

Корнилій ТРЕТЯК^{1a}, Анатолій ВІВАТ^{1b}, Олег ДЕМ'ЯНІВ, Михайло НАВОДИЧ^{1c},
Борис ЛАДАНІВСЬКИЙ, Сергій ТИМОШИН

Інститут геодезії, Національний університет "Львівська політехніка", вул. С. Бандери, 12, Львів, 79013, Україна,
тел. +38(032)2582387, ел. пошта: ^{1a} kornylii.r.tretiak@lpnu.ua; ^{1b} anatolii.y.vivat@lpnu.ua; ^{1c} mykhailo.b.navodych@lpnu.ua

<https://doi.org/10.23939/istecap2025.101.053>

РОЗРОБКА, АПРОБАЦІЯ ТА ВПРОВАДЖЕННЯ LC GNSS-ПРИЙМАЧА

У статті наведено розширений аналітичний огляд сучасного стану, історії розвитку, технічних характеристик, експериментальних результатів, сфер застосування та перспектив маловартісних GNSS-приймачів (LC GNSS). Розглянуто одночастотні (SF-LC), двочастотні (DF-LC) і багаточастотні (MF-LC) моделі з аналізуванням точності, стабільності, мультишляховості, сумісності із антенами та ПЗ. Висвітлено переваги та обмеження LC GNSS у геодезії, навігації, моніторингу інженерних споруд, сільському господарстві та атмосферних дослідженнях. У статті подано результати розроблення та експериментального випробування багатосистемного LC GNSS приймача "BASE-970", вказано їхні конструктивні особливості. Приймач апробовано в умовах Української антарктичної експедиції 2025 р. на станції "Академік Вернадський" для моніторингу геодинамічних процесів, а також у системах моніторингу деформацій гідротехнічних споруд в Україні. Подано опис конструкції та функціональних схем різних модифікацій приймача. Здійснено експериментальні дослідження точності позиціонування приймача у режимах статички та кінематики із застосуванням методів PPP та диференційного позиціонування. Відповідно до результатів досліджень точність позиціонування у режимі статички досягає 2–4 мм для планових координат і 3–6 мм для висоти, що є порівнянним із показниками професійних приймачів світових виробників. У кінематичному режимі планові координати визначаються з с.к.п 25 мм, а висотна компонента – 44 мм. Розроблений приймач характеризується низькою собівартістю, високою надійністю та широкими функціональними можливостями, що забезпечує його ефективне застосування у наукових дослідженнях і практичних завданнях моніторингу деформацій інженерних споруд та геодинамічних явищ.

Ключові слова: LC GNSS, DF-LC, MF-LC, RTK, PPP, GNSS-моніторинг, позиціонування, точне землеробство, мультипас, розроблення ГНСС-приймачів, ГНСС-плати.

Вступ

Упродовж останніх десятиліть глобальні навігаційні супутникові системи (ГНСС, GNSS) стали базовою технологією для просторового позиціонування у реальному часі. Висока точність, глобальне покриття та можливість інтеграції з іншими сенсорними платформами забезпечили широке застосування ГНСС у моніторингу геодинамічних явищ, зсувів, коливань інженерних споруд, а також у сферах високоточного землеробства, транспорту та телекомунікацій.

Еволюція ГНСС-приймачів відбувалася у напрямі зменшення розмірів, енергоспоживання й вартості без втрати точності й надійності. Це уможливило створення компактних і доступних пристроїв для завдань, які раніше потребували громіздких та дорогих геодезичних систем. У сучасних умовах ГНСС розглядають не лише як технологію, а і як інфраструктурну послугу широкого призначення. Розроблення спеціалізованих приймачів супутникових сигналів, адаптованих до завдань моніторингу динамічних

процесів, потребує урахування низки чинників: підтримки багаточастотного приймання та мультисистемності, стійкості до мультипасових ефектів і завад, забезпечення високої точності у разі фіксації положення в умовах реального часу, сумісності з польовими антенами та системами збирання / оброблення даних.

У статті подано результати розроблення, лабораторної й польової апробації та висвітлено досвід практичного впровадження власного ГНСС-приймача, створеного на основі плати Trimble BD970. Цю плату використовують у багатофункціональних професійних і порівняно дорогих приймачах.

Мета

Мета – використавши високоточну професійну плату, створити надійне, економічно-доступне та технічно-адаптивне рішення для високоточного моніторингу динамічних геофізичних і техногенних процесів.

Сучасний стан та перспективи застосування маловартісних GNSS-приймачів (LC GNSS)

Потреба у точному позиціюванні зростає в усьому світі. Розвиток супутникових навігаційних технологій, зокрема GNSS, уможливив створення недорогих, але функціональних пристроїв – маловартісних приймачів (LC GNSS). Вони надають користувачам доступ до високоточної навігації та вимірювання без необхідності придбання дорогих геодезичних систем. Історія GNSS-приймачів розпочалась із військових потреб, однак із 1980-х років сигнал GPS став доступний для цивільного використання. В 80-ті роки перші геодезичні GPS-приймачі були одноканальними, громіздкими й дорогими. Вони забезпечували лише статичне позиціювання з тривалим часом спостережень і використовували їх переважно в дослідницьких проєктах. У 90-ті роки з'явилися багатоканальні двочастотні приймачі, що підтримували кодові та фазові вимірювання. Активно впроваджувались RTK-технології, зменшувались габарити та зростала автономність. Розпочалось використання супутників GLONASS – приймачі стали дво-системними. У 2000-ті роки почалось повноцінне застосування мереж базових станцій (CORS), розширення підтримки супутникових систем (Galileo, BeiDou). Також у 2000-ті розпочався розвиток вітчизняного виробництва супутникових навігаційних систем в Україні, пов'язаний із активною діяльністю державного підприємства “Оріон-Навігація”. Як зазначено у публікації [Водяних А., 2005], ще на початку 2000-х років підприємство здійснювало повний цикл розроблення геодезичних GNSS-комплексів, зокрема приймачів, антен, накопичувачів та програмного забезпечення. Результатом таких робіт став геодезичний комплекс СРНС СН-3603, призначений для визначення координат пунктів та об'єктів місцевості за даними супутників GPS і ГЛОНАСС. Під час розроблення цього комплексу були вирішені ключові завдання:

- створення двочастотного ГНСС-приймача;
- розроблення геодезичної антени Г102 з урахуванням фазового центра;
- накопичення й опрацювання “сирих” даних у форматі BINR, BINR 68, RINEX;
- забезпечення RTK та статичних режимів позиціювання.

