

Д.П. Побігайло, аспірант  
С.С. Іськов, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

## Сучасні методи покращення точності GPS-позиціонування

На гірничих підприємствах використання сучасних геодезичних приладів набуває все більшої популярності. Дані технології прості у використанні, здатні виконувати складні математичні розрахунки та значно скорочують час виконання вимірювальних робіт. Незважаючи на всі свої переваги, у деяких випадках сучасні прилади можуть зіткнутися з певними труднощами, які значною мірою можуть впливати на точність вимірювання координат пунктів, час виконання робіт та ефективність застосування того чи іншого приладу в цілому. Під час використання GPS-приймача найважливішим є стабільність отримання даних від супутників. Як правило, на кар'єрах не завжди можна отримати ідеальні умови для використання GPS-приймачів. Основною проблемою є складний рельєф місцевості, що перекриває пряму видимість супутників. Внаслідок утворення такої ситуації приймач не здатен функціонувати належним чином, викликаючи затримки у виконанні робіт. Для вирішення цієї проблеми можна застосовувати такі методи, як D-GPS (Differential GPS), RTK (Real-Time Kinematic), PPP (Precise Point Positioning). Рішенням для покращення супутникового сигналу може стати використання керованої антени, яка є хоч і складною за будовою, але виправдано ефективною. Також розглядається використання віртуального супутника, який слугує як додатковий супутник для корекції геометрії реальних супутників. У статті наведено опис кожного з методів, який використовується для поліпшення радіосигналу. Залежно від складності умов місцевості, вимог до точності та фінансової спроможності гірничого підприємства можливе застосування будь-якого із описаних методів у дійсності.

**Ключові слова:** GNSS; GPS-приймач; RTK; GDOP; видимість супутників; тіньовий ефект; методи покращення точності; GPS-позиціонування у складних умовах.

**Актуальність теми** полягає в тому, що в гірничій промисловості точність вимірювань та ефективність роботи залежать від використання сучасних геодезичних приладів. З одного боку, ці технології значно полегшують роботу та дозволяють швидше виконувати складні вимірювання, з іншого боку вони зіткнутися з труднощами. Для гірничих підприємств важливо мати доступ до надійних та точних методів вимірювань координат, щоб ефективно контролювати процеси видобутку та ведення гірничих робіт. Тому використання методів, які дозволяють покращити стабільність отримання даних від супутників, таких як D-GPS, RTK та PPP, стає все більш актуальним для галузі. Також важливо розглядати нові технології, як-от використання керованих антен та віртуальних супутників, які можуть покращити якість сигналу та забезпечити більш точні результати вимірювань.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори.** Принцип роботи GNSS і поширення радіохвиль в атмосфері описано авторами Elliott D. Kaplan, Christopher J. Hegarty [1]. Використання методів диференціальних GNSS та віртуального супутника при порушенні геометрії супутників наведено в публікації Jae Hwan Bong, Doyoung Kim, Seongkyun Jeong [2], JinHyeok Jang, Dana Park, Sangkyung Sung and Young Jae Lee [3]. Використання кінематики реального часу в GNSS розкрив Ф.Т. Шумаков [4]. Зокрема оцінку тропосферної затримки описано в роботі Sai Xia, Shuanggen Jin, Xuzhan Jin [5].

**Метою статті** є розгляд актуальної проблеми використання GPS-приймачів на гірничих підприємствах та викладення методів, які можуть допомогти у покращенні стабільності та точності вимірювань у складних умовах місцевості.

**Викладення основного матеріалу.** GNSS (Global Navigation Satellite System) є досить ефективною системою навігації. За допомогою GPS можна визначити не тільки точні координати користувача, а й виконувати певний перелік задач. GPS-приймач завдяки програмному забезпеченню LandStar 8 здатен вимірювати довжини ліній, периметри фігур, виконувати підрахунок площ, об'ємів, досліджувати деформації поверхні землі [10] тощо. Такі функції можна застосовувати у реальному часі під час виконання геодезичних чи маркшейдерських робіт без застосування додаткового обладнання. Варто зауважити, що LandStar 8 дозволяє створювати власну базу точок та проводити виніс цих точок в природу. Інтерфейс цієї програми є досить простим та інтуїтивно зрозумілим.

