсоїда і має напрямок, вказаний внутрішнім об'єктом-вектором. Так як текстовий об'єкт є плоским, то на еліпсоїдальну карту текстовий об'єкт наноситься як дотична площа до поверхні картографічного еліпсоїда в заданій точці вставки в напрямку, заданому внутрішнім об'єктом-вектором.

В систему GeoModel вбудовано декілька бібліотек картографічних знаків і передбачено можливість створення нових знаків та занесення їх до власних бібліотек. Картографічні знаки вставляються на еліпсоїдальну карту як дотичні площини по нормальні до картографічного еліпсоїда. Причому точка вставки відповідає базовій точці картографічного знака. Як правило, знаки вставляються на карту для підвищення інформативності електронної карти.

Кожний відображеній на картографічному еліпсоїді об'єкт має свої власні характеристики, властивості та атрибути. Крім того кожний об'єкт може знаходитися в певному шарі. Це дозволяє класифікувати картографічні елементи за тематикою, групувати в певні набори і створювати спеціалізовані шари з наборів картографічних об'єктів.

В системі GeoModel передбачено ряд інструментів не тільки для вставки та видалення об'єктів, а й для зміни їх характеристик, атрибутів та їх стилів відображення. Широкий набір інструментів та засобів в системі дозволяє модифікувати всі картографічні елементи, вести специфікацію елементів та їх зв'язків на еліпсоїdalній карті в базі даних, змінювати представлення та відображення самої карти.

Наносячи об'єкти на картографічний еліпсоїд, встановлюючи їх характеристики та атрибути, заносячи картографічну інформацію до електронної бази даних системи GeoModel, змінюючи стилі відображення та представлення елементів карти – отримуємо тривимірну еліпсоїdalну карту, яка максимально точно буде представляти картографічні дані.

### **Перехід від плоскісних карт до еліпсоїdalної карти в системі GeoModel**

Враховуючи той фактор, що на даний час створено велику кількість паперових карт, то відповідно постає питання в переведенні картографічної інформації з паперових карт на картографічний еліпсоїд WGS-84 з мінімальним спотворенням. Повна автоматизація даного процесу неможлива, так як сам перехід від паперового вигляду представлення карт до їх електронного аналогу пов'язаний з процесом векторизації, який на даний час нечітко формалізований та неповністю автоматизований, а тому потребує втручання користувача. Крім того різноманітність карт за тематикою обумовлює неоднорідність масштабних коефіцієнтів по осям, що ще більше ускладнює процес перевода паперових картографічних даних на електронний картографічний еліпсоїд. Єдиний шлях переходу з паперових карт на еліптичну електронну – це зйомка користувачем географічних координат об'єктів і створення нових картографічних елементів в системі GeoModel. Як результат пошагової зйомки координат об'єктів на паперовій карті та побудова тих же об'єктів на електронній моделі картографічного еліпсоїда – маємо еліптичну електронну карту. Точність даної карти буде дорівнювати:

$$\Delta_e = \Delta_p + \Delta_k ,$$

де  $\Delta_e$  – похибка еліпсоїdalної електронної карти;

$\Delta_p$  – похибка плоскісної карти;

$\Delta_k$  – похибка користувача, яка залежить від зорового та інструментального сприйняття картографічних елементів на плоскісній карті.

Якщо похибку користувача вважати нульовою, то точність створення еліпсоїdalної електронної карти буде відповідати точності паперової карти. Тобто, точність представлення картографічної інформації при переході на картографічний еліпсоїд не змінюється. Аналогічним чином виконується перехід від електронної плоскісної карти до тривимірної еліпсоїdalної електронної карти. Точність представлення картографічних даних буде відповідати точності плоскісної карти.

Якщо ж паперова або електронна плоскісна карта представлена в лінійних одиницях виміру, то крім зйомки координат об'єктів необхідний додатковий математичний перерахунок координат з лінійних в географічні. В даному випадку точність представлення картографічних даних на еліпсоїdalній карті буде дорівнювати:

$$\Delta_e = \Delta_\pi + \Delta_k + \Delta_m$$

де  $\Delta_m$  – похибка, яка вноситься математичними перерахунками.