Державні випробування комплексу СН-3603 у 2003 р. показали, що за точністю позиціювання

під час статичних фазових вимірювань він не поступається зразкам зарубіжного виробництва (наприклад, Trimble 4600 LS Surveyor, Ashtech ProMark2). Зазначали також, що обсяг внутрішнього накопичувача даних вітчизняної розробки становив 32 МБ, що забезпечувало збереження даних для 32-годинного сеансу спостережень із частотою 1 Гц [Водяних А., 2005]. Важливо, що розробка містила власне програмне забезпечення – SaturnPro, FlashMan, RiCo, призначене для оброблення коду і фази, перетворення форматів, розрахунків координат та контролю якості. Це свідчило про наявність у підприємства не лише виробничого, а й повноцінного науково-дослідного потенціалу.

У ці роки розпочався розвиток українських GNSS-технологій. В Україні з'явилися національні сервіси постобробки, зокрема ZakPOS. Активно впроваджували мультимастотні GNSS-приймачі, з'явилися перших LC-приймачів із RTK-функціями (u-blox NEO-M8P), відбувалися масовий перехід до інтегрованих рішень GNSS+INS, зменшення розмірів і енергоспоживання.

Щодо інфраструктури ГНСС в Україні, то за останнє десятиліття створено п'ять окремих сервісів для передавання поправок у реальному часі (Zakpos, СКНЗУ, TNT-TPI, System-net, Geoterrace). Кожна із них використовує спеціальне програмне забезпечення фірм Leica, Trimble, Topcon та наземні GNSS станції. На території України з'явилося кілька сотень перманентних GNSS станцій. Мережа Zakpos та System-net повністю автоматизовані. Мережа у повідомленнях RTCM автоматично передає користувачу його розраховані координати у національній чи іншій системі, еліпсоїдальну, або нормальну висоту. Під час досліджень [Савчук, 2009; Задеменюк, 2010] встановлено, що за сприятливих умов сервіс Zakpos дає змогу протягом декількох секунд визначити координати із точністю 5–10 см на віддалі від базових станцій близько 100 км. У роботі [Віват, 2011] на НГП Бережани встановлено, що точність визначення координат методом RTK у межах 5 см, із використанням мережі базових станцій Zakpos та технології віртуальної базової станції. У роботі [Баран, 2005] досліджено можливість досягнення точності у визначенні координат пунктів ГНСС-методом з похибкою 2 мм. У 2020-ті роки на ринок випустили DF-LC (ZED-F9P) і MF-LC (Mosaic-X5) приймачі з під-

тримкою L5/E5/B3 частот і PPP-RTK. Відбулось розширення open-source систем (RTKLIB, SNIP, STRSVR). GNSS інтегруються в мобільні платформи, агротехніку, моніторинг гідроспоруд, UAV, Internet of Things. На початковому етапі на ринку переважали лише кілька компаній-виробників високоточних приймачів та плат:

- Trimble Navigation – відомий розробник геодезичних GNSS-приймачів і OEM-плат;

- Ashtech – відомий виробник багатоканальних GPS-рішень;

- NovAtel – лідер у створенні високоточних OEM-плат [Ziebart, 2001];

- Javad Positioning Systems – компанія, яка вперше інтегрувала багатосистемні рішення GPS+GLONASS [Hofmann-Wellenhof et al., 2008].

У 20-ті роки цього століття впроваджують сегмент маловартісних GNSS-приймачів (LC GNSS). Цьому сприяли такі фактори:

- Попит на доступне позиціонування. У багатьох галузях (сільське господарство, громадський транспорт, моніторинг інфраструктури) виникла потреба у точному позиціонуванні без необхідності інвестувати в дорогі геодезичні системи.

- Мініатюризація мікроелектроніки. Зменшення габаритів і енергоспоживання електронних компонентів дало змогу інтегрувати приймачі у портативні пристрої.

- Розвиток супутникових систем. Із запуском Galileo, BeiDou, розширенням GLONASS та модернізацією GPS істотно зросла кількість доступних супутників, що дало змогу LC-приймачам працювати із більшою надійністю навіть за складних умов.

- Відкритість протоколів і розвиток open-source ПЗ. Розроблення RTKLIB, GNSS-SDR, GNSS-Logger, SNIP тощо забезпечило можливість опрацювання сирих даних LC GNSS без необхідності придбання дорогого програмного забезпечення.

- Конкуренція на ринку. Масовий попит на GNSS у споживчому сегменті (смартфони, навігатори, дрони) сприяв здешевленню мікрочипів GNSS та появі універсальних модулів.

Особливої актуальності використання LC GNSS-приймачів набуває в Україні в умовах сьогодення, коли існує потреба в оперативному розгортанні недорогих, мобільних і точних систем позиціонування. Це пов'язано з: необхідністю моніторингу критичної інфраструктури (греблі,

мости, шляхи); широким застосуванням точного землеробства в умовах аграрної держави; упровадженням відкритих даних та цифрових рішень в межах державної політики цифрової трансформації; обмеженим фінансуванням закупівлі дорогого геодезичного обладнання в державному і приватному секторах; потребами воєнного та повоєнного відновлення, адже мобільні геодезичні засоби відіграють ключову роль в обстеженнях і відбудові територій. Порівняно з відомими геодезичними брендами (Trimble, Leica, Topcon, Septentrio), LC GNSS-приймачі мають такі переваги та унікальні можливості:

- Ціна: LC GNSS-приймачі у 10–20 разів дешевші, ніж геодезичні аналоги, що уможливило їх широке впровадження в освітніх установах, малих фермерських господарствах і наукових проєктах.

- Мобільність і енергоефективність: компактність, невелика вага й живлення від USB або акумулятора роблять їх придатними для UAV, польових кампаній та автономних станцій моніторингу.

- Швидкий розвиток: завдяки конкуренції між виробниками (u-blox, Emlid, SparkFun) нові моделі LC GNSS з'являються частіше, ніж у преміум-сегменті.

- Інтеграція з IoT: LC GNSS легко інтегруються з платформами Arduino, Raspberry Pi, LoRa та іншими пристроями, що актуально для сенсорних мереж, smart farming і моніторингових систем.

