

УДК 528.3

DOI 10.36910/10.36910/6775-2313-5352-2024-24-14

Сацик В.О.<sup>1</sup>, Сацик О.В.<sup>1</sup>, Сацик С.І.<sup>2</sup>, Решетило О.М.<sup>1</sup><sup>1</sup>Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна<sup>2</sup>Комунальний заклад загальної середньої освіти "Луцька гімназія №19 Луцької міської ради"

## СУЧАСНИЙ СТАН КООРДИНАТНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В УКРАЇНІ ТА СФЕРИ ЙОГО ВИКОРИСТАННЯ

В роботі приведені визначення координатного забезпечення, а саме: координатна система, система відліку, датум, геоїд, класифікація системи координат, приведені приклади їх використання в навігації, землевпорядкуванні, картографії та в прецизійному землеробстві. Також в роботі представлена історична довідка, розкрито короткий зміст умов формування різних системи координат. Розкрито проблеми переходу з однієї системи координат в іншу, зокрема перехід України від СК-42 та СК-63 до СК-200 та перспективи і проблеми переходу до міжнародної системи координат WGS-84. Одержані результати забезпечують: розкриття ряду понять - координатна сітка, система відліку, Світова геодезична система (World Geodetic System, WGS-84); розуміння класифікації систем координат, сучасного стану координатного забезпечення в Україні, умов необхідності, перспективи та проблеми переходу від внутрішньої координатної системи до міжнародної, а також розуміння визначення та фіксації координат точок при проведенні вимірювання основних параметрів ґрунту розробленим нами програмно – апаратним комплексом.

**Ключові слова:** координатна система, класифікація координатних систем, датум, геоїд, еліпсоїд, референт-еліпсоїд, світова геодезична система, WGS-84, декартова система координат, циліндрична система координат, сферична система координат, СК-42, СК-63, УСК-2000, фіксація координат.

**Постановка проблеми.** В процесі навчання учнів предмету «Географія» та викладанні дисциплін освітньої програми «Системи керування безпілотними апаратами» доводиться мати справу з таким поняттям як система координат. В літературних джерелах та різних інформаційних повідомленнях приводяться різноманітні типи системи координат від локальних до глобальних. Практика використання системи координат також натикається на певну плутанину визначення поняття систем координат та їх сфер практичного застосування. Вирішення питання даної проблеми автори зробили спробу шляхом аналізу різних понять пов'язаних із координатними системами, наведенням узагальнення її класифікації, приведенням прикладів практичного застосування та шляхом узагальнюючих висновків, які забезпечують певне впорядкування з даної проблематики.

**Основне завдання та одержані результати роботи.** Метою дослідження є виявити найбільш вживанні визначення та термінологію системи координат, провести певне узагальнення; розкрити стан координатного забезпечення в Україні; необхідність, перспективи та проблеми переходу від внутрішніх (старих радянських) СК-42, СК-63, УСК-2000 до сучасної Світової геодезичної система координат WGS-84.

В історичному минулому виконували прив'язку на місцевості, де виконували топографічні знімання для складання карт. Для виконання цих робіт потрібно вибрати початкову точку відліку і орієнтування відносно якогось характерного напрямку, наприклад на північ по компасу. Або це могли бути напрямки на віддалені точки, положення яких, як передбачалося, тривалий час було незмінним. І вже відносно цього вихідного напрямку, який і можна вважати початком системи координат фіксувати всі об'єкти на поверхні. У різних регіонах, країнах вибиралися різні системи координат, і всі результати робіт різнилися між собою.

Загалом визначення поняття системи координат в літературних джерелах різняться між собою. Приведемо декілька з них.

Системою координат називається сукупність умов, що визначають положення точки на прямій, площині, кривій поверхні чи в просторі [1].

Згідно джерела [2], координатна система – це спосіб задання точок простору за допомогою чисел.

