



УДК 629.052.9:631.5

DOI: 10.37128/2520-6168-2020-2-8

**ГЛОБАЛЬНІ НАВІГАЦІЙНІ СУПУТНИКОВІ СИСТЕМИ ТА  
ЇХ РОЛЬ У ТЕХНОЛОГІЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕРОБСТВА****Холодюк Олександр Володимирович, к.т.н., ст. викладач**  
Вінницький національний аграрний університет**Oleksandr Kholodyuk, PhD., Senior teacher**  
Vinnytsia National Agrarian University

На сьогодні глобальні навігаційні супутникові системи впроваджуються в багатьох структурних ланках господарського комплексу України, багатьох сферах людської діяльності, та з кожним роком набувають подальшого розвитку. Однією з характерних ознак даних супутникових систем є вимоги до високої точності та швидкості отриманих даних. Саме вони дають можливість зменшити експлуатаційні витрати та збільшити ефективність використання техніки й інших ресурсів.

Тому використання навігаційних супутникових систем для керування машинними агрегатами, встановлення його місця розташування, моніторингу стану ґрунтів і картування врожайності на сьогодні набуває все більшої актуальності.

Об'єктом дослідження в даній статті були глобальні навігаційні супутникові системи NAVSTAR GPS (США), GLONASS (РФ), GALILEO (Євросоюз), BEIDOU (Китай) та регіональні навігаційні системи NavIC (Індія) і QUASI-ZENITH (Японія).

Мета роботи полягала в уточненні і встановленні основних характеристик глобальних навігаційних супутникових систем та їх роль у реалізації технологій точного землеробства.

Завданням роботи передбачалося: проаналізувати функціональні характеристики супутникових систем глобального позиціонування та їх основних елементів; з'ясувати принципи роботи систем: навігації, координат, часу; встановити точність роботи систем навігації; обґрунтувати роль супутникових систем глобального позиціонування на ефективну реалізацію технологій точного землеробства у сільському господарстві.

Методика досліджень була заснована на методі матеріалістичної діалектики, методах аналізу та синтезу як інформації з офіційних джерел так і інформації з праць інших дослідників.

У науковій роботі виділено два основних оператора навігаційних супутникових систем NAVSTAR GPS і GLONASS, які подібні у багатьох відношеннях. Серед відмінних особливостей можна відмітити характер розташування, рух супутників на орбітах та їх загальна кількість, методи кодування сигналу CDMA і FDMA, використання різних систем координат WGS-84 і ПЗ90.11. Що стосується двох інших навігаційних супутникових систем GALILEO і BEIDOU, так вони стрімко розвиваються з великими амбіціями та потенціалом. Встановлено, що точність визначення координат системи GLONASS на сьогоднішній день поступається показникам американської системи супутникової навігації GPS. GLONASS забезпечує більш точне позиціонування в північних широтах, а GPS в середніх.

В роботі відмічено, що точність позиціонування машинних агрегатів для реалізації технологій точного землеробства можна покращити (від 2 до 20 см) завдяки диференційній корекції сигналів за допомогою безкоштовних та комерційних широкозонних підсистем супутникової навігації. Дані сервіси дозволяють реалізувати задачі прецизійного водіння, а відтак, і забезпечення точного внесення посівного матеріалу, добрив і гербіцидів з метою їх економії, точного міжрядного обробітку технічних культур, точного збирання врожаю та ін., при виконанні агротехнологічних операцій з використання наземної техніки і безпілотних літальних апаратів.

**Ключові слова:** машинний агрегат, навігація, глобальна навігаційна супутникова система, точне землеробство, NAVSTAR GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, NavIC, QUASI-ZENITH, сигнал, точність позиціонування, система координат, диференційна корекція.

**Табл. 2. Рис. 8. Літ. 21.**

---

**1. Вступ**

На сьогодні глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС) впроваджуються в багатьох структурних ланках господарського комплексу України, багатьох сферах людської діяльності, та з кожним



роком набувають подальшого розвитку. Вони широко використовуються в транспортній навігації, процесі геодезичних робіт, системах безпеки, стільниковому зв'язку, геоінформаційних системах, в сільському господарстві тощо. Однією з характерних ознак даних супутникових систем є вимоги до високої точності та швидкості отриманих даних.

Розвиток глобальних і регіональних навігаційних систем призвів до здешевлення та популяризації використання космічних фотознімків і даних високоточних супутникових систем навігації. В свою чергу це стало своєрідним «трампліном» застосування у різних галузях сільського господарства, зокрема у рільництві. Можливість застосування знань про змінний потенціал земельних ресурсів на локальному рівні з прив'язкою до світових координат обумовило розвиток новітніх інноваційних, ресурсозберігаючих технологій, що отримало назву прецизійне (точне, кероване) землеробство. Узагальнюючи, можна сказати, що точне землеробство (ТЗ) – це стратегія ефективного управління, яка полягає у використанні сучасних інформаційних технологій з метою отримання максимального прибутку, оптимізації сільськогосподарського виробництва, раціонального дослідження природних ресурсів, захисту навколишнього середовища.

---

## 2. Постановка проблеми

Усі роботи при вирощуванні культурних рослин у рільництві виконуються машинними агрегатами (МА). Вони відносяться до складних енергетичних об'єктів з великою кількістю контролюючих і керованих параметрів. У процесі роботи МА піддаються багаточисельній дії зовнішніх збурень і коливань, які безпосередньо впливають на параметри і якість виконання ними технологічних операцій. Механізатор часто не в змозі своєчасно реагувати на ці коливання, особливо при підвищених швидкостях руху агрегату. В зв'язку з цим ручне керування МА на практиці виявляється менш ефективним.

При роботі МА механізатор керує завантаженням двигуна трактора, напрямком руху агрегату, роботою його технологічної частини (плуг, культиватор, сівалка тощо), зміною тягової потужності, зокрема, за рахунок зменшення буксування ведучих коліс; слідує за роботою систем і механізмів енергетичної, технологічної частини, а також забезпечує безпеку руху.

Чим вища робоча швидкість і складніша технологічна операція, що виконується (сівба, обприскування, збирання), тим більшу кількість інформації необхідно сприймати (врахувати) механізатору в одиницю часу і, як наслідок, частіше користуватися органами керування МА, що, в свою чергу, призводить до його швидкої стомлюваності. В зв'язку з цим механізатор запізнюється з прийняттям правильних рішень і здійснення керування агрегатом, в результаті чого ефективність його роботи суттєво знижується.

Не буде перебільшенням і те, що ефективне використання технологій (елементів) ТЗ, а саме: паралельне та автоматичне водіння МА, автоматичне відключення секцій на перекриттях (посів, внесення засобів захисту рослин (ЗЗР) і добрив), диференційоване внесення технологічних матеріалів (насіння, добрив, ЗЗР), відбір зразків ґрунту, дистанційне зондування поверхні ґрунту безпілотними літальними апаратами (БЛА) тощо, не можливе без сучасних точних і швидкодіючих ГНСС. Саме вони дають можливість зменшити експлуатаційні витрати та збільшити ефективність використання техніки й інших ресурсів.

Тому використання навігаційних супутникових систем для керування МА, встановлення його місця розташування, моніторингу стану ґрунтів і картування врожайності на сьогодні набуває все більшої актуальності.

---

## 3. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Технологія вирощування сільськогосподарських культур передбачає послідовне застосування всього комплексу робіт, пов'язаних з отриманням продукції рослинництва. Вона залежить як від біологічних особливостей культур, ґрунтово-кліматичних і погодних умов, так і від технічного оснащення та організаційно-господарських можливостей тощо.

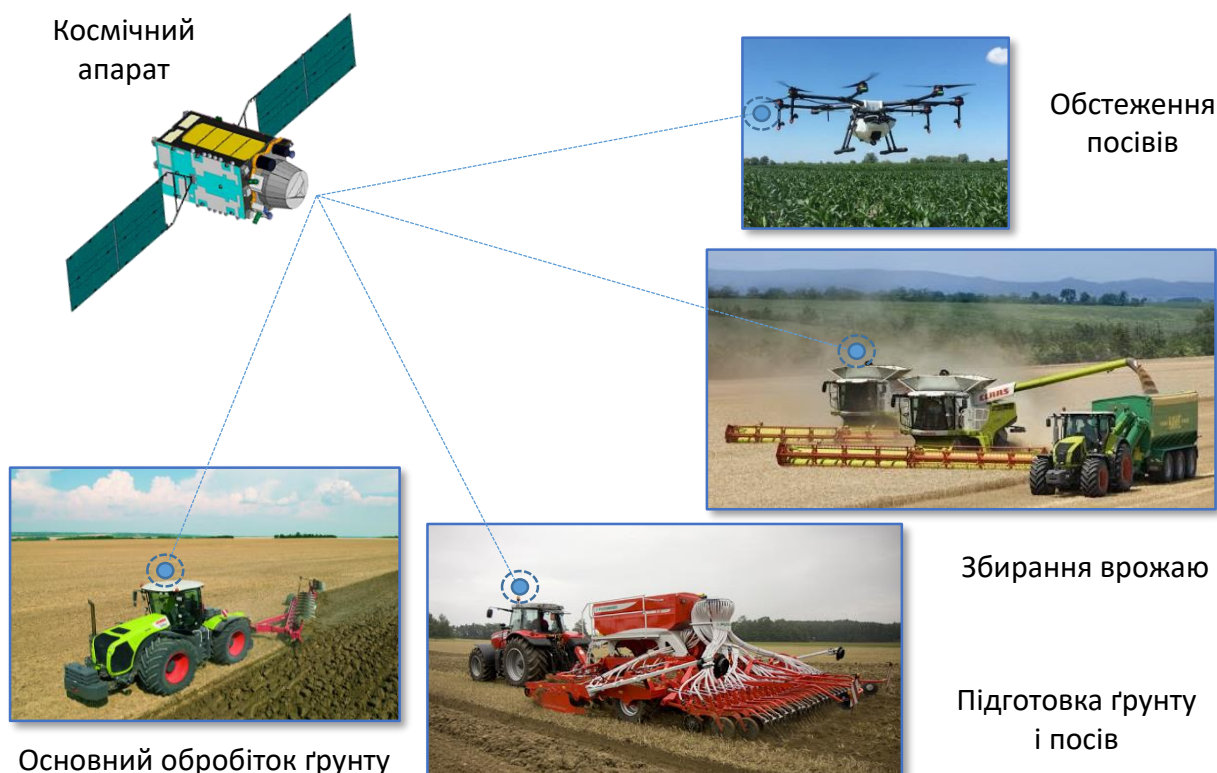
Сучасні технології в рільництві передбачають використання досягнень науки, зокрема використання супутникової навігації (рис. 1), і передового виробничого досвіду, своєчасне та якісне виконання усіх технологічних операцій. Основними блоками в технологіях вирощування культур є: попередники, добір сорту, обробіток ґрунту, підготовка насіння та сівба, системи удобрення та захисту рослин, збирання врожаю.