- Дослідницький потенціал: дослідники можуть експериментувати з параметрами приймання, алгоритмами позиціонування, новими методами RTK/PPP без обмежень, які накладають на комерційні ПЗ та API.

Обмеження LC-приймачів порівняно з брендовими моделями стосуються головню стабільності роботи в складних умовах, точності без зовнішньої обробки, відсутності каліброваних антен і надійної технічної підтримки. Проте за умов правильного використання LC GNSS можуть стати ефективною альтернативою для багатьох завдань. Застосування LC GNSS надає нові можливості порівняно з брендовими приймачами:

- Легкість інтеграції в багатосенсорні платформи. LC GNSS-приймачі можна вбудовувати у власні конструкції дронів, робототехнічних систем, гідрографічних платформ без потреби в дорогих ліцензіях чи SDK.

– Масштабованість і розгортання у віддалених районах. Завдяки невисокій ціні можливе розгортання щільних мереж приймачів для моніторингу осідань, сейсмічної активності, деформацій, без значних витрат.

– Швидке оновлення технологій. Нові функції (підтримка L5, B3, Galileo HAS, PPP-RTK) з'являються в LC-сегменті швидше, ніж у преміальному. Наприклад, PPP-RTK у ZED-F9P чи Mosaic-X5 став доступним раніше, ніж у деяких моделях Trimble або Leica.

– Використання у сфері освіти та популяризації GNSS. У навчальних закладах LC GNSS дають змогу студентам здійснювати повноцінні GNSS-дослідження, навчатися RTK/PPP обробленню, працювати із відкритим кодом та різними антенами.

Враховуючи викладене вище, можна стверджувати, що LC GNSS-приймачі становлять не лише технологічну альтернативу, але і стратегічний інструмент розвитку геопросторової інфраструктури України. LC GNSS-приймачі виникли як результат поєднання технологічного прогресу, економічної доцільності та соціального запиту на точне позиціонування для широкого кола користувачів.

Компанія u-blox стала піонером у створенні масових GNSS-модулів [Tsakiri, M., 2017]. SF-LC модулі типу NEO-M8P [Cina, A., 2015] уможливили позиціонування з точністю до 2 см у сприятливих умовах. Подальший прорив був здійснений із появою DF-LC (ZED-F9P) та MF-LC (Mosaic-X5) моделей. LC GNSS-приймачі поділяють на три групи SF-LC (Single-Frequency Low-Cost) – одночастотні, DF-LC (Dual-Frequency Low-Cost) – двочастотні, MF-LC (Multi-Frequency Low-Cost) – мультичастотні.

– SF-LC (Single-Frequency Low-Cost) приймачі – найдоступніша категорія GNSS-обладнання, орієнтована на прості завдання позиціонування. Вони зазвичай підтримують лише одну частоту (L1 GPS, іноді B1 BeiDou) і не мають вбудованого RTK-модуля. Серед типових моделей – u-blox NEO-M8P, M8T, NEO-7P. Основна перевага – низькі вартість (50–150 євро) та енергоефективність. Проте без RTK-модуля вони потребують додаткового програмного забезпечення (наприклад, RTKLIB), щоб досягти точності в діапазоні 1–2 см у статичних умовах. Вони характеризуються обмеженням за довжиною базової лінії (до 5–10 км), великою тривалістю ініціалізації у RTK, високочутливі до додаткового відбиття сигналу, потребують зовнішнього ПЗ.

Такі приймачі можна застосовувати у навчальних цілях, в агромоніторингу, простому позиціонуванні UAV або для попереднього збирання даних у польових умовах. Приймають лише одну частоту, зазвичай L1 (GPS) та B1 (BeiDou).

– DF-LC (Dual-Frequency Low-Cost) – двочастотні приймачі, які підтримують одночасне приймання сигналів на частотах L1 та L2 (GPS), E1/E5a (Galileo), B1/B2 (BeiDou), а також L1/L2 GLONASS. Основна модель – u-blox ZED-F9P, доступна у форматах ArduSimple, simple-RTK2B, Emlid Reach M2/M+. Підтримується вбудований RTK-модуль, що забезпечує ініціалізацію менш ніж за 10 с та точність 1–3 см за RTK. DF-LC є оптимальним стандартом серед LC-рішень, придатним для геодезії, моніторингу, агровиробництва, UAV-орієнтації, польових кампаній. DF-LC здатні приймати сигнали на L1 та L2, Galileo E1/E5, BDS B1/B2. Оснащені вбудованими RTK-модулями. Їхня точність 1–3 см у RTK та до 2–5 см у PPP-RTK. Приклади: ZED-F9P, Emlid Reach M2/M+.

– MF-LC (Multi-Frequency Low-Cost) [4] приймачі – новітній клас, здатний приймати сигнали одразу на трьох і більше частотах (L1/L2/L5 GPS, E1/E5 Galileo, B1/B2/B3 BeiDou), що дає змогу реалізувати повноцінне статичне і кінематичне PPP-позиціонування із міліметровою точністю. Найвідоміші приклади – Mosaic-X5 (Septentrio), SparkFun Mosaic Board. MF-LC приймачі розглядають як альтернативу геодезичним приймачам у проєктах, що потребують високої стабільності – моніторинг, CORS, наукові дослідження, зокрема вивчення земної кори, сейсміки та гідроспоруд. Моделі останнього покоління приймають сигнали L1, L2, L5, B3 та Galileo E5a/b. Висока точність у режимі PPP, низький фазовий шум – їхні основні конкурентні характеристики порівняно із брендовими приймачами (наприклад, Mosaic-X5 та Trimble Alloy [Vidal, B., 2024]). За параметрами точності та якості спостережень LC-приймачі мають певні переваги над брендовими приймачами. Зокрема, це нижчі значення C/N_0 , співвідношення C/N_0 та фазовий шум [Stopar, B., 2024] порівняно з відомими геодезичними приймачами.