В той же час, згідно GIS Dictionary – це еталонна система, що складається з набору точок, ліній та/або поверхонь, а також набору правил, які використовуються для визначення положення точок у просторі у двох або трьох вимірах [3].

У своїй роботі Черняга П. Г., вказує, що система координат – це система, яка дозволяє визначити положення точки на площині чи в просторі [4]. Він приводить приклади різних систем координат: сферичні, геодезичні, астрономічні, географічні, умовна Земна система координат (її ще називають геоцентрично-просторово-ортогональною CTS), умовна інерціальна система координат (CIS), тощо.

Скрипник О.М. у своїй роботі «Системи координат та координатні перетворення для задач аеронавігації» вказує на локальні та глобальні системи координат [5].

Тадеев О. А. поняття системи координат трактує як спосіб визначення місцеположень точок простору за допомогою чисел або інших символів, опираючись на систему відліку і датум. Кількість чисел, що необхідні для однозначного визначення положення будь-якої точки простору, визначає його вимірність. Сукупність чисел, що визначають положення конкретної точки, називається координатами цієї точки. обов'язковим елементом системи координат є початок координат – це точка, від якої ведеться відлік відстаней або кутів (система відліку).

Система відліку, відносно якої розглядається рух тіла, утворюється просторовою системою координат, тілом відліку, з яким вона пов'язана, його станом, а також приладами для вимірювання часу (годинниками). В якості системи відліку в геодезії використовується термін референцна система, тобто сукупність однозначно встановлених параметрів, які описують стан Землі (у тому числі її моделі у тій чи іншій формі), початок відліку, систему координат і час. Суть земної референцної системи в тому, що вона однозначно визначає співвідношення, що встановлюються на Землі за допомогою датуму (параметрів Землі на задану епоху) і системи координат для пунктів геодезичної мережі. Тому геодезична референцна система включає датум і систему координат. Датум (або геодезичні дати) – це стан земної референцної системи станом на задану епоху [6].

Таким чином, основні відмінності систем координат зумовлені вибором початку, основної координатної площини та головної осі координат.

З метою певного впорядкування різних типів систем координат на рисунку 1 приведемо їх класифікацію.



Рисунок 1– Класифікація систем координат

Як можна побачити з рисунка 1, системи координат, які використовують в геодезії, класифікують за наступними ознаками:

- 1) за вимірністю: двовимірні (поверхневі) та тривимірні (просторові);
- 2) за походженням: природні (фізичні, небесні, зоряні); модельні (пов'язані з тією чи іншою моделлю Землі);

3) за положенням початку відліку: планетоцентричні (геоцентричні – центр мас Землі); об'єктоцентричні (топоцентричні – точка на поверхні Землі);

4) за основною відліковою координатною площиною: екваторіальні (площина екватора); горизонтні (площина земного горизонту);

5) за одиницями вимірювання: лінійні (прямолінійні прямокутні); кутові (полярні).

Положення точки простору завжди визначається однозначно незалежно від обраної системи координат. З цієї причини існують однозначні математичні зв'язки між системами координат. Перетворення координат точки з однієї системи в іншу називають перетворенням в системах координат [6].

Для вирішення тих чи інших завдань в аеронавігації, як вже було описано вище, пропонується користуватися локальними та глобальними системами координат.

В даному контексті передбачається, що локальні системи охоплюють обмежену частину земної поверхні та використовуються при переміщенні повітряних суден на відстань до 400-500 км, коли кривизною земної поверхні можна знехтувати без шкоди для точності вирішення навігаційної задачі. До локальних систем можна віднести циліндричну, сферичну, та прямокутну системи координат, початок яких знаходиться в точці на поверхні Землі, тому дані системи також називають топоцентричними.