Отож, раціональне та ресурсозберігаюче землекористування можливе лише за точного місця розташування об'єкта (МА) за допомогою глобальної системи позиціонування з введенням відповідних даних в бортовий комп'ютер.

Дослідженням впливу систем глобального позиціонування на керування машинними агрегатами, встановлення його місця розташування, моніторингу стану ґрунтів і картування врожайності присвячено багато джерел [1-5].

Глобальна система позиціонування (ГСП) – це радіонавігаційна супутникова система для визначення місцезнаходження стаціонарних і мобільних об'єктів в трьох світових координатах (довгота, ширина, висота) з точністю в межах кількох десятків метрів.



**Рис. 1. Схема використання системи глобального позиціонування у технологіях точного землеробства**

Відомі ГНСС (NAVSTAR, GLONASS, GALILEO, BEIDOU) та регіональні навігаційні системи (NavIC, QUASI-ZENITH) з кожним роком розвиваються і удосконалюються. Тому для кращого розуміння процесу позиціонування, прийняття об'єктивних рішень у реалізації технологій ТЗ розглянемо їх особливості та характеристики більш детально.

#### 4. Мета досліджень

Полягає в уточненні і встановленні основних характеристик глобальних навігаційних супутникових систем та їх роль у реалізації технологій точного землеробства.

#### 5. Викладення основного матеріалу

За останнє десятиліття системи глобального позиціонування (визначення точного місця розташування) завоювали величезну популярність у всьому світі. Нині у світі розгорнуто чотири ГНСС, серед яких можна виділити два основних оператора – Global Positioning System NAVSTAR (GPS) розробленою Сполученими Штатами Америки і Глобальна Навігаційна Супутникова Система (GLONASS) – Російською Федерацією.

Система глобального позиціонування GPS була розроблена виключно у військових цілях і використовувалася для передачі сигналів, які могли прийматися одночасно у всіх точках світу. Ідейним

натхненником створення системи GPS-моніторингу вважається Міністерство оборони Сполучених Штатів Америки. Розробка системи почалася в 1973 році, коли Міноборони США перестала влаштовувати вже застаріла на той час радіонавігаційна система, що складалась з двох наземних навігаційних систем Omega і Logan-C, а також супутникової системи Transit. Проект створення нової супутникової мережі, призначеної для визначення точних координат в режимі реального часу і будь-якій точці світу отримав назву NAVSTAR GPS (NAVigation Satellite Timing And Ranging Global Positioning System, що в перекладі звучить як "навігаційна система визначення часу і дальності"). Застосовувана сьогодні абревіатура GPS з'явилася пізніше, коли систему почали застосовувати не тільки у військових цілях в Персидському заливі, Сомалі та на Гаїті, але і в мирних цілях. 27 квітня 1995 року було проголошено, що система GPS повністю працездатна.

NAVSTAR GPS являє собою електронно-технічну систему, яка складається із сукупності наземного і космічного устаткування і призначена для місця розташування висоти і географічних координат, а також параметрів руху: напрямку руху, пройдений шлях, поточна і максимальна швидкість і т.д. для водних наземних і повітряних об'єктів. Тому, всю глобальну навігаційну супутникову систему прийнято ділити на три сегменти: космічний сегмент, сегмент контролю і управління, сегмент користувачів.

Космічний сегмент сучасної системи містить приблизно 32 супутника системи NAVSTAR (рис. 2). Мінімально 24 супутника складають повне "сузір'я" супутників, що працюють в нормальному режимі на орбіті до кінця строку їх експлуатації. Знаходячись на орбіті, на висоті 20200 км (велика напіввісь 26560 км) кожен супутник виконує за день два оберти навколо Землі (один оберт за 11 год 58 хв, швидкість обертання  $\approx 3$  км/с). Вони описують 6 орбітальних траєкторій, на кожній із яких знаходиться 4 і більше супутників. Завдяки цьому, в будь-якій точці земного шару, протягом 24 годин будуть в межах прийому GPS-приймача мінімум 4 супутника. Безперебійну працездатність системи забезпечують 24 супутника, проте, на випадок аварійних ситуацій і збоїв у роботі, загальна кількість супутників системи збільшена до 32.

Всі космічні апарати випромінюють закриті і відкриті сигнали з кодовим поділом каналів (CDMA). Орбітальне угруповання включає космічні апарати чотирьох поколінь: GPS-IIA (1 апарат, строк експлуатації 7,5 років); GPS-IIR, включаючи модифікацію IIR-M (19 апаратів, строк експлуатації 10 років); GPS-IIF (11 апаратів, строк експлуатації 12 років); GPS-IIIА (1 апарат, строк експлуатації 15 років).

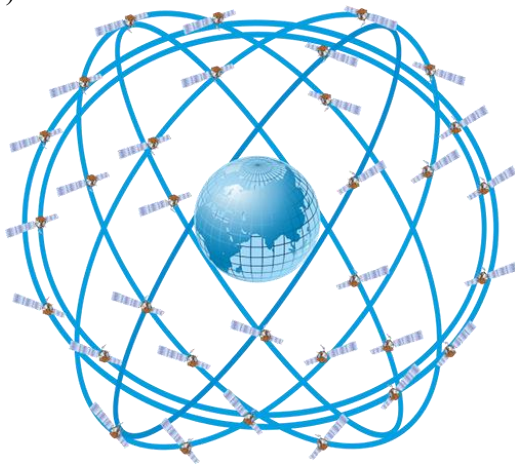


Рис. 2. Схема супутникової системи навігації  
NAVSTAR

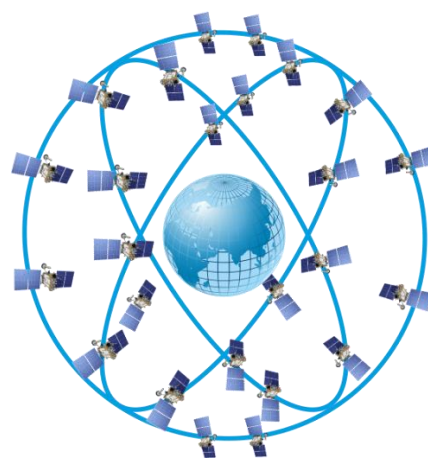


Рис. 3. Схема супутникової системи навігації  
GLONASS

Основним завданням космічного апарату (КА) Block III є надання навігаційних послуг за допомогою нового навігаційного сигналу L1C і підвищення точності ефемеридно-часової інформації, доступності навігаційного сигналу, потужності випромінювання, а також збільшення терміну активного існування до 15 років.

Система GPS забезпечує 100% глобальну доступність навігаційних послуг на кутах місця вище  $5^\circ$ . Середня точність навігації за рахунок самої системи (без урахування помилок приймального обладнання) становить близько 1 м [6]. Відносна стійкість точних характеристик в системі GPS





забезпечується за рахунок наземного комплексу управління з глобальним покриттям орбіт вимірювальними і закладними станціями. Крім того, в контурі управління реалізовані "індивідуальні" для кожного апарату типові цикли управління, що дозволяє оперативно реагувати на виникаючі відхилення в характеристиках того чи іншого космічного апарату.

Послуга стандартного позиціонування SPS і тимчасової синхронізації доступна для всіх категорій споживачів безоплатно глобально і реалізується за допомогою випромінювання усіма космічними апаратами GPS навігаційних радіосигналів, модульованих далекомірним кодом C/A (Coarse/Acquisition – грубий прийом). Код C/A являє собою псевдовипадкові послідовності (ПВП) Голда тривалістю 1023 символу з тактовою частотою 1,023 МГц. Таким чином, ПВП C/A-коду має період повторення  $T=1$  мс, що відповідає інтервалу однозначного виміру псевдодальності близько 300 км. Програма розвитку GPS передбачає надання цивільним споживачам послуги SPS за допомогою сигналів L2C, L5 і L1C [7].

Послуга точного позиціонування PPS реалізується за допомогою випромінювання усіма космічними апаратами орбітального угруповання GPS навігаційних радіосигналів в діапазонах L1 (1575,42 МГц) і L2 (1227,60 МГц), модульованих далекомірним P (Y)-кодом (10,23 МГц). Послуга PPS призначена для використання виключно збройними силами США, федеральними агентствами США і збройними силами союзних країн.