Під час розроблення LC GNSS-приймачів необхідно звернути увагу на GNSS-антену, оскільки її якість безпосередньо впливає на точність позиціонування. Антени низьковартісного сегмента (наприклад, patch-антени або вбудовані модулі) характеризуються високим рівнем

мультипасу та нестабільністю фазових вимірювань. Для досягнення геодезичної точності рекомендовано використовувати антени із відомими параметрами Phase Center Offset (PCO) та Phase Center Variation (PCV), зокрема: Tallysman TW2410 і TW3870 – кругові антени з прецизійною характеристикою; u-blox ANN-MB – компактну антену початкового рівня; Survey-grade антени типу AS-ANT2BCAL, LEIAR10, Trimble Zephyr 2 – калібровані рішення із багаточасотною підтримкою [Harxon Corporation, 2025]. Дослідження показали, що застосування каліброваних антен зменшує залишкові фазові помилки на 30–40 %, а похибки у вертикальному компоненті становлять декілька міліметрів [Krietemeyer, S., 2022]. Відсутність калібрування може призвести до систематичних похибок у межах 1–2 см у вертикальному напрямку. В Patch-антен високий рівень мультипасу. У складних умовах (міста, ліси) точність істотно знижується. Геодезичні антени зменшують шум фази до 3 мм. Як і у традиційних приймачах, точність визначення координат LC-приймачами залежить від режиму позиціонування [Calian GNSS, 2025]. Основними недоліками LC-приймачів є нестабільність у кінематичному режимі вимірювань, проблеми з якістю антен (відсутність PCO/PCV), висока вразливість до завад. Найперспективніші напрями розвитку – масове впровадження MF-LC приймачів для CORS-мереж, створення спеціалізованого ПЗ на основі машинного навчання для компенсації мультипасу, розроблення вітчизняних MF-LC модулів для потреб геомоніторингу України, введення LC GNSS до освітніх програм ЗВО з геодезії, агрономії, метеорології. Сучасні LC

GNSS-приймачі здатні забезпечити субдециметрову точність у багатьох прикладних задачах. Найперспективнішими залишаються DF-LC приймачі (завдяки універсальності та ціні) та MF-LC (через потенціал PPP і стабільність). В Україні їх активне впровадження може забезпечити широкомасштабний моніторинг промислової інфраструктури, розширити можливості фермерських господарств, оптимізувати навігацію й підтримати дослідницькі програми у сфері змін клімату.

Сфери застосування LC GNSS-приймачів надзвичайно швидко розширюються. LC GNSS активно використовують у кадастрових зніманнях, побудові топографічних планів, контролі будівництва. Це зумовлено тим, що RTK-зв'язок через NTRIP у поєднанні з якісною антеною забезпечує стабільну точність у відкритій місцевості. LC GNSS широко використовують для спостережень за греблями, мостами, зсувами, об'єктами культурної спадщини. Наприклад, на зсуві Лазе (Словенія) DF-LC приймачі успішно реєстрували добові переміщення до 3 см [Hamza, V., 2025]. У точному землеробстві LC GNSS дають змогу автоматизувати оброблення, здійснювати контроль висіву, навігацію машин. DF-LC приймачі успішно застосовують для визначення атмосферних параметрів TEC, ZTD, IWV. Мережі типу MPG-NET активно використовують у кліматології [Robustelli, U., 2023]. Моніторинг Землі GNSS-R і GNSS-IR дає змогу досліджувати товщину снігу, рівень води, рух льодовиків, висоту над морем з точністю до 0,4 см. У табл. 1 подано порівняльні характеристики трьох основних класів LC GNSS приймачів.

Таблиця 1

Порівняльні характеристики трьох основних класів приймачів LC GNSS приймачів

Характеристика	SF-LC	DF-LC	MF-LC
Частоти	L1	L1, L2	L1, L2, L5
Системи	GPS, BeiDou	GPS, GLONASS, Galileo, BDS	GPS, GLONASS, Galileo, BDS
RTK	Обмежено (через ПЗ)	Вбудований RTK-модуль	RTK + PPP-RTK
PPP	–	2–5 см	3–4 мм
Точність RTK	~1–2 см	1–3 см	1–2 см
Час ініціалізації RTK	>30 с	<10 с	<10 с
Вартість, €	50–150	150–300	500–1000
Типові моделі	NEO-M8P, M8T	ZED-F9P, Emlid Reach M2	Mosaic-X5, SparkFun Mosaic
Призначення	UAV, навчання	Геодезія, агро, моніторинг	CORS, наука, високоточні дослідження

Загальний опис LC GNSS приймача "BASE-970"

Протягом 2023–2024 рр. спеціалісти Інституту геодезії Національного університету "Львівська політехніка" на базі Навчально-наукової лабораторії "Опрацювання супутникових вимірів", ураховуючи багаторічний досвід експлуатації ГНСС-приймачів, розробили комунікативну плату, сконструювали корпус та інтерфейс приймача, який максимально відповідає потребам геодезичної галузі. Цей приймач активно використовують для заміни застарілих та несправних приймачів на постійних ГНСС-станціях мережі "Geoterrace", а також для виконання статичних ГНСС-вимірювань під час вирішення завдань геодинамічного моніторингу та розрахунку трансформаційних полів на об'єктах, які досліджують фахівці Інституту геодезії (рис. 1).

Приймач BASE-970 успішно апробовано у сезонній УАЕ 2025 р. на УАС "Академік Вернадський" (рис. 1, а) для моніторингу геодинамічних процесів тектонічного розлому протоки Пенола Архіпелагу Аргентинські острови, моніторингу деформацій гребель Кременчуцької, Київської, Канівської ГЕС (рис. 2, б). На момент публікації виготовлено десятки таких приймачів, які надійно працюють у мережі "Geoterrace" як приймачі постійних станцій (рис. 2, в). Основні перевагами розробленого

приймача: багатосистемність, низька собівартість, простота експлуатації, надійність та компактність. Технічні характеристики розробленого ГНСС-приймача підтримують всі основні показники плати професійного класу BD970. Зокрема: 220 каналів стеження: GPS: L1 C/A, L2E, L2C, L5; GLONASS: L1 C/A, L1 P, L2 C/A (тільки GLONASS M), L2 P; SBAS: L1 C/A, L5; Galileo: L1 BOC, E5A, E5B, 5AltBOC; BeiDou: B1, B2; QZSS: L1 C/A, L1 SAIF, L2C, L5. Приймач має 54 Мб. внутрішньої пам'яті, яку можна опційно активувати для запису даних. Дані можна завантажити через вебінтерфейс приймача, а також налаштувати надсилання FTP або електронною поштою у форматах T02/T04, Binex, Rinex, Hatanaka із заданим інтервалом.