Глобальні системи координат охоплюють всю поверхню Землі. Фігура Землі, а отже, і земна поверхня має досить складну форму. На жаль, не існує системи координат, що абсолютно точно враховує форму Землі при описі процесів навігації щодо земної поверхні в будь-якому її районі. Тому використовують різні апроксимації фігури Землі для задоволення вимог щодо точності при вирішенні геодезичних, картографічних чи навігаційних завдань.

Використання сучасних технологій вимірювання параметрів Землі, розвиток супутникової навігації, а також вимоги до інтероперабельності повітряного простору викликали значні зміни у підходах до опису фігури Землі та точності такого опису.

В результаті в даний час застосовуються системи координат, як для вирішення задач геодезії та картографії, так і для вирішення задач повітряної та космічної навігації.

Системи першого типу (геодезія та картографія), що використовуються досить давно, орієнтовані на окреме визначення положення об'єктів на поверхні землі (горизонтальний двовимірний простір) та по вертикалі (ортометрична висота, що відрховується від середнього рівня Світового океану). Системи другого типу (повітряна та космічна навігація) орієнтовані на визначення положення об'єктів у тривимірному просторі. У обох випадках потрібна найточніша апроксимація фігури Землі та її поверхні. Найбільш близьким за формою до земної поверхні (рисунок 2, а) є геоїд (рисунок 2, б) – поверхня, нормальна до напрямку сили тяжіння в кожній точці (поверхня, на якій атмосферний тиск постійний і становить 760 мм. рт. ст.) і збігається з рівнем Світового океану в його спокійному стані. Внаслідок таких ефектів, як зміна атмосферного тиску, температури, панівних вітрів і течій, варіацій щільності (солоних) водних мас, середній рівень Світового океану може відрізнятись від поверхні геоїду на метр і більше.

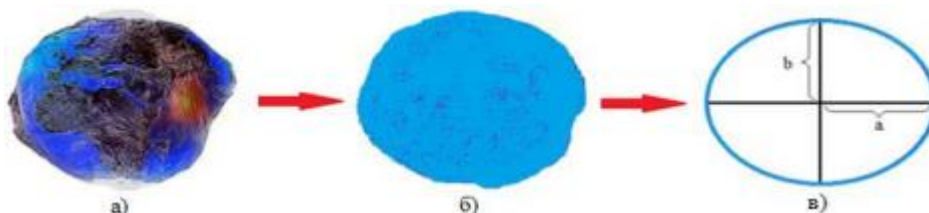


Рисунок 2– Апроксимації фігури Землі

Поверхня геоїду хоч і є гладкою, в порівнянні з фізичною поверхнею землі, має неправильну форму. Це викликано нерівномірним розташуванням гравітаційних мас у тілі Землі, внаслідок чого відбувається відхилення вертикальних ліній.

Для створення глобального геоїду було розроблено модель гравітації Землі (Earth Gravitational Model) 1996 року – EGM96. Дана модель включає в себе коефіцієнти, що описують гравітаційне поле Землі до ступеня та порядку 360. Ця модель стала стандартом для визначення геоцентричних висот та корекції GPS-вимірювань, що забезпечує точність більше одного метра в місцях вимірювання гравітації.

Геоїд не вдається описати математично, тому для вирішення практичних завдань на поверхні землі вона є математично описаною геометричною фігурою – еліпсоїдом (рисунок

2,в). Підбираючи параметри еліпсоїда, можна більшою чи меншою мірою наблизити його до геоїду у різних його частинах. Однак неможливо підібрати еліпсоїд, який би точно збігався із геоїдом у межах усієї земної поверхні. Різниця між поверхнями геоїду та еліпсоїда (носить назву – хвиля геоїду) (рисунок 3,а) може досягати порядку 100 м і більше. Інформація про хвилю геоїду необхідна для визначення перевищень аеродромів, зон приземлення та відриву від злітно-посадкової смуги або зон кінцевого етапу заходу на посадку та зльоту на аеродромах.