Впровадження нових навігаційних сигналів GPS супроводжується вдосконаленням структури цифрової інформації і застосуванням нових видів модуляції, а також переходом від структури навігаційного повідомлення типу NAV на структуру типу CNAV і CNAV-2.

Навігаційні повідомлення типу CNAV є вдосконаленими версіями навігаційного повідомлення NAV, що дозволяють точніше передавати оперативну і неоперативну інформацію про стан GPS. У навігаційному повідомленні CNAV міститься інформація того ж типу, що і в повідомленні NAV (поточний час, ознаки стану КА, ефемеридно-часова інформація, альманах системи і т.п.), проте ця інформація передається в новому форматі. Замість використання архітектури суперкадрів/кадрів повідомлення передається у вигляді пакетів різної тривалості. Найбільш істотними змінами структури CNAV є розширення кількості космічних апаратів, які будуть використовуватися за цільовим призначенням з 32 до 63 [7], а також можливість оперативно передати дані про працездатність конкретного апарату (цілісності) із затримкою менш як 6 секунд.

Управління орбітальним угрупованням GPS здійснює 2-а оперативна космічна ескадрилья Космічного командування ВПС США. В даний час управління орбітальною угрупованням GPS здійснює наземний комплекс управління 2 покоління (Operational Control Segment – OCS), який включає декілька пунктів керування, із стратегічної точки зору розташованих у різних регіонах планети. Вони розташовані на Гавайських островах, острові Кваджалейн (Kwajalein) в південній частині Тихого океану, на острові Дієго-Гарсія (Diego Garcia) в Індійському океані і на острові Вознесіння в Атлантичному океані. Головна станція керування знаходиться на військовій базі Шрівері (Schriever) в Колорадо Спрингз (Colorado Springs), штат Колорадо.

Наземний комплекс управління GPS реалізує без запиту технологію ефемеридно-часового забезпечення. Глобальна мережа командно-вимірювальних станцій дозволяє здійснювати оновлення інформації на борт з періодичністю 4 – 6 год.

Сегмент користувачів включає GPS обладнання, що використовується цивільним і військовим персоналом. Цивільні GPS-приймачі знаходять широке використання в: геодезії, навігації автомобільного і повітряного транспорту, керуванні залізничним транспортом, туризмі, охоті і також у сільському господарстві.

Глобальна навігаційна супутникова система GLONASS подібна до системи GPS в багатьох відношеннях та управляється космічним агентством уряду Російської Федерації. Великомасштабні роботи зі створення радянської на той час супутникової навігаційної системи почалися в 60-х роках 20 століття. Перший навігаційний супутник "Космос – 192" був виведений на орбіту 23 листопада 1967 року. Точність визначення місцезнаходження цього супутника становила 250 – 300 м. Вже в 1976 році була прийнята в експлуатацію навігаційна система першого покоління, під назвою "Циклон-Цикада", що складається з 6 супутників, які знаходяться на висоті 1000 км. За допомогою неї можна було визначити координати морського судна або підводного човна з точністю до 80 м.

Випробування навігаційної системи, яка одержала назву GLONASS розпочалось 12 жовтня 1982 року запуском супутника "Космос-1413". 24 вересня 1993 року система була офіційно прийнята в експлуатацію з орбітальним угрупованням, що налічувало 12 супутників. Розгортання системи



GLONASS до її штатного складу було завершено в 1995 році, яка включала 24 супутника (рис. 3). Нині це 8 супутників рівномірно розташованих на 3 орбітальних площинах, нахил яких становить  $64,8^\circ$  з періодом обертання 1 год 15хв 44с. Покриття сигналом глобальне, причому одночасно над горизонтом в полі зору приймача знаходиться мінімум 5 супутників в будь-якій з точок земної кулі. Висота орбіти складає 19100 км (велика напіввісь 25420 км) [8]. Угрупування КА обрано таким чином, щоб в процесі експлуатації зберігалася її конфігурація при впливі збурень гравітаційного поля Землі, Місяця, Сонця при відсутності резонансу [9].

Отож, значення періоду дозволило створити стійку орбітальну систему, яка не потребує, на відміну від орбіт GPS, для своєї підтримки коригувальних імпульсів практично протягом всього терміну активного існування. Номінальних нахил забезпечує стовідсоткову доступність навігації на території РФ навіть за умови виходу з орбітального угруповання декількох КА.

На сьогодні GLONASS налічує 28 супутників. Принцип вимірювання місцезонашування об'єктів аналогічний американській супутниковій системі навігації NAVSTAR GPS. Розвитком проекту в даний час займається Федеральне космічне агентство "Роскосмос", а також ВАТ "Інформаційні супутникові системи ім. академіка Решетнева".

Супутники системи GLONASS стало розповсюджують (передають) радіовимірювання двох типів: навігаційний сигнал СТ діапазону L1 (1600,995 МГц) та навігаційний сигнал високої точності ВТ діапазонів L1 і L2 (1248,06 МГц). З 2011 року модернізовані апарати "Глонас-М № 55-61" стали передавати сигнали додатково на частоті L3 (1202,025 МГц).

Як і система GPS, система GLONASS також пропонує навігаційні сигнали для двох рівнів точності позиціонування: навігаційний сигнал стандартної точності СТ (0,511 МГц) (SP) і навігаційний сигнал високої точності ВТ (HP). SP був розроблений для забезпечення позиціонування і отримання сигналів часу, які були б доступні усім цивільним користувачам GLONASS по всьому світу на постійній основі.

Наземний сегмент системи GLONASS складається з таких взаємозалежних стаціонарних елементів: центр управління системою; контрольні станції; командна станція спостереження; квантово-оптичні станції та інші станції спостереження за роботою бортових пристроїв космічних апаратів.

На рис. 4 показана схема розташування станцій наземного сегмента системи ГЛОНАСС.

Росія проводить роботи з розміщення станцій моніторингу та системи диференціальної корекції з метою підвищення надійності і точності роботи російської навігаційної системи за кордоном. Перша така закордонна станція побудована в Бразилії та Антарктиді під назвою "Беллінсгаузен". Число функціонуючих наземних станцій диференціальної корекції налічує порядку 14 – 19 станцій по всій Росії. Подальший розвиток системи передбачає розгортання додаткових станцій на території Росії, а також в зарубіжних країнах, таких як: США, Нікарагуа, Великобританія, Ізраїль, Австралія, Куба, В'єтнам.



**Рис. 4. Розміщення станцій контролю й управління системи GLONASS:**

**ЦУС – центр управління системою GLONASS; ЦС – центральний синхронізатор; КС – контрольна станція; СКФ – система контролю фаз; КОС – квантово-оптична станція; АКП – апаратура контролю простору; КСС – контрольна станція спостереження**



Порівняльна характеристика систем NAVSTAR GPS і GLONASS наведена в таблиці 1.

Таблиця 1

**Характеристики систем позиціонування NAVSTAR GPS і GLONASS**

Назва	NAVSTAR GPS	GLONASS	GALILEO
	Глобальна система позиціонування	Глобальна навігаційна супутникова система	Глобальна система позиціонування
Власник	Міністерство оборони США	Міністерство оборони Росії	Європейський Союз та Європейське космічне агентство
Кількість супутників			
- поточна	32	28	22
- планова	48	32	35
Кількість орбіт	6	3	3
Висота орбіти, км	20 200	19 100	23 222
Велика напіввісь, км	26560	25420	29 640
Період	11 год 58 хв	11 год 15 хв 44 с	14 год 4 хв 45 с
Нахил	55°	64,8°	56°
Система координат	WGS-84	ПЗ-90.11	GTRF
Система часу	UTC	UTC(SU)	GST
Точність у глобальному масштабі, м	≈ 1,0 [1]	≈ 3,0 [5]	≈ 1,0 [8]

Нині більше половини космічних апаратів системи GLONASS працюють понад передбаченого семирічного гарантійного терміну існування.

Система GLONASS забезпечує 100 % глобальну доступність навігаційних послуг на кутах місця вище 5 %. Середня точність навігації за рахунок самої системи (без врахування помилок приймального обладнання) становить близько 3 метрів [3].

Точність визначення координат системи GLONASS на сьогоднішній день поступається показникам американської системи супутникової навігації GPS.

За даними [4] помилка навігаційних визначень GLONASS за широтою і довготою становить 3 – 6 м при використанні 7 – 8 КА. В той же час, помилки NAVSTAR складають 2 – 4 м при використанні в середньому 6 – 11 КА. При одночасному використанні обох космічних систем відбувається суттєвий приріст точності вимірювань координат.

Не дивлячись на те, що російська і американська навігаційні системи дуже схожі, між ними є певні відмінності. Зокрема, є різниця в характері розстановки та рух супутників на орбітах. У комплексі GLONASS вони рухаються за трьома площинах (по вісім супутників на кожену), а в системі передбачається робота в шести площинах (приблизно по чотири на площину). Таким чином, російська система забезпечує більш широке охоплення наземної території, що відбивається і в більш високій точності. Однак на практиці короткострокова «життя» вітчизняних супутників не дозволяє використовувати весь потенціал системи GLONASS. NAVSTAR GPS, в свою чергу, підтримує високу точність за рахунок надлишкової кількості супутників. Проте російський комплекс регулярно вводить нові супутники, як для цільового використання так і в якості резервної підтримки. Також застосовуються різні методи кодування сигналу – американці використовують код CDMA, а в GLONASS – FDMA. При розрахунку приймачами даних для позиціонування російська супутникова система передбачає більш складну модель. В результаті для використання GLONASS необхідно високе споживання енергії, що відбивається в габаритах пристроїв. Також це істотно знижує конкурентоспроможність системи GLONASS на ринку приймачів масового використання.