У 2025 р. Львівський науково-виробничий центр стандартизації, метрології та сертифікації видав Свідоцтво про перевірку законодавчо регульованого засобу вимірювальної техніки на ГНСС-приймач "BASE-970". Зовнішній вигляд ГНСС приймача наведено на рис. 2.

Корпус пристрою складається із трьох частин:

а. Безпосередньо пластикового корпусу із вбудованими втулками для встановлення плат модулів. У корпусі передбачено наскрізні отвори під різними Ethernet та живлення. Також у корпусі є паз, в який за необхідності можна встановити кільце, що герметизує.



а



б



в

Рис. 1. ГНСС-приймач BASE-970

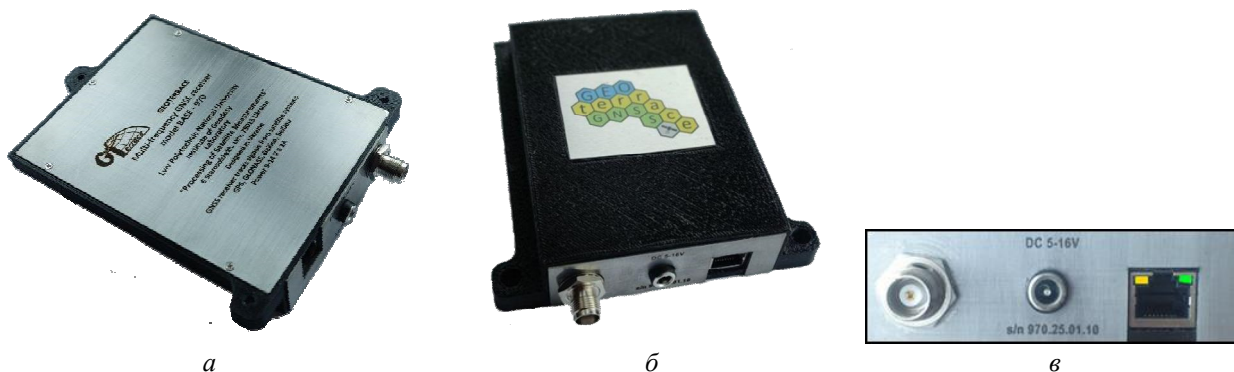


Рис. 2. Зовнішній вигляд ГНСС приймача BASE-970

б. Нижньої кришки корпусу, виконаної у вигляді металевої плити. Крім конструктивного призначення, ця плита відіграє роль радіатора для відведення тепла від модуля BD970. Передавання тепла здійснюється через шар термопровідної пластини, наклеєної на корпус радіоканалу модуля.

с. Третя частина корпусу – металевий шильд, на який нанесено позначення рознімів та назва приладу з його номером. Приймач використовує два світлодіодні індикатори на Ethernet-рознімі для позначення стану роботи:

- жовтий – індикатор живлення;
- зелений – режим спостереження (безперервний – ініціалізація, блимання – наявність розв'язків від супутників, згаслий – супутників не спостерігають).

Схемні рішення та конструктивні особливості LC GNSS приймача

Пристрій виконано у форматі інженерної моноплати, на яку передбачений монтаж Core-платою BD970 (вузол U1) з Ethernet-рознімом X1. Оскільки плата BD970 не дає можливості супроводжувати роботу приймача світлодіодами, на вмонтовані в рознім світлодіоди ми вивели сигнали наявності живлення (жовтий сигнал світлодіод). За наявності антени та супутників зелений світлодіод блимає. Живлення плати забезпечує знижувальний конвертор, зібраний на базі мікросхеми MP2225. Модуль U3. MP2225 є високочастотним синхронним випрямленим понижувальним імпульсним перетворювачем із вбудованими силовими МОП-транзисторами. Це компактне рішення для досягнення вихідного струму 5 А із відмінним регулюванням

навантаження та лінії у широкому діапазоні вхідної напруги. MP2225 має синхронний режим роботи для вищої ефективності в діапазоні навантаження вихідного струму. Також MP2225 забезпечує широкий робочий діапазон вхідної напруги від 4,5 до 18 В, що робить живлення пристрою дуже гнучким. Пристрій передбачає чотири варіанти комплектації:

1. Базова станція: інженерна плата комплектується лише Core-платою BD-970 (рис. 3).

2. Ровер: інженерна плата комплектується Core-платою BD970, та модулем блютузу.

3. HC-08 (або JDY-33) для бездротового зв'язку із зовнішніми пристроями (рис. 4). Логер: інженерна плата комплектується Core-платою BD970, модулем STM32F411, модулем блютузу HC-08 (або JDY-33) та рознімом під SD-карту (рис. 5).

4. Wi-Fi-ровер: інженерна плата комплектується Core-платою BD970 та модулем ESP32 WROOM-32 (рис. 6). Це розширення забезпечує віддалений безконтактний доступ до вебінтерфейсу приймача для повного контролю в польових умовах. Зв'язок між портом COM3 приймача та ESP забезпечується через нуль-модемний інтерфейс PPP over Serial (PPPoS). Мікропрограмне забезпечення ESP, у якому сервер PPP працює на чипі із підтримкою Wi-Fi та із програмним модулем трансляції IP адресів і портів Network Address Port Translation (NAPT), який транслює пакети між інтерфейсом Wi-Fi та PPPoS. Модуль ESP налаштований як точка доступу Wi-Fi (AP), що дає змогу смартфонам, планшетах або портативним комп'ютерам підключатися до нього та перенаправляти весь мережевий трафік до та з GNSS-приймача BD970.

Випробовування LC GNSS приймача "BASE-970"

Ми виконали два випробування розроблених приймачів у статичному та кінематичному режимах. Дослідження у статичному режимі здійснено на спеціальному пристрої [Глотов В., 2021], що дає змогу зміщувати антену GNSS-приймача по трьох осях у просторі з точністю 0,1 мм у діапазоні 20 мм. У цьому дослідженні дві GNSS-антени приймачів було закріплено на

установці (рис. 7, а) та виконано одночасне записування GNSS-даних. У кожній GNSS-сесії виконували зміщення антен у межах 10 мм (табл. 2). Тривалість сесії 6 год, а частота запису – 5 с. У кожній сесії здійснено запис даних від супутників чотирьох GNSS-систем: GPS, ГЛОНАСС, Galileo та BeiDou. Під час спостережень кут відсікання супутників встановили 10°, а параметр GDOP у межах 1,3–2,1.