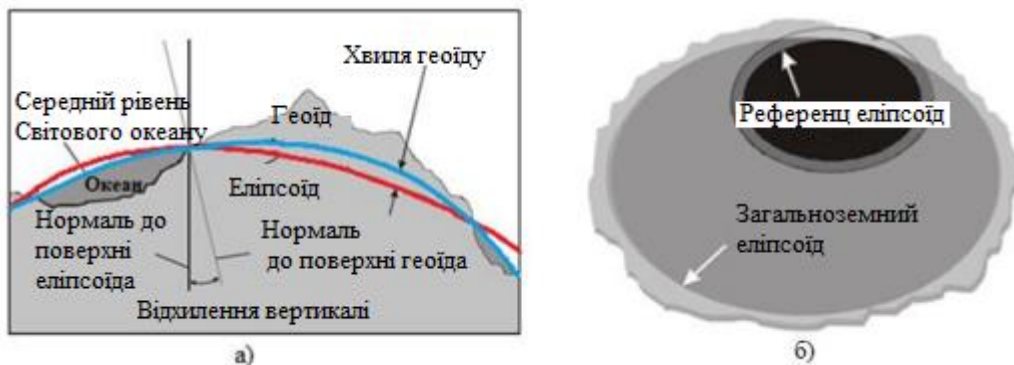


Рисунок 3 – Геоїд і референц – еліпсоїд

До 1964 кожна країна підбирала параметри еліпсоїда, які наближені до геоїду території своєї країни. Такий еліпсоїд отримав назву референц-еліпсоїда (рис. 3,б).

Референц-еліпсоїди приймалися для обробки геодезичних вимірювань законодавчо. Історично склалося так, що в різні часи та в різних країнах були прийняті та законодавчо закріплені різні еліпсоїди, та їх параметри не співпадали між собою.

В країнах колишнього СРСР, в тому числі і в Україні використовувався еліпсоїд Красовського з параметрами: велика піввісь  $a = 6378245$  м, мала піввісь  $b = 6356863$  м, стиснення 1:298,3. У США та Канаді використовували еліпсоїд Кларка (Clarke 1880) з параметрами: велика піввісь  $a = 6378249$  м, стиск 1:295,0. У багатьох країнах Західної Європи та деяких державах Азії було прийнято еліпсоїд Хейфорда, а Індії та країнах Південної Азії використовували еліпсоїд Евересту [5].

За даними Косиці Я. О. в Україні першою референчною системою координат була СК-42. Система координат 1942 року – це референцна система прямокутних координат на площині, яка базується на використанні конформної проєкції з наступними вихідними даними:

- референц-еліпсоїд Красовського – велика піввісь 6 378 245 м, стиснення 1:298,3;
- висота геоїда в Пулково над референц-еліпсоїдом дорівнює нулю;
- геодезичні координати Пулковської обсерваторії (центр сигналу А): широта –  $59^{\circ}46'15,359''$ , довгота від Грінвіча  $30^{\circ}19'28,318''$ ;
- геодезичний азимут з Пулково на пункт-Бугри –  $121^{\circ}06'42,305''$ ;
- центр еліпсоїда Красовського збігається з початком референчної системи координат, вісь обертання еліпсоїда рівнобіжна (паралельна) осі обертання Землі, а площина нульового меридіана визначає положення початку відліку довгот.

Всі інші параметри еліпсоїда є похідними [7].

Наступною системою координат, яка використовувалася для визначення об'єктів на території України була референцна система координат 1963 року. Умовна система координат СК-63 ґрунтується на триградусних зонах, є відкритою системою і у відповідності до діючих нормативно-технічних документів рекомендована в якості основної для кадастрових знімань.

Саме термін «умовна» розкриває сутність даної системи координат. За суттю це була спеціально спотворена система координат, яка базувалася на проєкції Гаусса-Крюгера і системі координат 1942 року. За математичною сутністю – це та ж система Гаусса-Крюгера, тільки номенклатура базових карт масштабу 1:100000 побудована по-іншому. При використанні деяких сучасних методів визначення місцеположення (GPS) необхідно вносити відповідні «ключі переходу» у результати вимірювань для переходу в систему СК-63.