GLONASS забезпечує більш точне позиціонування в північних широтах, а GPS в середніх. Слід зазначити, що Україна якраз розташована у тих широтах де сигнал супутників GLONASS дуже добрий.

ГНСС GALILEO – проект супутникової системи навігації Європейського Союзу (EU) та Європейського космічного агентства (ESA), який створювався для забезпечення незалежності країн членів в сфері координатно-часового та навігаційного забезпечення. Він є альтернативою американській системі NAVSTAR та російській GLONASS. Проект названий в честь італійського астронома Галілео Галілея.

Мережа GALILEO із самого початку орієнтована на цивільні потреби і побудована на принципах державно-приватного партнерства. Концепція європейської глобальної супутникової системи позиціонування була запропонована спільно Німеччиною, Великобританією, Францією і Італією в 1999 році.

Два перших навігаційних КА були запуснені 20 жовтня 2011 року з допомогою ракети "Союз-СТБ" з космодрому в Куру. Технологія виведення КА GALILEO передбачає групові запуски по два КА на російській ракеті-носії «Союз» і по чотири КА на європейській ракеті "Аріан-5" [7].

Орбітальна побудова GALILEO передбачає, що на орбіті знаходиться 27 активних КА та 3 запасних супутників (рис. 5) на трьох кругових орбітах заввишки 23 222 км (велика напіввісь 29640 км), періодом обертання 14 год 4 хв 45 с нахилом  $56^\circ$  [10]. За цільовим призначенням використовуються 24 КА, один КА в кожній орбітальній площині є резервним. Така конфігурація угруповання була обрана, виходячи з гарантованого забезпечення вимог по точності та доступності при мінімальних витратах на корекцію орбіти за час існування космічного апарату.

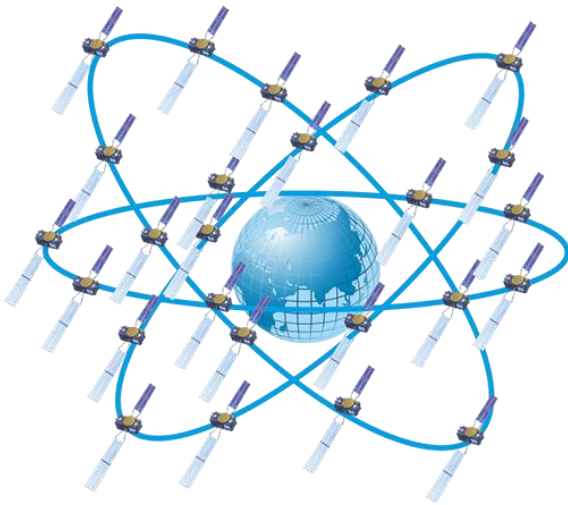


Рис. 5. Схема супутникової системи навігації  
**GALILEO**

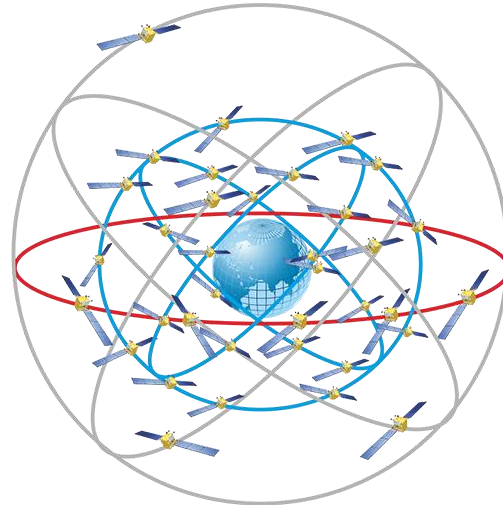


Рис. 6. Схема супутникової системи навігації  
**BEIDOU**

Супутники GALILEO випромінюють навігаційні сигнали з кодовим поділом каналів на трьох частотах: E1 (1575,42 МГц), E5 (1191,79 МГц), E6 (1278,75 МГц). Система прийнята в дослідну експлуатацію.

Наземна інфраструктура включає два (в майбутньому – 3) центри (контури) управління: контур управління космічними апаратами (Ground Control Segment – GCS) і контур ефемеридно-часового забезпечення (Ground Mission Segment – GMS). Наземний комплекс управління побудований з урахуванням вимог учасників програми і має географічно розподілену структуру по території Євросоюзу, включаючи поділ основного і дублюючого центрів управління на центр космічними апаратами і центр рішення цільових завдань. Основна інфраструктура управління розташовується на території Німеччини та Італії, а також у Франції, Іспанії, Великобританії, Голландії і Норвегії.

За даними [4] завдяки доступу до точного сигналу в двох частотних діапазонах користувачі GALILEO отримають інформацію про своє місцезнаходження з точністю 4 м в горизонтальній площині та 8 м у вертикальній з довірчою ймовірністю 0,95.

Після завершення проекту, яке заплановано на 2020 рік, навігаційні сигнали GALILEO забезпечать хороше покриття навіть на широтах до  $75^\circ$  північної широти, а точність визначення місцезнаходження об'єкта сягатиме 1 м [11].

Супутникову систему навігації GALILEO вважають однією із найпрестижніших проектів Євросоюзу. На відміну від NAVSTAR GPS, якій вже 25 років, та GLONASS, GALILEO задумана як цивільна, а не військова навігаційна система.

Характеристика системи позиціонування GALILEO наведена в таблиці 1.

Однією з перспективних навігаційних супутникових систем є китайська, ідею створення якої було запропоновано у 1983 році як китайську регіональну навігаційну систему. За останні 20 років вона пройшла вже три етапи розвитку – від Beidou -1 до Beidou -3.





Перший етап створення системи BEIDOU (Beidou Navigation Test Satellite) скорочено (BDS) було розпочато в 1994 році. Назва BEIDOU, система отримала на честь сузір'я Великої Ведмедиці (Великий ківш), яке з давніх часів використовувалося в навігації для знаходження Полярної Зірки.

У 2000 році було запущено два геостационарних супутника: КА Beidou-1A (30 жовтня 2000) і Beidou-1B (20 грудня 2000). Апарати системи Beidou-1 побудовані на базі зв'язаної геостационарної платформи DFH-3 [12]. 15 грудня 2003 року китайська система BEIDOU першого покоління була здана в експлуатацію. Запуск третього геостационарного супутника Beidou-1C в 2003 році поліпшив експлуатаційні характеристики системи.

Розвиток системи BEIDOU другого покоління Бейдоу-2 почалося в 2004 році (також відома як COMPASS). До кінця 2012 року було запущено ще 14 супутників (5 геостационарних супутників, 5 супутників на похилій геосинхронній орбіті (ГСНО) і 4 супутника на середніх орбітах), що дозволило завершити розгортання орбітального угруповання [12]. Бейдоу-2 була розроблена за принципом сумісності з Бейдоу-1, із застосуванням схеми пасивного позиціонування, що дозволяло їй забезпечувати користувачів в країнах Азіатсько-тихоокеанського регіону послугами визначення місця розташування, швидкості, часу, широкодіапазонних диференціальних поправок і відправки коротких повідомлень.

Третій етап – це створення системи третього покоління Бейдоу-3, розпочато в 2009 році. Основною метою було забезпечення до 2018 року основних послуг для користувачів, що знаходяться на території та акваторії обох Шовкових шляхів (сухопутного і водного), а також сусідніх регіонів, і завершення розгортання орбітального угруповання з 35 КА, призначеної для забезпечення послугами користувачів глобально до 2020 року.

Космічний сегмент BEIDOU являє орбітальне угруповання змішаного типу, що складається з КА на орбітах 3 типів (рис. 6). Заплановано, що у 2020 році орбітальне угруповання BEIDOU буде складатися з 35 космічних апаратів, з яких 5 Beidou-G перебуватимуть на геостационарній орбіті (точки 58,75° сх. Д., 80° сх.д., 110,5° сх. Д., 140° сх. Д. і 160° сх.д.), 27 Beidou-M – на середній круговій орбіті (висота 21500 – 21528 км, період обертання 12 год 53 хв, нахил 55°) і 3 Beidou-IGSO – на геосинхронних похилих високих орбітах (в трьох площинах, висотою орбіти 35786 км, нахилом 55°), підсупутникові точки яких рухаються на поверхні Землі по одній «трасі» у формі вісімки, вісь симетрії якої знаходиться на довготі 118° східної довготи [12]. Це забезпечить перехід системи BEIDOU від статусу регіональної до глобальної системи супутникової навігації.

КА системи Бейдоу-2, які знаходяться в експлуатації, передають сигнали B1 і B2, що дозволяє надавати відкриті безкоштовні послуги в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні. Передбачається випромінювання навігаційних радіосигналів в трьох частотних діапазонах B1(1575,42МГц), B2 (1191,79 МГц) і B3 (1268,52 МГц), розташованих в тих же областях L-діапазону, що і сигнали інших ГНСС.

Після запуску в 2015 році КА нового покоління керівництво програмою Бейдоу повідомило про зміну структури навігаційного сигналу B1: зміщення центральної частоти з 1561,098 МГц на 1575,42 МГц (як у цивільних сигналів GPS L1 і Galileo E1) і зміна модуляції QPSK на MBOC (аналогічну модуляції майбутнього сигналу GPS L1C і Galileo E1). Це направлено на забезпечення взаємодоповнюваності системи BEIDOU з ГНСС ГАЛІЛЕО і GPS.