Сучасні GPS-приймачі продовжують розвиватися та стають все більш зручними у використанні. На сьогоднішній день ринок пропонує безліч моделей від різних виробників. Одним із сучасних приймачів є «GPS RTK I83 IMU-RTK GNSS», оснащений IMU (Inertial measurement unit). IMU є інерційно вимірювальним пристроєм, який використовується у такому GPS-приймачі для компенсації нахилів. Це означає, що користувачу не потрібно витрачати час на виставлення GPS-приймача строго по

круглому рівні, оскільки саме вбудований IMU виконує цю функцію. Незважаючи на всю зручність та легкість використання GNSS, вони все ж таки мають певні слабкі ланки.

Використання GNSS у роботі та повсякденному житті можливе завдяки радіохвилям. Радіочастотний спектр є досить широким. Залежно від довжин радіохвиль змінюється їх використання. Для телебачення, радіомовлення та супутникового зв'язку, як правило, використовуються ультракороткі радіохвилі. Деякі із цих хвиль є надзвичайно короткими. Через це вони можуть набувати ефекту «сонячного променю», при якому радіохвиля не здатна оминати великі об'єкти. Така особливість може ускладнювати проведення вимірвальних робіт, оскільки потребує прямої видимості між супутником та приймачем. У супутниковій навігації таке явище має назву «тіньовий ефект». Він виникає, коли GPS-приймач знаходиться у фізично складних умовах. Зазвичай такі умови утворюються, коли GPS-приймач розміщується під уступом в кар'єрі, поблизу будівель, дерев чи будь-яких інших високих об'єктів (рис. 1).

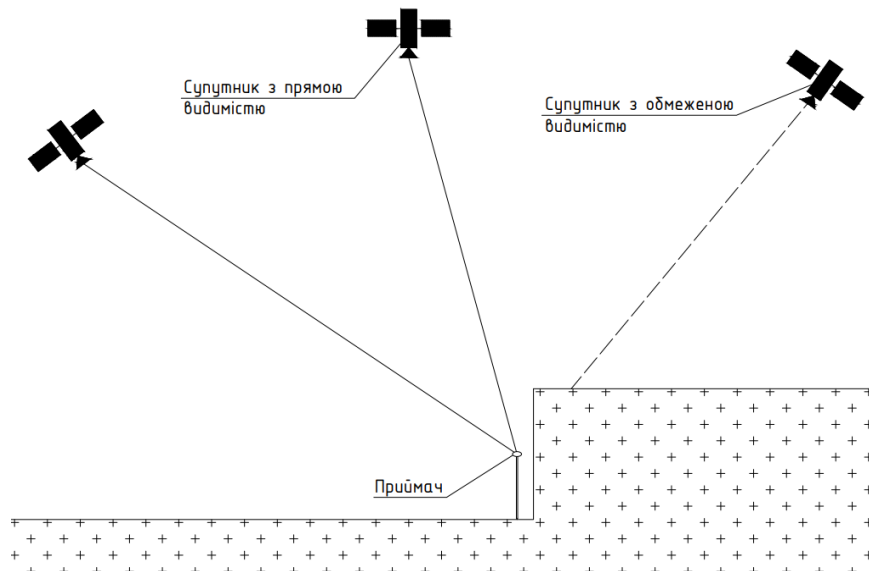


Рис. 1. Тіньовий ефект: внаслідок обмеженої видимості приймач не отримує сигналів від частини супутників, порушується геометрія розміщення видимих супутників та зменшується точність вимірювань

Тіньові ефекти особливо помітні у місцях з високою забудованістю, де супутники можуть бути заблоковані будівлями або іншими об'єктами. У таких випадках можуть бути певні труднощі з отриманням достатньої кількості супутників для точних вимірювань, що призводить до погіршення GDOP (Geometric Dilution of Precision) та точності навігації. GDOP є показником, що використовується у GNSS та характеризує вплив геометричного розміщення супутників на точність визначення координат. Він є важливим показником для користувачів GNSS, оскільки дозволяє оцінити, наскільки надійно можна визначити розташування за допомогою доступних супутників. GDOP може визначатися окремо по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$  для визначення площини найбільшого відхилення. Ця інформація може бути використана для планування маршрутів, навігації, геодезичних вимірювань та інших застосувань, де точне визначення розташування є важливим. Цей показник вимірюється у відсотках або одиницях довжини, таких як метр чи фунт. Як правило, GDOP відображають у вигляді числа більшого за одиницю. Якщо число більше за одиницю, то GDOP є високим. Це означає, що геометрія розміщення супутників в космосі не є достатньо сприятливою для визначення точних координат. І навпаки, коли показник менше одиниці або близький до неї, то вважається, що геометрія супутників сприятлива та координати приймача визначаються більш точно.