Тобто точність представлення картографічних даних падає за рахунок збільшення загальної похибки. Якщо ж вважати, що похибка користувача дорівнює нулю, то отримуємо:

$$\Delta_e = \Delta_\pi + \Delta_m$$

Дана похибка є мінімальною, яка тільки можлива при переході від плоскісних карт в лінійних одиницях виміру на картографічний еліпсоїд WGS-84.

Процес переходу від плоскісної електронної карти на еліпсоїдальну піддається деякій автоматизації. Якщо електронна плоскісна карта представлена в градусній мірі, де кожний об'єкт представлений своїми географічними координатами, то процес переходу до еліпсоїдальної карти підлягає повній автоматизації. Похибка створення електронної еліпсоїдальної карти буде дорівнювати:

$$\Delta_e = \Delta_\pi.$$

Якщо ж плоскісна електронна карта представлена в лінійних одиницях виміру, то для виконання процесу автоматизації необхідне виконання наступних умов:

- 1) карта повинна бути виконана в плоскісних координатах деякої проекції на еліпсоїді WGS-84;
- 2) карта повинна мати постійні масштабні коефіцієнти по осям, які не впливають на координатне представлення картографічних даних на карті;
- 3) використовувати коректний математичний апарат по переводу координат з поточеної проекції еліпсоїда WGS-84, в якій створена карта, на географічні координати еліпсоїда WGS-84.

Припустимо карта задовільняє даним умовам, тоді в результаті автоматизованого створення еліпсоїдальної карти отримуємо похибку:

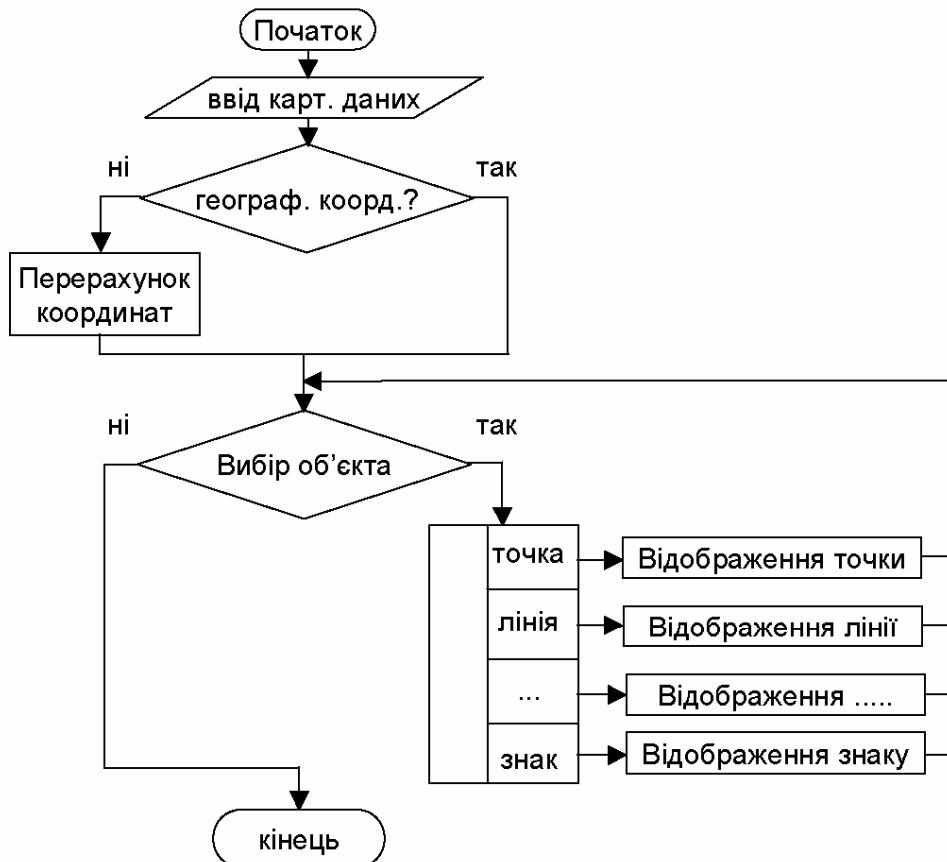
$$\Delta_e = \Delta_\pi + \Delta_m$$

Якщо розглянути електронні стандарти з точки зору представлення графічних (векторних), та картографічних даних, то майже всі специфікації файлів представляють векторні дані у вигляді послідовності об'єктів та їх координат і атрибутивів. Наприклад формально лінія представляється в такому форматі:

Код [“Line”],Start Point,End Point,Атрибут1, Атрибут2,...