Станом на кінець жовтня 2019 року 34 КА системи BEIDOU використовуються в штатному режимі для надання послуг користувачам по всьому світу, з них 15 КА – супутники BDS другого покоління (BDS-2), а 19 КА – третього.

Наземний комплекс управління BEIDOU побудований за класичною централізованою схемою: мережа вимірювальних станцій формує відліки первинних вимірювань навігаційних параметрів радіосигналів навігаційних космічних апаратів і передає їх в центр управління системою, в якому формується інформація, що надсилається на борт космічних апаратів за допомогою спеціальних наземних станцій.

Станції стеження обладнані двочастотними приймачами UR240 і антенами UA240, розробленими китайською компанією UNICORE і здатними приймати сигнали систем NAVSTAR GPS та BEIDOU. 7 з них розміщені в Китаї: у Ченду (CHDU), Харбіні (HRBN), Гонконгу (HKTU), Лхасі (LASA), Шанхаї (SHA1), Ухані (CENT) і Сівні (XIAN); і ще 5 – в Сінгапурі (SIGP), Австралії (PETH), ОАЕ (DHAB), Європі (LEID) і Африці (JOHA) [10].

Характеристика системи BEIDOU наведена в таблиці 2.



На сьогодні межі надання послуг позиціонування системою BEIDOU продовжують розширятись. Точність позиціонування системи для цивільного населення в середньому становить менше 10 метрів (Бейдоу-2) [5].

Зона покриття сигналів B1i і B3l, раніше доступних лише в Азіатсько-Тихоокеанському регіоні, розширилася до всієї поверхні земної кулі. Продовжують поліпшуватися параметри точності та доступності. За умови геометричного фактору точності просторових координат (PDOP) менше або дорівнює шести, показник доступності перевищує 99 % в більшості регіонів світу (в деяких районах США – понад 97 %). У глобальному масштабі при 95 % доступності середнє значення похибки визначення місцезнаходження становить приблизно 3,6 м в горизонтальній площині і 6,6 м – у вертикальній [13], похибки визначення швидкості – приблизно 0,05 м/с, а тимчасового відхилення – приблизно 9,8 наносекунд. У той же час, нові сигнали КА третього покоління B1C і B2a мають глобальне покриття. Показник доступності перевищує 87 % за умови геометричного PDOP менше або дорівнює шести. При 95 % доступності середнє значення похибки визначення місцезнаходження становить приблизно 2,4 м в горизонтальній площині і 4,3 м – у вертикальній, похибки визначення швидкості – приблизно 0,06 м/с, а тимчасового відхилення – близько 19,9 наносекунд [13].

Таблиця 2

Характеристика системи позиціонування BEIDOU

Назва	BEIDOU		
	Навігаційна супутникова система		
Головний підрядник	Китайська академія космічних технологій CAST		
Орбітальне угруповання	Геостационарне угруповання	Середні кругові орбіти	3 нахилом геосинхронні орбіти
Кількість супутників	5	27	3
Загальна кількість супутників	35		
Кількість орбіт		3	3
Висота орбіти, км	35 786	21 500 – 21 528	35 786
Велика напіввісь, км			
Період	24 год	12 год 53 хв 44 с	24 год
Нахил	0	55°	55°
Система координат	CGCS2000 (China Geodetic Coordinate System 2000)		
Система часу	BDT		
Точність, м	< 10 3,6 (B1i B2) і 2,4 (B1C і B2a) [11]		
- у цивільних цілях			
- у глобальному масштабі			

Супутникова навігаційна система BEIDOU забезпечує безперервне цілодобове навігаційне поле із прийнятними значеннями геометричного фактору для регіону до 60 градусів північної широти та від 20 до 180 градусів східної довготи, тобто у тому числі на території України.

Варто згадати про дві регіональні системи, які також розгорнуті в Південно-Східній Азії. Це "Індійська регіональна навігаційна система" (NAVIC, Navigation With Indian Constellation), яка в минулому мала абревіатуру IRNSS (Indian Regional Navigation Satellite System), та "Японська Квазі-зенітна супутникова система" (QZSS, QUASI-ZENITH Satellite System).

Створення супутникової системи регіональної навігаційної IRNSS було розпочато у травні 2006 р урядом Індії. Розробка здійснювалась Індійською організацією космічних досліджень (ISRO). У 2016 році система отримала нову назву – NavIC. Система забезпечує лише регіональне покриття самої Індії і частини суміжних держав.

Супутникове угруповання NavIC передбачає 8 супутників на орбітах на висоті близько 36000 км (рис. 7). 3 супутника перебувають на геостационарній орбіті в точках стояння 32,5°, 83° і 129,5° східної довготи, а 5 супутників розміщені на похилій геосинхронній орбіті з нахилом до 29° по відношенню до екваторіальної площини, по два на позиціях 55° і 111,75° східної довготи [14]. Така побудова орбітального угруповання забезпечує цілодобову постійну видимість всіх космічних апаратів над територією Індії і більшої частини Індійського океану. Всі вони мають постійний радіозв'язок з індійськими наземними керуючими станціями.

Наземний сегмент системи складається з рівномірно розподілених по території Індії 16 станцій збору вимірювань та моніторингу цілісності, чотирьох станцій вимірювання дальності, центру синхронізації системи, центру керування супутниками та навігаційного центру системи NavIC, в який входить центр обробки інформації.

NavIC передбачає визначення координат місцезнаходження об'єкта з точністю близько 20 метрів для регіону Індійського океану (близько 1500 км навколо Індії) і менше 10 метрів – безпосередньо з Індії і територіями суміжних держав, охопленим даною системою навігації. Сигнал передається в L5-діапазоні на частоті 1176,45 МГц і в S-діапазоні на частоті 2492,028 МГц [5, 14]. Послуга надається в двох варіантах: стандартний (SPS, Special Positioning Service) – для всіх цивільних користувачів; і службовий, з більш точними даними (PS, Precision Service) – для авторизованих користувачів (у тому числі для військових цілей).

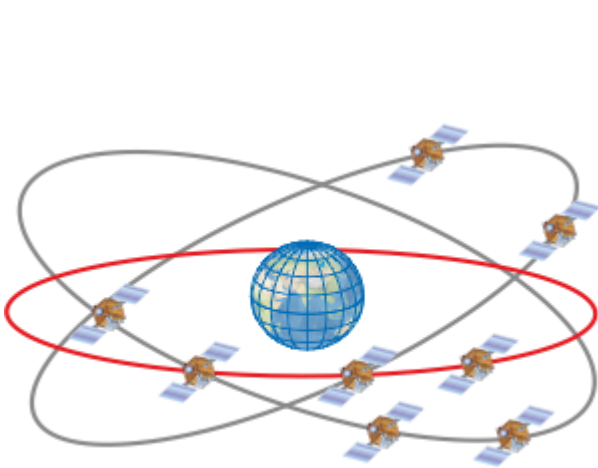


Рис. 7. Схема супутникової системи навігації  
NavIC

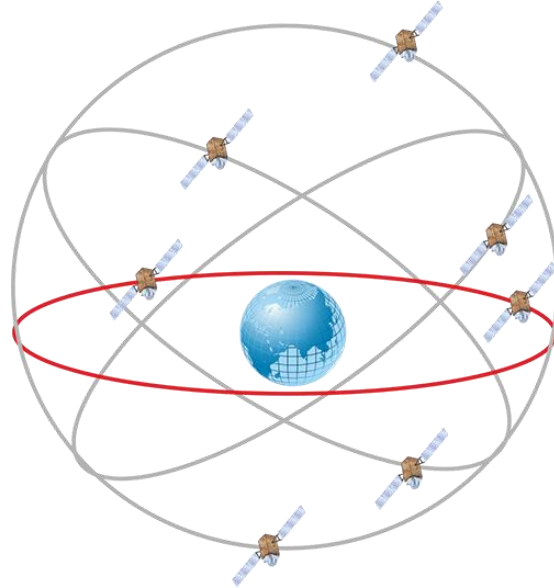


Рис. 8. Схема супутникової системи навігації  
QUASI-ZENITH

В системі NavIC використовується Всесвітня геодезична система (World Geodetic System – WGS-84).

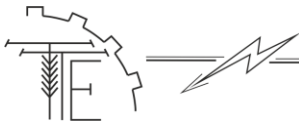
Подальший розвиток NavIC передбачає збільшення угруповання до 11 КА.

QUASI-ZENITH Satellite System (QZSS) – проект регіональної трьохсупутникової системи синхронізації часу і одна з систем диференціальної корекції для GPS, сигнали якої доступні в Японії.

Спочатку Японська QZSS була задумана (2002 р.) як комерційна система з набором послуг для рухомого зв'язку, мовлення та широкого використання для навігації в Японії та сусідніх районах Південно-Східної Азії. Супутники регіональної системи знаходилися на високій еліптичній орбіті "Тундра", які дозволяють супутнику триматися більше 12 годин в день з кутом піднесення більше 70° (тобто більшу частину часу супутник знаходиться практично в зеніті). Цим і пояснюється термін "quasi-zenith", тобто «той, що знаходиться в зеніті», який і, власне, дав назву системі.

Перший космічний апарат Michibiki (в перекладі означає «денне світло») був успішно запусканий на навколосезну орбіту у вересні 2010 р. Завершення льотних випробувань дозволило ввести QZSS в дослідну експлуатацію 22 червня 2011 року з наданням послуг за допомогою навігаційних радіосигналів L1C/A (1575,42 МГц) і L2C (1227,60 МГц) GPS, а 11 липня 2011 року – послуг за допомогою радіосигналів L1C і L5 (1176,45 МГц) [15].