Існують також інші фактори, що впливають на роботу приймача. GDOP враховує такі чинники, як висота супутника над горизонтом, широта й довгота приймача. Радіосигнал від високих супутників зазвичай зазнає менше відбиттів та впливу атмосфери. Це пов'язано з тим, що менші кутові відхилення спрямовані більш вертикально, ніж у супутників низьких орбіт, що зменшує ймовірність відбиття та розсіювання. Відповідно шлях проходження сигналів від високих супутників коротший [1]. Також варто сказати, що супутники, які лежать вище, зазвичай мають кращий вид на відкрите небо, що зменшує ймовірність блокування сигналів будь-якими перешкодами, такими як будівлі чи борти кар'єру. Супутники на віддалених орбітах зазвичай розміщені більш рівномірно навколо небесної сфери, що може забезпечити кращу геометрію для визначення місця розташування. Залежно від руху супутників та їх положення на орбіті геометрія розташування супутників може змінюватися з часом, що може впливати на точність вимірювань, оскільки GDOP також буде постійно змінюватися.

Затримки у проведенні маркшейдерських робіт можуть повпливати на роботу гірничого підприємства та негативно вплинути на їх економічний стан. Кар'єри із крутими уступами або з великою їх кількістю потребують готових рішень у розв'язанні цієї проблеми. Виокремлюється декілька методів, які можуть застосовуватися на гірничому підприємстві для стабільної роботи GPS-приймача.

1. D-GPS (Differential GPS) – метод, що використовується для підвищення точності звичайного GPS за рахунок отримання корекційних сигналів від однієї або декількох станцій референції. Станція референції становить собою базовий приймач, точні координати якого відомі. За рахунок визначення різниці відомого положення та положення, обчисленого GPS-приймачем, визначається корекційна інформація для рухомого приймача. Принцип роботи цього методу полягає в тому, що на користувачський (рухомий) приймач GPS надсилаються ці корекційні сигнали від станцій референції, які дозволяють покращити точність його вимірювань. Для використання методу D-GPS потрібен GPS-приймач, а також доступ до корекційних сигналів, які можна отримати від різних джерел, враховуючи базові станції або корекційні сервіси. Перевагами такого методу є відносно висока точність, яка складає від кількох метрів до декількох десятків сантиметрів. Для роботи з D-GPS зазвичай не потрібно підключати платні послуги, якщо відбувається користування публічними джерелами сигналів GPS та є доступ до базових станцій для коригування даних. Проте для отримання доступу до більш точних корекційних даних або послуг спеціалізованих провайдерів може знадобитися платна підписка. Значним недоліком використання цього методу є обмежена дальність дії від базових станцій. D-GPS може бути використаний для покращення точності GPS у морській навігації, автомобільних системах, в аграрному секторі та для покращення точності посадки літаків. Цей метод може бути ефективним для зменшення впливу помилок, таких як іоносферна затримка, що може виникати під час сонячних бур, що є досить актуальним на сьогоднішній день.

2. RTK (Real-Time Kinematic) – метод, який використовується для отримання високоточних геодезичних вимірювань у реальному часі. Принцип роботи цього методу полягає в тому, що GPS-приймачі отримують корекційні сигнали від базової станції RTK, що дозволяє досягнути високої точності вимірювань. В методі можуть використовуватися як один, так і два GPS-приймачі для підвищення точності отриманих даних. Під час використання одного приймача обчислення координат відбувається на основі радіосигналів, отриманих від супутників, та поправок від RTK-станцій. При використанні двох приймачів один з них використовується як додаткова базова станція, яка також надсилає дані до рухомого приймача. Основною перевагою у використанні методу RTK є досягнення точності до декількох сантиметрів. Недоліки методу полягають у необхідності наявності поблизу місця вимірювання базової станції RTK та інтернет-підключення. Також варто врахувати, що користування корекційними даними від RTK-станцій є платною послугою. Метод RTK може бути використаний у сільському господарстві для автоматизації процесів тракторного ведення, навігації, створення цифрових моделей рельєфу, контролю за будівельними роботами, створення точних карт із зазначенням географічних об'єктів. Також цей метод підходить для кар'єрів, оскільки можна встановити базову станцію та виконувати вимірювальні роботи у місцях, де відсутня пряма видимість супутників.