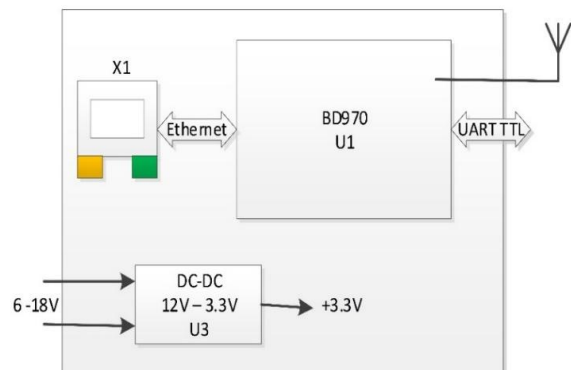


Рис. 3. Функціональна схема базового GNSS-приймача

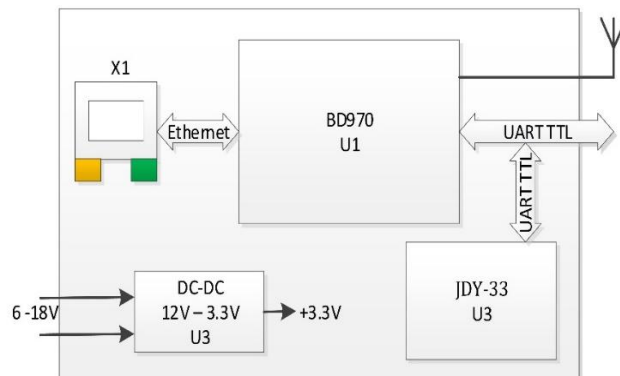


Рис. 4. Функціональна схема ровера

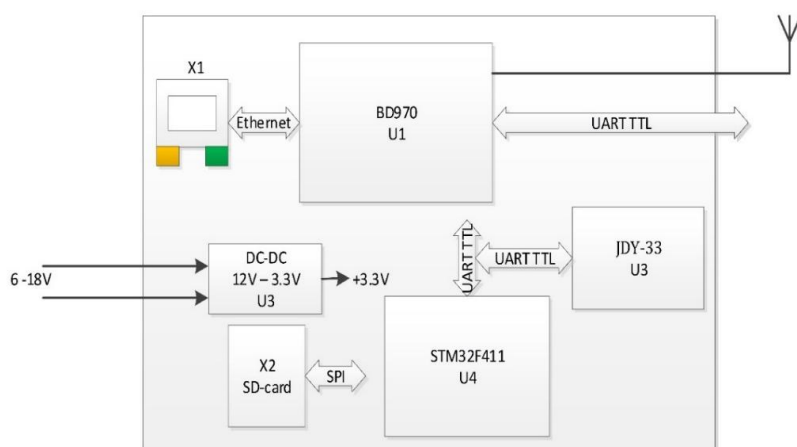


Рис. 5. Функціональна схема логера

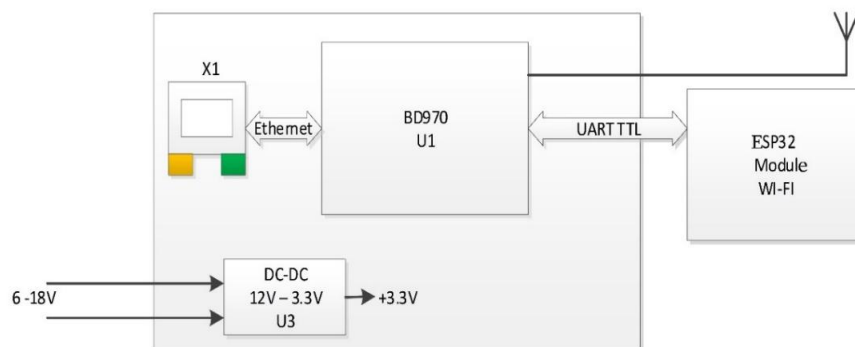


Рис. 6. Функціональна схема Wi-Fi-ровера

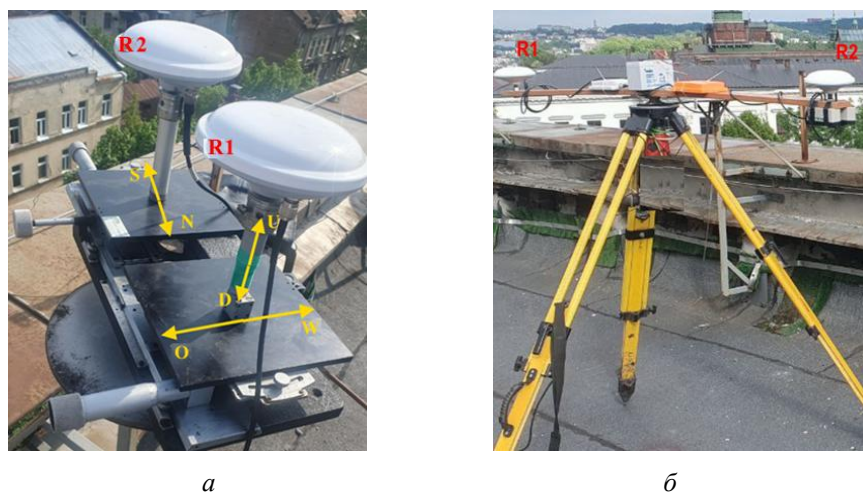


Рис. 7. Пристрої для дослідження розробленого ГНСС-приймача в статичному та кінематичному режимах

Таблиця 2

Результати дослідження точності ГНСС приймача BASE-970 у режимі статичних вимірів