Програма розвитку системи QZSS передбачає створення угруповання з 4 КА, 3 з яких (КА QZS-1, -2, -3) передбачається розмістити на квазізенітних орбітах (нахил  $43^\circ \pm 4^\circ$  до екватора) в трьох орбітальних площинах. При цьому орбітальні площини будуть рознесені на  $120^\circ$  [15]. Таким чином, кожен з супутників повинен знаходитися над територією Японії протягом 8 годин щодоби (кут місця становить мінімум  $60^\circ$ ). 1 КА планується розмістити на геостационарній орбіті. У проект створення системи також закладена можливість подальшого розширення угруповання до 7 КА.



В системі QZSS використовується Японська геодезична система JGS (Japanese geodetic system), близька за параметрами до ITRF. Параметри основного еліпсоїда JGS відповідають геодезичній системі координат 1980 р включаючи положення гравітаційного центру Землі і орієнтацію осей.

Супутники QZSS дуже точні, вони дозволяють встановлювати розташування приймача з точністю в кілька сантиметрів. Тестування Michibiki показало, що після корекції він забезпечує точність позиціонування з невеликою похибкою не більше 1,3 сантиметрів у горизонтальному напрямку і близько 2,9 сантиметрів у вертикальному [16]. З підвищенням точності координат розширюються і можливості застосування супутникової навігації: наприклад, таку високоточну систему можна використовувати для автоматичного руху автомобілів і сільгосптехніки.

Таким чином система Quazi-Zenith Satellite System (QZSS) – унікальна японська система передачі поправок для навігаційних сигналів GPS, яка чимось нагадує американський аналог WAAS і європейської EGNOS. Іншими словами: QZSS – не система глобального позиціонування, на подібні GPS, а регіональна (чинна на території Японії) система обчислення і передачі поправок для GPS споживачів через супутниковий канал.

Розглянувши ГНСС та регіональні системи, можна відзначити, що на ринку навігаційних систем станом на 2020 рік представлено два основних оператора з надання навігаційних сигналів – NAVSTAR GPS і GLONASS та ті, що стрімко розвиваються – GALILEO і BEIDOU з великими амбіціями та потенціалом. Конкуренція доволі мала, тому поява нових операторів лише позитивно відобразиться на ринку надання навігаційних послуг, подальшим зниженням цінової політики і підвищенням точності результатів.

З виконаного аналізу ГНСС можна зробити висновок, що точність позиціонування машинних агрегатів для реалізації технологій ТЗ в межах 2 – 4 м недостатня. Вона спричинена цілим рядом факторів, а саме: багатопроменевість розповсюдження сигналу, точність годинника встановленого на супутнику, атмосферні явища, орбіта супутника, похибка у розрахунках місця розташування рухомого об'єкта, GPS-приймачі (характеристики антени, радіочастотна частина приймача, контури стеження). Тому для підвищення точності систем використовують метод диференційної корекції. Використання методу диференційної корекції для підвищення точності GPS привело до появи так званої диференційної глобальної системи позиціонування (Differential Global Positioning System, DGPS).

Диференційна глобальна система позиціонування (Differential Global Positioning System, DGPS) – відкоригована радіонавігаційна супутникова система для визначення місцезнаходження стаціонарних і мобільних об'єктів у світових координатах з точністю в межах кількох десятків сантиметрів. Її суть полягає у використанні двох приймачів – один нерухомо знаходиться в точці з відомими координатами і називається «базовим», а другий є мобільним (пересувним). Дані, отримані базовим приймачем, використовуються для корекції інформації, зібраної пересувним апаратом.

Нині у світі існує ряд безкоштовних широкозонних підсистеми супутникової навігації, які включають ряд геостационарних супутників чи наземних базових станцій, а саме: WAAS, WAGE, Starfire (США), СДКМ (РФ), EGNOS, OmniSTAR (Європа), SNAS (Китай), MSAS (Японія), GAGAN (Індія) тощо. Вони дозволяють забезпечити точність позиціонування рухомих об'єктів в межах кількох десятків сантиметрів. Є також безкоштовні пропозиції від GLIDE, E-Diff, onPath, SF1 які забезпечують точність від 10 до 40 см. Наприклад, застосування європейського додатку EGNOS (40 наземних приймачів і 3 геостационарних супутника) підвищує точність до 1 м, а в спеціальних режимах вона буде доведена до 10 см [4]. Така точність ( $\pm 10$  см) дозволяє аграріям реалізувати контроль за швидкістю переміщення техніки при виконанні польових робіт та виконання таких операцій як: обробіток ґрунту, обприскування, внесення добрив, посів, скошування, збиральні роботи.

При необхідності можна підключити більш точні платні сервіси, які використовують спеціальні наземні станції (RTK, Rover) і супутники, завдяки чому точність складатиме від 2 до 20 см. Така точність дозволить, окрім вище зазначених операцій, здійснювати смуговий обробіток ґрунту (технологія Strip-till), можливість відімкнення секцій сівалки на перекриттях, диференційоване внесення мінеральних добрив, ЗЗР, автоматичне відключення секцій обприскувача тощо. До таких сервісів підписки можна віднести: OmniSTAR з кількома рівнями точності VBS (20 см), G2 і XP (10-15 см), HP (5-10 см); Satcor 5 (5 см) та Satcor 15 (15 см) (Claas); SF3 (3 см) і RTK (2,5 см) (John Deere); Trimble RTX Range Point (< 20 см), RTX Center Point Sat (4 см), RTK (2 см); Terra Star (4 см) тощо [17]. Річна підписка з радіусом дії до 50 км на VBS коштує 1000-1100 Eu (1 рік) і 570 Eu (3 міс.), на рівень точності XP – 2686 Eu (1 рік) і 1530 Eu (3 міс.) [18]. Щоб скористатись сервісом VBS G2, XP і HP





потрібно мати GPS-приймач, що підтримує такі послуги, або модернізувати GPS-приймач початкового рівня, додавши до нього спеціальну антену і програмне забезпечення.

Навігаційні підсистеми, якими оснащується сільськогосподарська техніка, включає в себе багатоканальні GPS/GLONASS-приймачі, що підключені до бортового комп'ютера з програмним забезпеченням, необхідного для виконання розрахунків. Даний комплекс дозволяє вести запис поточних координат агрегату, його висоти та інших параметрів із будь-якими заданими інтервалами часу. При цьому фіксація навігаційних даних проводиться в широко відомих форматах ESRI Shapefile і Mapinfo, що дозволяє імпортувати їх в офісні геоінформаційні системи для подальшої обробки і виконання потрібних розрахунків.

Нині в Україні діє мережа еталонних станцій System.net, що належить компанії «Систем Солюшнс», яка входить до складу швейцарської компанії Leica Geosystems. Базові RTK-станції знаходяться по всій країні. 112 станцій на території України включені як в європейську, так і в світову мережу [19]. Тобто офіси спостереження і контролю потоків даних знаходяться в Європі, і в США. Будь-який приймач на техніці, передає своє приблизне місцезнаходження на сервер, який розраховує його приблизні координати і повертає точні координати на приймач користувача. System. Net використовує обладнання від компанії Leica Geosystems, яка є одним з підрозділів компанії Hexagon.

Таким чином, узагальнюючи щодо навігаційних підсистем диференційної корекції, на сьогодні існує цілий ряд сервісів, які дозволяють реалізувати задачі прецизійного водіння, а відтак, і забезпечення точного внесення посівного матеріалу, добрив і гербіцидів з метою їх економії, точного міжрядного обробітку технічних культур, точного збирання врожаю та ін., при виконанні агротехнологічних операцій з використання наземної техніки і БЛА.

Такий елемент системи ТЗ як паралельне водіння агрегатів на базі GPS навігації є економічно доцільною технологією для сучасного рільництва. Він націлений на економію засобів і часу, підвищення якості продукції і врожайності.

Дослідження роботи МА при виконанні технологічних операцій, які були обладнані системами паралельного водіння, в ряді різних господарств дозволяють зробити висновок, що дані системи дозволяють виключити вплив "людського фактору" і зменшити величину огріхів при обробітку на 5...10 % і перекриттів на 15...20 % [20].

Завдяки використанню курсовказівників чи автопілотів зменшуються витрати палива, добрива та насіння до 20 %. Також, внаслідок відімкнення секцій сівалки на перекриттях, у тому числі на полях неправильної конфігурації, можна зекономити 2 – 3 % посівного матеріалу [21]. Диференційоване внесення добрив з використанням систем навігації дозволяє підвищити врожайність сільськогосподарських культур від 10 до 20 % [22], залежно від ґрунтово-кліматичних умов; зменшити затрати мінеральних добрив від 5 до 20 % [23] та оптимізувати використання техніки.

## 5. Висноки

Проведений аналіз функціональних особливостей ГНСС та регіональних навігаційних систем дає підстави для таких висновків:

1. Нині можна виділити два основних оператора навігаційних супутникових систем NAVSTAR і GLONASS, які подібні у багатьох відношеннях. Серед відмінних особливостей можна відмітити характер розташування, рух супутників на орбітах та їх загальна кількість, методи кодування сигналу CDMA і FDMA, використання різних систем координат WGS-84 і ПЗ90.11. Що стосується двох інших ГНСС GALILEO і BEIDOU, так вони стрімко розвиваються з великими амбіціями та потенціалом.