3. PPP (Precise Point Positioning) – метод, що використовується для визначення високоточного місцезнаходження без потреби в базовій станції. PPP використовує різні джерела для оцінки помилок і корекції сигналів GNSS, зокрема моделі атмосферних затримок, моделі гравітаційного поля Землі, інформацію від супутників GNSS, дані від станцій референції (у деяких випадках). Доступ до даних моделей надається через платні сервіси. Принцип роботи методу полягає в тому, що GPS-приймач отримує корекції через інтернет-підключення або інші джерела для покращення точності вимірювань. Точність такого методу може становити від кількох сантиметрів до декількох десятків сантиметрів. Основними перевагами є висока точність і незалежність від базової станції, але може бути обмежена доступністю сигналів корекцій та вимагає стабільного інтернет-зв'язку. Оскільки метод PPP використовує складні математичні моделі та виконує велику кількість обчислень, він потребує більш потужного обладнання порівняно з методами D-GPS та RTK. PPP може бути використаний для вивчення тектонічних рухів земної кори та моніторингу зсувів ґрунту, створення точних цифрових моделей місцевості та визначення висот, підтримки навігації в умовах, де немає доступу до сигналів базових станцій, наприклад, у віддалених районах або в морі. PPP може бути ефективним методом для кар'єрів, де немає можливості встановлення базової станції або коли потрібна висока точність без прив'язки до стаціонарних точок.

4. Використання керованих антен. Керована антена – це антена, яка може автоматично коригувати своє положення для отримання максимально сильного сигналу від супутників. Вона використовується для підвищення якості та стабільності супутникового сигналу, особливо в умовах зі значними перешкодами, які можуть призводити до блокування сигналу або втрати зв'язку. Керована антена працює за допомогою системи керування, яка включає сенсори для визначення напрямку сигналу від супутників і моторизовані механізми, які можуть коригувати положення антени для максимального отримання сигналу. Система керування може використовувати дані від супутників для визначення оптимального положення антени і підтримувати його навіть під час руху або зміни умов навколишнього середовища. Принцип роботи керованої антени полягає в тому, що антена отримує сигнал від супутника

та здійснює його розповсюдження за допомогою спеціальних алгоритмів та електроніки. Сигнал спочатку приймається антеною, після чого він обробляється внутрішньою електронікою, яка визначає необхідні корекції для вирішення певних проблем, таких як множинне відображення сигналу (мультипатеринг), спотворення сигналу від атмосферних явищ та інших факторів. Після обробки сигналу антена відправляє його у відповідному напрямку, щоб забезпечити максимальну якість та стабільність зв'язку з супутником. Основними перевагами використання керованої антени є її адаптація до змінних умов навколишнього середовища, можливість забезпечити максимальну силу сигналу та мінімізувати його спотворення, дозволяє підтримувати стабільне з'єднання з супутниками та отримувати точні координати. До недоліків можна зарахувати складність систем керування та велику кількість деталей, наявність додаткового джерела живлення, необхідність у регулярному обслуговуванні, високу вартість. Варто сказати, що використання керованих антен вимагає додаткових кваліфікованих кадрів – інженерів з технічного обслуговування, спеціалістів з програмного забезпечення, техніків з монтажу та сервісного обслуговування, спеціалістів з телекомунікації. Керовані антени застосовуються в різних галузях, враховуючи телекомунікації, радіоастрономію, радіолокацію та супутникову навігацію.

5. Використання віртуального супутника. Віртуальний супутник (або псевдосупутник) – це уявний супутник, який використовується для компенсації втрати сигналу від реальних фізичних супутників в умовах обмеженої видимості або в інших складних умовах. Основна ідея полягає у використанні додаткового сигналу, створеного шляхом математичного моделювання та обробки інформації від наявних фізичних супутників. Необхідно враховувати, що віртуальні супутники не існують фізично і використовуються лише для обчислень. Також важливо мати точну модель оточуючого середовища та спотворень, щоб правильно враховувати їх під час створення віртуальних супутників. Для використання віртуального супутника при роботі з GPS-приймачем потрібно мати спеціальне програмне забезпечення, яке встановлюється на GPS-приймач або пристрій, який підключається до приймача. Таке програмне забезпечення може бути як платним, так і бути у вільному доступі. Коли використовується віртуальний супутник, програмне забезпечення створює уявний супутник, який додається до списку супутників, що використовуються для позиціонування. Цей уявний супутник може мати координати та параметри, які відрізняються від реальних супутників, що дозволяє компенсувати проблеми з отриманням сигналу від реальних супутників. Однак використання віртуального супутника може бути обмеженим через необхідність точної моделі навколишнього середовища та спотворень, щоб правильно враховувати їх час створення віртуального супутника. Також ефективність використання віртуального супутника може залежати від умов оточення та наявності інших сигналів, що можуть впливати на роботу GPS-приймача. За ідеальних умов, коли віртуальний супутник коректно враховує всі впливи на сигнал (наприклад, перешкоди або атмосферні затримки), точність може бути порівняно високою і становити кілька сантиметрів. Проте в реальних умовах точність може бути обмеженою через недосконалість моделей навколишнього середовища або через несприятливі умови для прийому сигналу.