Державна система координат СК-42 та СК-63, що розроблялася у минулому як основа системи геодезичного забезпечення, не може повною мірою виконувати покладені на неї функції у сучасній системі геодезичного забезпечення. Тому на початку ХХІ ст. в Україні була розроблена і побудована нова геодезична референцна система УСК-2000 з використанням

GNSS-технологій. Перманентні GNSS-станції, що входять у загальноєвропейську мережу EPN, мають визначені координати у системі ITRF2005/ETRS89. [8].

Не дивлячись на ряд переваг УСК-2000, втілити її на практиці виявилось доволі складно. Сьогодні вона закрита для загального користування. Не до кінця вирішеним питанням залишається завдання з трансформування координат, тобто переходу від координат однієї референтної системи до іншої [9].

Варто відмітити, що розбіжність між координатами пунктів Державної геодезичної мережі у СК-42 і СК-63 може сягати, у межах держави, від -3 до +3 метрів. Складність переходу від СК-42 і СК-63 до УСК-2000, полягає також в тому, що при перерахунку координат можливі «зміни» і у площах земельних ділянок (довідково: площа України обрахована в УСК-2000 зменшується на 2,1 тис. кв. км і становить 601,6 тис. кв. км, а не 603,7 тис. кв. км як раніше [10].

В глобальній системі позиціонування GPS, про яку ми повідомляли раніше [11], використовується Світова геодезична система 1984 року (WGS).

В Україні видано ряд нормативно-правових актів про впровадження на території України Світової геодезичної системи WGS-84, зокрема: Постанова Кабінету Міністрів України від 22 грудня 1999 року № 2359 «Про запровадження на території України Світової геодезичної системи координат WGS-84», Розпорядженням Кабінету Міністрів України від 11 серпня 2000 року № 320 «Про затвердження плану заходів щодо впровадження на території України Світової геодезичної системи WGS-84», Постанова Кабінету Міністрів України 29 листопада 2022 року № 1332 «Про внесення змін до Порядку загальнодержавного топографічного і тематичного картографування». В останньому документі визначено, що «для потреб Збройних Сил та інших військових формувань, утворених відповідно до законів України, створюються топографічні карти у світовій геодезичній системі WGS-84 та в картографічній проекції Меркатора (UTM)».

В контексті реалізації вище вказаних постанов проведено визначення параметрів переходу від Державної геодезичної системи координат УСК-2000 до Світової геодезичної системи координат WGS-84 та перераховано координати пунктів Державної геодезичної мережі із системи координат УСК-2000 в систему координат WGS-84, а також підготовлено моделі та таблиці переходу від Балтійської системи висот 1977 року до еліпсоїдальних висот, які використовуються у Світовій геодезичній системі координат WGS-84 та проведено ряд інших заходів.

У чому перевага WGS-84 перед аналогічними вищевказаними системами координат? Як стверджують у топографічній службі ЗСУ, становлення точних параметрів реалізації системи координат WGS-84 – єдиної геодезичної основи для всіх картографічних матеріалів, забезпечить сумісність та спільне використання всіх геопросторових даних, які створюються і використовуються у Збройних Силах та інших військових формуваннях.

Використання даної системи координат у порівнянні її з аналогічними (СК-42, СК-63, УСК-2000) дозволить з більшою точністю визначати положення точок місцевості завдяки уточненим параметрам загальноземного еліпсоїда WGS-84 (математичної фігури Землі)» [12].

Використання даного підходу досить актуальним є у прецизійному землеробстві так як забезпечує: точне визначати площі земельних ділянок, онлайн діагностику стану агробіогеоценозу, ґрунту ; здійснення диференційованого внесення добрив та оптимізацію інших технологічних операцій.