2. Точність визначення координат системи GLONASS на сьогоднішній день поступається показникам американської системи супутникової навігації GPS. Помилка навігаційних визначень GLONASS за широтою і довготою становить 3 – 6 м при використанні 7 – 8 КА. В той же час, помилки NAVSTAR складають 2 – 4 м при використанні в середньому 6 – 11 КА. При одночасному використанні обох космічних систем відбувається суттєвий приріст точності вимірювань координат. GLONASS забезпечує більш точне позиціонування в північних широтах, а GPS в середніх.

3. Точність позиціонування машинних агрегатів для реалізації технологій точного землеробства недостатня. Вона спричинена цілим рядом факторів, а саме: багатопроменевість розповсюдження сигналу, точність годинника встановленого на супутнику, атмосферні явища, орбіта супутника, похибка у розрахунках місця розташування рухомого об'єкта, GPS-приймачі.

4. Диференційну корекцію сигналів здійснюють за допомогою безкоштовних широкозонних підсистем супутникової навігації, які включають ряд геостационарних супутників чи наземних базових станцій, а саме: WAAS, WAGE, Starfire, СДКМ, EGNOS, OmniSTAR. Вони дозволяють



забезпечити точність позиціонування рухомих об'єктів в межах кількох десятків сантиметрів. Платні сервіси (OmniSTAR VBS, G2, XP, HP; Satcor 5 s 15; Trimble RTX Range Point, RTX Center Point Sat, RTK; Terra Star, SF3), які використовують спеціальні наземні станції (RTK, Rover) і супутники, дозволяють отримувати точність від 2 до 20 см.

5. Завдяки наявності навігаційних підсистем диференційної корекції, на сьогодні існує цілий ряд сервісів, які дозволяють реалізувати задачі прецизійного водіння, а відтак, і забезпечення точного внесення посівного матеріалу, добрив і гербіцидів з метою їх економії, точного міжрядного обробітку технічних культур, точного збирання врожаю та ін., при виконанні агротехнологічних операцій з використання наземної техніки і БЛА.

### Список літератури

1. Новітні технології у рослинництві / В.Д. Паламарчук, І.С. Поліщук, В.А. Мазур, О.Д. Паламарчук. Вінниця, 2017. 602 с.
2. Система точного землеробства / Л.В. Аніскевич, Д.Г. Войтюк, Ф.М. Захарін, С.О. Пономаренко. К: НУБіП Україна, 2018. 566 с.
3. Ревнивых С.Г., Косенко В.Е. Состояние и развитие спутниковых навигационных систем. *XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019 : Труды (17-20 июня 2019 г.)*. Москва : ИПУ РАН, 2019. С. 1317–1322.
4. Ярош С.П., Буданов М.С., Гапонов О.Ю., Флячок Ю.О. Застосування глобальних систем визначення місцеположення для підвищення бойових можливостей зенітних ракетних військ. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. 2019. Вип. 2(60). С. 33–42.
5. Ткаченко В. GPS і всі-всі-всі. *Мережі та Бізнес*. 2019. № 3(106). С. 79–83.
6. Ken A., United States of America Global Positioning System (GPS). *Доклад на 13-м засіданні Міжнародного комітету по ГНСС, Сянью, Китай, (5-9 листопада 2018)*. 2018. URL: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/meetings/icg-13/icg-annual-meeting-2018-presentations.html> (дата звернення 30.03.2020)
7. Глобальна навігаційна супутникова система GPS. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/gps.php> (дата звернення 26.03.2020)
8. Глобальна навігаційна супутникова система GLONASS. URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/glonass> (дата звернення 26.03.2020)
9. Revnivkykh S., Information Satellite Systems GLONASS Status and Evolution. *Доклад на 12-й Ежегодной Бакинской Конференции по ГНСС, Баки, Азербайджан, (7 мая 2018)*. 2018.
10. Глобальна навігаційна супутникова система GALILEO . URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/galileo.php> (дата звернення 26.03.2020)
11. Супутникова навігація: основні принципи роботи . URL: [https://око.укр/articles/GPS\\_GLONASS\\_AGPS\\_RTK/](https://око.укр/articles/GPS_GLONASS_AGPS_RTK/) (дата звернення 24.03.2020)
12. Глобальна навігаційна супутникова система BEIDOU . URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php> (дата звернення 05.04.2020)
13. *Directions 2020: BeiDou in the new era of globalization* . URL: <https://www.gpsworld.com/directions-2020-beidou-in-the-new-era-of-globalization/> (дата звернення 28.03.2020)
14. Глобальна навігаційна супутникова система NavIC . URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/navic.php> (дата звернення 05.04.2020)
15. Глобальна навігаційна супутникова система QZSS . URL: <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/qzss.php> (дата звернення 05.04.2020)
16. Quasi-Zenith Satellite System (QZSS) . URL: <https://qzss.go.jp/en/index.html> (дата звернення 05.04.2020)
17. Платные сигналы omnistar, trimble rtx, rtk и terra star . URL: <https://geoagronavt.com.ua/g2897460-platnye-signalny-omnistar> (дата звернення 08.04.2020)
18. Супутникова система диференційної корекції OmniSTAR . URL: <http://www.kmcgeo.com/Articles/Omnistar.htm> (дата звернення 08.04.2020)
19. Станції точного позиціонування, польові лабораторії, сканери ґрунту і інші рішення для українських фермерів . URL: <https://systemnet.com.ua/ua/gmsp/> (дата звернення 20.03.2020)
20. Melnik V., Tsyganenko M., Anikeev A., Sirovitskiy K. Экономическая эффективность элементов системы точного земледелия. *Motrol: Commission of Motorization and Energetics in Agriculture*. 2015. Vol. 17, № 3. P. 61–66.



21. Як почати впроваджувати точне землеробство на підприємстві . URL: <https://smartfarming.ua/ua-blog/kak-nachat-vnedryat-tochnoe-zemledelie-na-predpriyatii> (дата звернення 10.04.2020)
22. Циганенко М., Макаренко М. Система точного землеробства економить ваші гроші. *Пропозиція*. 2017. № 2. С. 56–59.
23. Климова Н.В., Трубачева Е.А. Экономический рост сельскохозяйственных предприятий на основе внедрения инновационных ресурсосберегающих технологий. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2016. № 4. С. 22–34.

### References

- [1] Palamarchuk, V.D., Polishchuk, I.S., Mazur, V.A., Palamarchuk, O.D. (2017). *Novitni tekhnolohiyi u roslynnytstvi*. Vinnytsya. [in Ukrainian].
- [2] Aniskevych, L.V., Voytyuk, D.H., Zakharin, F.M., Ponomarenko, S.O. (2018). *Systema tochnoho zemlerobstva*. Kyiv: NUBiP Ukrayina. [in Ukrainian].
- [3] Revniviykh, S.H., Kosenko, V.E. (2019). Stan ta rozvytok sprytnykovykh navihatsiynykh system. [Status and development of satellite navigation systems]. *XIII Vserossyyskoe soveshchanye po problemnomu upravlinnyu VSPU-2019: Trudy (17-20 lyunya 2019 r.)*. 1317–1322. [in Russian].
- [4] Yarosh, S.P., Budanov, M.S., Haponov, O.YU., Flyachok, YU.O. (2019). Zahal'noyevropeys'kyi hlobal'nyy systemnyy vlasnyy zhytel' dlya velykykh boyovykh mozhlyvostey zelenykh raketnykh viys'k. *Zbirnyk naukovykh pratsivnykh Kharkivs'koho natsional'noho universytetu Povitryanykh Syl*. 2 (60). 33–42. [in Ukrainian].
- [5] Tkachenko, V. (2019). GPS i vsi-vsi. *Merezhi ta Biznes*. 3(106). 79–83. [in Ukrainian].
- [6] Ken, A. (2018) Hlobal'na systema pozytsionuvannya (GPS) Spoluchenykh Shtativ Ameryky. *Doklad na 13-mu zasidanni Mizhnarodnyy komitet po HNSS, Sian', Kytay, (5-9 lystopada 2018 roku)*. URL: <http://www.unoosa.org/oosa/en/ourwork/icg/zborny/icg-13/icg-shchorichna-zustrich-2018-rezentatsiyi.html> [in English].
- [7] Hlobal'na navihatsiyna suputnykova systema GPS [Global GPS Navigation Satellite System]. Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/gps.php> [in Russian].
- [8] Hlobal'na navihatsiyna suputnykova systema GLONASS [GLONASS Global Navigation Satellite System]. Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/glonass>. [in Russian].
- [9] Revniviykh S., (2018). Informatsiyni suputnykovi systemy. Stan ta evolyutsiya HLONASS. *Doklad na 12-y Yezhehodnoyi bashkivs'koyi konferentsiyi po HNSS (7 travnya 2018)*. Bashka. [in English].
- [10] Hlobal'na navihatsiyna suputnykova systema GALILEO [GALILEO Global Navigation Satellite System]. Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/galileo.php> [in Russian].
- [11] Suputnykova navihatsiya: osnovni pryntsyropy roboty [Satellite Navigation: Basic Principles of Operation]. Retrieved from [https://oko.ukr/articles/GPS\\_GLONASS\\_AGPS\\_RTK/](https://oko.ukr/articles/GPS_GLONASS_AGPS_RTK/) [in Ukrainian].
- [12] Hlobal'na navihatsiyna suputnykova systema BEIDOU [BEIDOU Global Navigation Satellite System]. Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/beidou.php> [in Russian].
- [13] Napryamky 2020: BeiDou v noviy eri hlobalizatsiyi. Retrieved from <https://www.gpsworld.com/directions-2020-beidou-in-the-new-era-of-globalization/> [in English].
- [14] Hlobal'na navihatsiyna suputnykova systema NavIC [Navic Global Navigation Satellite System]. Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/navic.php> [in Russian].
- [15] Hlobal'na navihatsiyna suputnykova systema QZSS [QZSS Global Navigation Satellite System]. Retrieved from <https://www.glonass-iac.ru/guide/gnss/qzss.php> [in Russian].
- [16] Quasi-Zenith Satellite System (QZSS). Retrieved from <https://qzss.go.jp/en/index.html> [in English].
- [17] Platni syhnaly omnistar, trimble rtx, rtk ta terra star [Paid signals omnistar, trimble rtx, rtk and terra star]. Retrieved from <https://geoagronavt.com.ua/g2897460-platnye-signaly-omnistar> [in Ukrainian].
- [18] Sputnykova systema dyferentsial'noyi korrektsiyi OmniSTAR [OmniSTAR Satellite Differential Correction System]. Retrieved from <http://www.kmcgeo.com/Articles/OmniSTAR.htm> [in Ukrainian].
- [19] Stantsiyi tochnoho pozytsionuvannya, polevi laboratoriyi, skanery poshty ta inshi rishennya dlya ukraiyins'kykh fermeriv [Precision positioning stations, field laboratories, soil scanners and other solutions for Ukrainian farmers]. Retrieved from <https://systemnet.com.ua/ua/gmisp/> [in Ukrainian].
- [20] Mel'nyk, V., Tsyhanenko, M., Anikayev, A., Syrovyts'kyi, K. (2015). Ekonomichna efektyvnist' elementiv elementiv tochnoho zemledeliya. *Motrol: vvedennya v ekspluatatsiyu motoryzatsiyi ta enerhetyky v sil's'komu hospodarstvi*. (17), 3. 61–66. [in Ukrainian].