Формат представлення об'єктів залежить від формату файлу. Є можливість програмно зчитувати з файлау дані про картографічні об'єкти і виконувати певні операції над їхніми даними.

Загальний алгоритм модуля системи GeoModel з автоматизації процесу створення еліпсоїдальної електронної карти з плоскісної електронної карти представлений на рис. 4.



**Рис. 4. Алгоритм модуля системи GeoModel з автоматизації процесу створення еліпсоїдальної електронної карти шляхом конвертації плоскісної електронної карти**

Для створення еліпсоїдальної карти по існуючим паперовим картам в системі WGS-84 достатньо визначити координати точок або множини координат ліній, перерахувати координати, якщо потрібно, та відобразити картографічні дані в просторі в програмному середовищі.

Якщо розглянути ситуацію зі створенням еліпсоїдальної карти по координатам реально, то неможливо визначити множину координат точок яка б прямувала до нескінченості для абсолютно точної представлення лінії. Тому для реалізації точної еліптичної карти необхідний інший підхід. Для точної представлення лінії на еліптичній карті необхідно виконати проекцію даної лінії на картографічний еліпсоїд, який представлений в системі WGS-84. Проектування повинно відбуватися не по нормальні до картографічного еліпсоїда (так як в кожній точці радіус кривизни поверхні різний), а по радіус-вектору, який виходить з центру еліпсоїда. В результаті отримуємо еліптичну дугу, яка максимально точно представляє лінію. В даному випадку зникає необхідність в множині точок, так як для точної представлення лінії необхідно лише дві точки – початкова та кінцева. Будуючи множину еліптичних дуг – отримуємо майданчик об'єкт, який може бути будь-якої форми та складності. Криві лінії теж представляються множиною еліптичних дуг, але послідовно.

## Висновки

Реалізація механізмів створення і використання еліпсоїдальної карти в системі GeoModel, на базі САПР AutoCAD, надає користувачу ряд переваг, фактично без ускладнення використання, у порівнянні з плоскісними електронними та паперовими картами:

- 1) точне представлення географічних координат об'єктів;
- 2) суттєве зменшення похибки представлення кутів, форми, довжин, дуг та поверхонь;
- 3) зникає необхідність в складних математичних перерахунках для представлення об'єктів на карті;
- 4) виникає можливість для реалізації шаблонів, стилів, шарів та набору інструментів для роботи з картографічними об'єктами, що значно підвищить зручність роботи з картою.

Створена еліпсоїдальна карта надає користувачу не тільки підвищено точність представлення картографичної інформації, але й ряд засобів та механізмів для більш точного позиціонування транспортних засобів.

## Література

---

1. Ю.А. Кречко, “AutoCAD: программирование и адаптация”, “Диалог – МИФИ”, Москва, 1995г.
2. А.И.Сорокин, “Морская картография”, ЦКФ ВМФ, 1985 г.
3. П.С.Закатов, “Курс высшей геодезии”, “Недра”, Москва, 1976.
4. Б.Б.Серапинас, “Глобальные системы позиционирования”, ИКФ “Каталог”, Москва, 2002.
5. В.Л.Пантелеев, “Теория фигуры Земли”, МГУ им. М.В.Ломоносова , Москва, 2000
6. “Objectarx Developer’s Guide”, AutoDesk, 1999г.
7. Г.Е.Пустовалов “Погрешности измерений”, Москва, 2001 г.
8. Stephen Wise, “GIS Basics”, “Tayler&Francis”, WIEN, 1999.
9. “Integrating GIS and the Global Positioning System”, ESRI Press, 2000
10. <http://www.autodesk.com>