В контексті ведення прецизійного землеробства нами був розроблений та неодноразово публічно оприлюднений програмно – апаратний комплекс визначення та фіксації координат точок при проведенні вимірювання основних параметрів ґрунту [13, 14].

Загальний вигляд комплексу під час вимірювання даних за адресою: учбово-лабораторний корпус ЛНТУ, вул. Потебні 56, м. Луцьк, Волинської області, представлено на рисунку 4 (а). Для забезпечення визначення та фіксації координат точок проведення вимірювання параметрів, застосована геодезична референсна система УСК-2000 з використанням GNSS-технологій. З метою відображення та фіксації координат проведення вимірювання параметрів ґрунту за допомогою вищевказаного комплексу, використовуємо інтерактивний онлайн-сервіс картографії та навігації Google Maps. Для отримання доступу до функцій Google Maps необхідно отримати ключ API (Application Programming Interface) на сторінці <https://console.developers.google.com>. Інтерфейси Google Maps API доступні для додатків Android і iOS, веб-браузерів, вони також застосовуються веб-службами HTTP.



Рисунок 4 – Загальний вигляд вимірювального комплексу (а) та відображення даних координат точок проведення вимірювання (б)

На віддаленому сервері вказується форма та зміст даних для відображення (мітки, з можливістю відображення на ній відповідних вимірювальних параметрів, їх координати (широта 50.72743873518883, довгота 25.306650635750337). В подальшому здійснюємо фіксацію цих координат та величини вимірних параметрів через запуск коду з ключем де відбувається генерація карти мітки та даних з сервера (рисунок 4 б) [13].

**Висновки.** Таким чином, в даній статті розкрито поняття система координат. Система координат – це еталонна система, що складається з набору точок, ліній та/або поверхонь, а також набору правил, які використовуються для визначення положення точок у просторі у двох або трьох вимірах.

Системи координат, які використовують в геодезії, класифікують за наступними ознаками: вимірністю, походженням, положенням початку відліку, основною відліковою координатною площиною, одиницями міри.

Для вирішення тих чи інших завдань в аеронавігації, пропонується користуватися локальними та глобальними системами координат.

Державна система координат СК-42 та СК-63, що розроблялася у минулому як основа системи геодезичного забезпечення, не може повною мірою виконувати покладені на неї функції у сучасній системі геодезичного забезпечення. Тому на початку ХХІ ст. в Україні була розроблена і побудована нова геодезична референсна система УСК-2000 з використанням GNSS-технологій. В Україні видано ряд нормативно-правових актів про впровадження на території України Світової геодезичної системи WGS-846.

В контексті ведення прецизійного землеробства нами був розроблений програмно – апаратний комплекс визначення та фіксації координат точок при проведенні вимірювання основних параметрів ґрунту, застосована геодезична референсна система УСК-2000 з використанням GNSS-технологій.

#### Інформаційні джерела

1. Основні типи систем координат, які використовують в геодезії URL: <http://surl.li/obvjpj> (дата звернення : 08.12.2023 ).
2. Системи координат. URL : <http://surl.li/obvda> (дата звернення : 08.12.2023 ).
3. GIS Dictionary URL : <http://surl.li/obvppw> (дата звернення : 08.12.2023 ).
4. Черняга П. Г., Бялик І. М., Янчук Р. М. Супутникова геодезія : навчальний посібник. Рівне : НУВГП, 2013. 222 с.