- [21] Yak pochaly vprovadzhuvaty tochno zemlerobstvo na pidpryyemstvi [Getting Started with Precision Farming at Enterprise]. Retrieved from <https://smartfarming.ua/ua-blog/kak-nachat-vnedryat-tochnoe-zemledelie-na-predpriyatii> [in Ukrainian].
- [22] Tsyhanenko, M. (2017). Makarenko M. Systema tochnoho zemlerobstva ekonomyt' svoyi hroshi. *Propozytsiya*. 2. 56–59. [in Ukrainian].
- [23] Klymova, N.V., Trubacheva, E.A. (2016) Ekonomichnyy rist sil's'kohospodars'kykh pidpryyemstv na bazi vnedrenykh innovatsiynykh resursivsberehayuchykh tekhnolohiy. *Ekonomika: vchora, s'ohodni i zavtra*. 4. 22–34. [in Ukrainian].

## ГЛОБАЛЬНЫЕ НАВИГАЦИОННЫЕ СПУТНИКОВЫЕ СИСТЕМЫ И ИХ РОЛЬ В ТЕХНОЛОГИЯХ ТОЧНОГО ЗЕМЛЕДЕЛИЯ

Сегодня глобальные навигационные спутниковые системы внедряются во многих структурных звеньях хозяйственного комплекса Украины, многих сферах человеческой деятельности, и с каждым годом приобретают дальнейшего развития. Одной из характерных черт данных спутниковых систем являются требования к точности и скорости полученных данных. Именно они дают возможность уменьшить эксплуатационные расходы и повысить эффективность использования техники и других ресурсов.

Поэтому использование навигационных спутниковых систем для управления машинными агрегатами, установления его места расположения, мониторинга состояния почв и картирование урожайности на сегодня приобретает все большую актуальность.

Объектом исследования в данной статье были глобальные навигационные спутниковые системы NAVSTAR GPS (США), GLONASS (РФ), GALILEO (Евросоюз), BEIDOU (Китай) и региональные навигационные системы NavIC (Индия) и QUASI-ZENITH (Япония).

Цель работы заключалась в уточнении и установлении основных характеристик глобальных навигационных спутниковых систем и их роль в реализации технологий точного земледелия.

Задачей работы предполагалось: проанализировать функциональные характеристики спутниковых систем глобального позиционирования и их основных элементов; выяснить принципы работы систем: навигации, координат, времени; установить точность работы систем навигации; обосновать роль спутниковых систем глобального позиционирования на эффективную реализацию технологий точного земледелия в сельском хозяйстве.

Методика исследований была основана на методе материалистической диалектики, методах анализа и синтеза как информации из официальных источников так и информации из трудов других исследователей.

В научной работе выделены два основных оператора навигационных спутниковых систем NAVSTAR GPS и GLONASS, которые подобные во многих отношениях. Среди отличительных особенностей можно отметить характер расположения, движение спутников на орбитах и их общее количество, методы кодирования сигнала CDMA и FDMA, использование различных систем координат WGS-84 и ПЗ90.11. Что касается двух других навигационных спутниковых систем GALILEO и BEIDOU, так они стремительно развиваются с большими амбициями и потенциалом. Установлено, что точность определения координат системы GLONASS на сегодняшний день уступает показателям американской системы спутниковой навигации GPS. GLONASS обеспечивает более точное позиционирование в северных широтах, а GPS в средних.

В работе отмечено, что точность позиционирования машинных агрегатов для реализации технологий точного земледелия можно улучшить (от 2 до 20 см) благодаря дифференциальной коррекции сигналов с помощью бесплатных и коммерческих широкозонных подсистемы спутниковой навигации. Данные сервисы позволяют реализовать задачи прецизионного возждения, а значит, и обеспечения точного внесения посевного материала, удобрений и гербицидов с целью их экономии, точного междурядной обработки технических культур, точного сбора урожая и др., при выполнении агротехнологических операций по использованию наземной техники и беспилотных летательных аппаратов.

**Ключевые слова:** машинный агрегат, навигация, глобальная навигационная спутниковая система, точное земледелие, NAVSTAR GPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, NavIC, QUASI-ZENITH, сигнал, точность позиционирования, система координат, дифференциальная коррекция.

**Табл. 2. Рис. 8. Лит. 21.**





## GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS AND THEIR ROLE IN PRECISION AGRICULTURE TECHNOLOGIES

Today, global navigation satellite systems are being implemented in many structural units of the Ukrainian economic complex, many spheres of human activity, and every year they continue to develop. One of the main feature of these satellite systems is the requirements for high accuracy and speed of received data. They provide the opportunity to reduce operating costs and increase the efficiency of use of equipment and other resources.

Therefore, the use of navigation satellite systems for controlling machine units, establishing their location, monitoring soil condition and yield mapping is becoming increasingly relevant today.

The subject of study in this article were global navigation satellite systems NAVSTARGPS (USA), GLONASS (RF), GALILEO (EU), BEIDOU (China) and regional navigation systems NavIC (India) and QUASI-ZENITH (Japan).

The purpose of the work was to clarify and establish the main characteristics of global navigation satellite systems and their role in the implementation of precision agriculture technologies.

The task of the work was: to analyze the functional characteristics of global positioning satellite systems and their main elements; to find out principles of operation of systems: navigation, coordinates, time; to establish the accuracy of navigation systems; to substantiate the role of global positioning satellite systems in the effective implementation of precision agriculture technologies in agriculture.

The research methodology was based on the method of materialistic dialectics, methods of analysis and synthesis of both information from official sources and information from the works of other researchers.

Two major operators of satellite navigation systems the NAVSTAR GPS and GLONASS, which are similar in many respects, have been identified in the scientific work. Among the distinctive features there are the nature of the location, the motion of satellites in orbits and their total number, methods of encoding the CDMA and FDMA signals, the use of different coordinate systems WGS-84 and PZ90.11. As for the other two satellite navigation systems GALILEO and BEIDOU, they are developing rapidly with great ambition and potential. It is established that at the present time the accuracy of determining the coordinates of the GLONASS system is inferior to the performance of the American satellite navigation system GPS. GLONASS provides more accurate positioning in the northern latitudes and GPS in the middle.

It is noted that the positioning accuracy of machine units for the implementation of precision farming technologies can be improved (from 2 to 20 cm) due to differential signal correction with the help of free and commercial wideband satellite navigation subsystems. These services will allow to implement the tasks of precision driving, and therefore, to ensure the accurate implementation of sowing material, fertilizers and herbicides to spare them, accurate inter-row cultivation of industrial crops, accurate harvesting, etc., when performing agro-technological operations using ground vehicles and landless vehicles.

**Key words:** machine unit, navigation, global navigation satellite system, precision agriculture, NAVSTARGPS, GLONASS, GALILEO, BEIDOU, NavIC, QUASI-ZENITH, signal, positioning accuracy, coordinate system, differential correction.

**Tab. 2. Fig. 8. Lit. 21.**

### ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРА

**Холодюк Олександр Володимирович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри "Агроінженерії та технічного сервісу" Вінницького національного аграрного університету (вул. Сонячна, 3, м. Вінниця, 21008, Україна, e-mail: [holodyk@vsau.vin.ua](mailto:holodyk@vsau.vin.ua)).

**Холодюк Александр Владимирович** - кандидат технических наук, старший преподаватель кафедры "Агроинженерии и технического сервиса" Винницкого национального аграрного университета (ул. Солнечная, 3, г. Винница, 21008, Украина, e-mail: [holodyk@vsau.vin.ua](mailto:holodyk@vsau.vin.ua) ).

**Kholodyuk Oleksandr** - Ph.D, Senior Lecturer of the Department of "Operation of a machine-tractor park and technical service" of Vinnytsia National Agrarian University (3, Sonychna St., Vinnytsia, 21008, Ukraine, e-mail: [holodyk@vsau.vin.ua](mailto:holodyk@vsau.vin.ua) ).