№ сесії	№ п.	Еталонні зміщення			Leica Infinity, DIF			GrafNet, DIF			PRIDE PPPAR PPP			NRC online PPP		
		Δe , мм	Δn , мм	ΔU , мм	Δe , мм	Δn , мм	ΔU , мм	Δe , мм	Δn , мм	ΔU , мм	Δe , мм	Δn , мм	ΔU , мм	Δe , мм	Δn , мм	ΔU , мм
1	R ₁	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	R ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	R ₁	-10	0	0	-11	-1	-2	-10	1	-4	-9	-1	-7	-13	-1	-13
	R ₂	0	0	0	1	0	1	1	-3	-3	1	0	-1	2	-6	5
3	R ₁	6	0	0	6	0	-3	4	-2	-6	6	-3	-4	5	-2	-4
	R ₂	0	0	0	-1	1	1	0	-1	-2	1	-1	-12	2	-5	3
4	R ₁	0	0	0	1	-1	-3	1	-1	-6	3	0	-15	0	-2	-16
	R ₂	0	10	0	0	11	0	5	6	0	2	9	-13	3	4	-1
5	R ₁	0	0	0	-1	0	-2	-2	-2	-6	-1	-2	-5	-2	0	-12
	R ₂	0	-6	0	-1	-5	1	1	-11	-2	1	-7	-10	2	-10	3
6	R ₁	0	0	-10	0	0	-19	4	-2	-13	3	-2	-12	3	-3	-21
	R ₂	0	0	0	0	0	-1	0	-3	-12	0	-1	-8	3	-2	0
m_e, m_n, m_u					0.8	0.7	3.4	2.4	2.9	5.7	1.7	1.6	9.4	2.4	3.8	9.1
m_{posn}					1.1			3.7			2.3			4.4		

Опрацювання даних виконано двома методами – абсолютним (PPP) та відносним (DIF). Для цього використано програмні продукти PRIDE PPPAR, [PrideLab., 2025] онлайн-сервіс служби геодезії Канади (NRC) [NRC, 2025], Leica Infinity [Leica AG, 2025] та Novatell GrafNet [NovAtel Inc, 2018]. Як базову станцію для диференційного режиму використано перманентну станцію SULP, розташовану на віддалі 0,2 км від майданчика для дослідження. Опрацювання даних виконано із використанням точних ефемерид та

файлів калібрації антен. Еталонні величини зміщень і результати опрацювання ГНСС-вимірів подано у табл. 2.

За даними табл. 2 можна зробити висновок, що із шестигodinної ГНСС-сесії спостережень планові зміщення антени диференційним та PPP методом визначено із с.к.п. 2–4 мм. Висотні зміщення антени диференційним методом визначено із с.к.п. 3–6 мм, а методом PPP 9–10 мм. Найкращий результат отримано із використанням програмного забезпечення Leica Infinity, с.к.п.

зміщень антени у плані < 2 мм, а по висоті < 4 мм. Наприклад, ГНСС-приймач Trimble Alloy в режимі статички має с.к.п. вимірювання планових координат $3 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$, а висотної складової $5 \text{ мм} + 0,5 \text{ ppm}$ [Trimble Inc, 2022]. Це свідчить, що LC GNSS-приймач “BASE-970” забезпечує точність визначення координат у режимі статички на рівні світових брендів.

Дослідження у режимі кінематики також виконано на спеціальному пристрої [Готов В., 2021], що дає змогу обертати антену ГНСС-приймача по колу. У цьому дослідженні також використано додатковий приймач як базовий, який записував високочастотні ГНСС-спостереження (рис. 7, б).

Кінематичні вимірювання тривали по 2,5 хв, із частотою запису даних 0,1 с. На рис. 8 подано схему треку пересування ГНСС антени за даними опрацювання кінематичних вимірів у програмному забезпеченні Novatel GrafNav. За час 2,5 хв з частотою запису 0,1 с прилад зібрав 1500 вимірів. За цей час ГНСС-антена пройшла за 71 оберт відстань ≈ 320 м із середньою швидкістю 2,2 м/с. За результатами урівноваження вимірів диференційним та PPP методами отримано практично однакові результати: відповідно радіус кола $r = 757$ мм і 756 мм із с.к.п. $m_r = 1,1$ мм, а с.к.п. відхилення від кола – 25 мм і 26 мм. Висотну компоненту (еліпсоїдальну висоту) визначено із с.к.п. $m_u = 44$ мм. Отримані результати повністю забезпечують увесь сегмент виконання робіт у режимі кінематики.

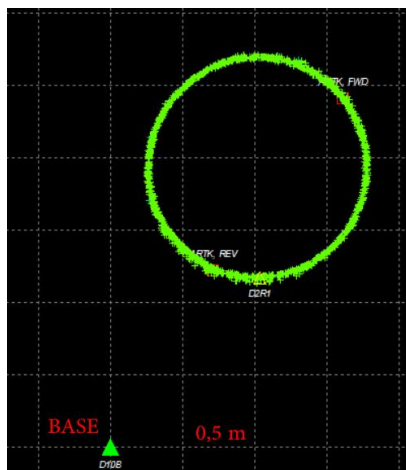


Рис. 8. Кінематичний трек руху ГНСС-антени за результатами опрацювання у програмному забезпеченні Novatel GrafNav

Висновки

Розроблений LC GNSS приймач “BASE-970” успішно апробовано як у складних польових умо-

вах антарктичних експедицій, так і під час виконання завдань високоточного геодезичного моніторингу в Україні. Випробування в статичному та кінематичному режимах підтвердили його високу точність позиціонування, зіставну із провідними світовими брендами GNSS-обладнання. За даними статичних вимірювань зміщення антени у плані диференційним та PPP методами визначаються із с.к.п. $2\text{--}4$ мм. Зміщення антени по висоті визначається диференційним методом із с.к.п. $3\text{--}6$ мм, а методом PPP $9\text{--}10$ мм. У кінематичному режимі планові координати визначаються з с.к.п. 25 мм, а висотна компонента зі с.к.п. $m_u = 44$ мм. Результати тестувань демонструють придатність приймача до високоточних статичних вимірювань та кінематичних застосувань.

Серед основних переваг приймача відзначаємо багатосистемність, простоту експлуатації, надійність, низьку собівартість та широкі можливості конфігурації під різні завдання – від базових станцій до роверів із бездротовими інтерфейсами.

Отримані результати підтверджують, що ГНСС-приймач “BASE-970” є конкурентоздатним рішенням для точних геодезичних вимірювань та може успішно використовуватись як у наукових дослідженнях, так і в практичних проєктах моніторингу інженерних споруд, гідротехнічних об’єктів, геодинамічних процесів.