5. Системи координат та координатні перетворення для завдань аеронавігації URL :<http://surl.li/obxdn> (дата звернення : 08.12.2023 ).
6. Тадеєв О. А. Перетворення в просторових системах координат. Рівне : НУВГП, 2020. 19 с.
7. Вибір оптимальної системи відліку для вирішення соціально – економічних питань у сфері агропромислового виробництва. URL: <http://surl.li/obzmy> (дата звернення: 08.12.2023 ).
8. Леонідова І. В., Вплив переходу між системами координат СК-63 ТА УСК-2000 на площі земельних ділянок. Сучасні тенденції розвитку геодезії, землеустрою та природокористування: зб. матеріалів Міжнар. наук.-практ. конф. Одеса : ОДАУ 2022. С. 23-25. URL :<http://surl.li/eboov> (дата звернення: 08.12.2023 )
9. Про сучасний стан координатного забезпечення та перспективи його вдосконалення для задач кадастру. URL : <http://surl.li/ocacq> (дата звернення : 08.12.2023 ).
10. Нова геодезична система координат. URL : <https://nubip.edu.ua/node/29800> (дата звернення : 08.12.2023 ).
11. Сацик В. О., Корольчук О. О., Сацик О. В., Маркіна Л. М., Смолянкін О. О. Супутникова навігація: основні принципи роботи. проблеми та методи їх вирішення. Актуальні проблеми автоматизації та управління: матер. XI-ої Міжнар. наук.-практ. інтернет-конф. (м. Луцьк, 30 лист. 2023р). Вип. 11. Луцьк, 2023. С.215–222. URL: <http://surl.li/nxdpe> ( дата звернення: 04.12.2023 р).
12. Для чого ЗСУ переходить на світову геодезичну систему WGS-84 URL: <http://surl.li/ocbsk> ( дата звернення: 04.12.2023 р).
13. Комплекс вимірювання основних параметрів ґрунту та передачі їх на віддалений сервер / Д. В. Кукурік та ін. WORLD SCIENCE. № 11 (51) Vol. 1, November 2019. – P. 16-20. URL: <http://surl.li/odksh> ( дата звернення: 04.12.2023 р).
14. Soil Analysis Software Tool for Smart Control of Agronomic Data / V. O. Satsyk et. Publisher: IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc.) Proceedings of the IEEE - 2022 12th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT), 2022, pp. 364-368. URL: <http://surl.li/odkrr> ( дата звернення: 04.12.2023 р).

Satsik V. <sup>1</sup>, Satsik O. <sup>1</sup>, <sup>2</sup>Satsik S. <sup>2</sup>, Reshetylo O. <sup>1</sup>.

<sup>1</sup>Lutsk National Technical University, Lutsk, Ukraine

<sup>2</sup>Communal institution of general secondary education "Lutsk Gymnasium No. 19 of the Lutsk City Council"

#### **CURRENT STATE OF COORDINATED SECURITY IN UKRAINE AND AREAS OF ITS USE**

*This work is an overview. It was written for the purpose of summarizing and analyzing coordinate support in Ukraine, areas of application of various coordinate systems. The work gives certain definitions of coordinate support, namely: coordinate system, reference system, datum, geoid, coordinate system classification, examples of their use in navigation, land management, cartography and precision agriculture are given. Also, the work presents a historical reference, a summary of the terms is revealed formation of different coordinate systems. It is worth noting that the work also reveals the problems of transition from one coordinate system to another, in particular, the transition of Ukraine from SK-42 and SK-63 to SK-200 and the prospects and problems of transition to the international coordinate system WGS-84. The obtained results provide: disclosure of a number of concepts - coordinate grid, reference system, World Geodetic System (World Geodetic System, WGS-84); understanding the classification of coordinate systems, the current state of coordinate support in Ukraine, the conditions of necessity, prospects and problems of the transition from the internal coordinate system to the international one, as well as understanding the definition and fixation of point coordinates when measuring the main parameters of the soil with the software and hardware complex developed by us.*

**Keywords:** *coordinate system, classification of coordinate systems, datum, geoid, ellipsoid, reference ellipsoid, World Geodetic System, WGS-84, Cartesian coordinate system, cylindrical coordinate system, spherical coordinate system, SK-42, SK-63, USK- 2000, fixation of coordinates.*