Список літератури

- Баран, П., Бурак, К. & Третяк, К. (2011). Інженерно-геодезичні роботи в Україні. *Вісник геодезії та картографії*, (5), 19–26.
- Віват, А. Й., Літинський, В., & Покотило, І. Я. (2011). Дослідження точності визначення координат GNSS методом у режимі RTK. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 52–59.
- Водяних, А. (2005). Перспективи розвитку та використання вітчизняних GNSS-технологій в геодезії. *Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва*, вип. II, 43–48.
- Готов, В. М., Третяк, К. Р., & Яхторович, Р. І. (2021). *Спосіб визначення вертикального зміщення антени приймача глобальної навігаційної супутникової системи* (Патент України № 147763).
- Готов, В. М., Третяк, К. Р., & Яхторович, Р. І. (2021). *Спосіб визначення вертикального зміщення антени приймача глобальної навігаційної супутникової системи* (Патент України № 147764).
- Задемленюк, О. (2010). Особливості застосування сервісу ZakPOS у польових умовах. *Вісник геодезії*, 3, 17–20.

- Савчук, В. (2009). Аналіз точності координат у мережі ZakPOS [12, 13]. *Геодезія, картографія і аерофотознімання*, 71, 94–97.
- Calian GNSS. (2025). *GNSS Antennas and Smart Technology*. Retrieved from <https://www.calian.com/advanced-technologies/gnss>
- Cina, A., Piras, M. (2015). Performance of low-cost GPS receivers for land surveying. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 6(5–7), 470–485.
- Hamza, V., Stopar, B., Sterle, O., Pavlovčič-Prešeren, P. (2025). Recent advances and applications of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions*, 29, Article 56.
- Harxon Corporation. (2025). *High-precision GNSS antennas and UHF radios*. Retrieved from <https://en.harxon.com>
- Hofmann-Wellenhof, B., Lichtenegger, H., & Wasle, E. (2008). *GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo, and more*. Springer Science & Business Media.
- Kriemeyer, S., et al. (2022). Field antenna calibration techniques for LC GNSS. *Journal of Geodesy*, 96, 12.
- Natural Resources Canada. (2025, May 14). *Precise Point Positioning – Canadian Spatial Reference System*. <https://webapp.csr-scrs.nrcan-mcan.gc.ca/geod/tools-ouits/ppp.php>
- NovAtel Inc. (2018). *GrafNav/GrafNet®* (Версія 8.70) [Комп'ютерне програмне забезпечення]. <https://novatel.com/products/waypoint-post-processing-software/grafnav>
- Leica Geosystems AG. (2025). *Leica Infinity* (Версія 3.1.1) [Комп'ютерне програмне забезпечення]. <https://leica-geosystems.com/products/gnss-systems/software/leica-infinity>
- PrideLab (2025). *PRIDE-PPPAR* (Версія 3.1.4) [Комп'ютерне програмне забезпечення]. <https://github.com/PrideLab/PRIDE-PPPAR>
- Robustelli, U. et al. (2023). PPP-RTK performance of low-cost receivers using commercial correction services. *GPS Solutions*, 27, Article 33.
- Stopar, B., Sterle, O., Pavlovčič-Prešeren, P., Hamza, V. (2024). Observations and positioning quality of low-cost GNSS receivers: a review. *GPS Solutions*, 28:149.
- Trimble Inc. (2022). *Alloy GNSS Reference Receiver User Guide* (Rev. G, Part Number 022506-243G). Retrieved from https://trl.trimble.com/dscgi/ds.py/Get/File-867350/022506-243G_en-US_Alloy_GNSS_Ref_Receiver_USL_1122.pdf
- Tsakiri, M., Sioulis, D., Piniotis, G. (2017). Evaluation of low-cost GNSS receivers for geodetic applications. *Journal of Applied Geodesy*, 11(4), 233–245.
- Vidal, B., Paziewski, J., Teunissen, P. J. G. (2024). Performance of MF-LC GNSS receivers in PPP and PPP-RTK. *GPS Solutions*, 28, Article 81.
- Ziebart, M. (2001). High precision orbit determination for low Earth orbiting satellites using GPS. University College London.

Kornyliy TRETYAK^{1a}, Anatolii VIVAT^{1b}, Oleh DEMIANIV, Mykhailo NAVODYCH^{1c}, Borys LADANIVSKYY, Serhii TYMOSHYN

Institute of Geodesy, Lviv Polytechnic National University, 12, S. Bandery str., Lviv, 79013, Ukraine, tel: +38(032)2582387, e-mail: ^{1a} kornylii.r.tretyak@lpnu.ua, <https://orcid.org/https://orcid.org/0000-0001-5231-3517>; ^{1b} anatolii.y.vivat@lpnu.ua;

^{1c} mykhailo.b.navodych@lpnu.ua, <https://orcid.org/0000-0001-6074-1247>

DEVELOPMENT, TESTING, AND IMPLEMENTATION OF AN LC GNSS RECEIVER

The article presents an extended analytical review of the current state, historical development, technical characteristics, experimental results, application areas, and prospects of low-cost GNSS receivers (LC GNSS). Single-frequency (SF-LC), dual-frequency (DF-LC), and multi-frequency (MF-LC) models are considered with an analysis of positioning accuracy, stability, multi-path effects, antenna and software compatibility. The advantages and limitations of LC GNSS receivers in geodesy, navigation, structural health monitoring, agriculture, and atmospheric studies are presented. The paper represents the results of the development, design features, and experimental testing of the multi-system LC GNSS receiver “BASE-970”. For testing reason the receiver was applied for geodynamic monitoring in the 2025 Ukrainian Antarctic Expedition to the Akademik Vernadskyi Station, as well as for deformation monitoring of hydraulic engineering structures in Ukraine. Constructions and functional schemes of various receiver modifications are described. Experimental studies of positioning accuracy in static and kinematic modes using Precise Point Positioning (PPP) and differential positioning methods were carried out. The results demonstrate that in static mode, the positioning accuracy reaches 2–4 mm for horizontal coordinates and 3–6 mm for height, which is comparable to the performance of professional receivers of leading global manufacturers. In kinematic mode, the horizontal coordinates are determined with a standard deviation of 25 mm, and the vertical component – 44 mm. The developed receiver is characterized by low cost, high reliability, and wide functional capabilities, which ensures its effective use in scientific research and practical tasks for deformation monitoring of engineering structures and geodynamic phenomena.

Key words: LC GNSS, DF-LC, MF-LC, RTK, PPP, GNSS monitoring, positioning, precision agriculture, multi-path mitigation, GNSS receiver development, GNSS boards.

Надійшла 12.03.2025 р.