6. Використання приймачів із багаточастотним доступом. Приймачі з багаточастотним доступом (Multi-Frequency GPS Receivers) – це приймачі, які можуть одночасно отримувати сигнали з різних частот GPS. Зазвичай GPS супутники випромінюють сигнали на двох основних частотах: L1 та L2. Деякі більш сучасні приймачі також можуть отримувати сигнали на третій частоті – L5. Такі приймачі можуть приймати сигнали не тільки від GPS, але і від інших супутникових систем, таких як ГЛОНАСС, Galileo, BeiDou та інші. Принцип роботи багаточастотних GPS-приймачів полягає в одночасному отриманні сигналів з різних частот, які випромінюються супутниками. Кожна частота має свої особливості у взаємодії з атмосферою та поверхнею Землі, що дозволяє враховувати та компенсувати ці впливи для отримання більш точних результатів. Сам приймач має вбудований алгоритм обробки сигналів, який використовує отримані дані для розрахунку своєї географічної позиції. Він також може використовувати інформацію про ефемериди (траєкторії руху супутників) та корекційні сигнали для поліпшення точності позиціонування. Використання різних частот дозволяє зменшити вплив помилок і спотворень сигналу, що може покращити стабільність отриманих даних та зменшити вплив відбиття сигналу від перешкод. За ідеальних умов, коли приймач має доступ до сигналів з різних супутникових систем і отримує коректні поправки, точність може бути на рівні декількох сантиметрів. Проте для отримання сигналів із системи ГЛОНАСС, Galileo або інших систем, які не є частиною системи GPS, може бути необхідна додаткова підписка або доступ до платформи, що надає ці дані. Точні умови можуть відрізнятися залежно від виробника приймача та використовуваного сервісу. Багаточастотні приймачі широко застосовуються в точному землевпорядкуванні, сільському господарстві, будівництві, транспорті та логістиці.

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** Для використання GNSS у складних умовах існують різні методи та технології, що покращують якість та стабільність супутникового сигналу. Для гірничих підприємств найефективнішим та оптимальним методом є використання методу RTK та, за наявності достатнього фінансування, застосування керованих антен. Варто сказати, що точність сигналу покращується пропорційно до кількості видимих супутників. Звідси випливає, що чим більше супутників обертаються навколо Землі, то тим якіснішим та більш надійним буде сигнал. Проте в такій ситуації не

потрібно забувати про наслідки великої кількості супутників на орбіті. На сьогоднішній день на орбіті Землі обертаються тисячі уламків космічного сміття. Такі уламки становлять велику загрозу. Зустріч уламка з супутником може вивести його з ладу, збити з орбіти та утворити ще більшу кількість космічного сміття. Тому виведення на орбіту додаткової кількості супутників є екологічно неприйнятним. Розвиток технологій у перспективі також має зосереджуватися на збереженні природного середовища. Тому майбутні дослідження можуть бути спрямовані на розвиток віртуальних супутників та систем, що не потребують додаткового виведення на орбіту.

#### References:

1. Kaplan, E.D. and Hegarty, C.J. (2006), *Understanding GPS: principles and applications*, 2nd ed., ARTECH HOUSE INC, Boston, London, 723 p.
2. Bong, J.H., Kim, D. and Jeong, S. (2023), «GNSS performance enhancement using measurement estimation in harsh environment», *PLOS ONE*, Vol. 18, No. 9, pp. 1–21, doi: 10.1371/journal.pone.0292116.
3. Jang, J.H. et al. (2022), «HDOP and VDOP Analysis in an Ideal Placement Environment for Dual GNSSs», *Sensors*, Vol. 22, No. 9, pp. 1–21, doi: 10.3390/s22093475.
4. Shumakov, F.T. (2009), *Супутникова геодезія. Конспект лекцій з дисципліни, для студентів 4 курсу денної форми навчання, спеціальності 7.070900 «Інформаційні системи та технології»*, KhNAMH, Kharkiv, 88 p.
5. Xia, S., Jin, S. and Jin, X. (2023), «Estimation and Evaluation of Zenith Tropospheric Delay from Single and Multiple GNSS Observations», *Remote Sensing*, Vol. 15, No. 23, pp. 1–19, doi: 10.3390/rs15235457.
6. Ogutcu, S. et al. (2023), «GPS + Galileo + BDS-3 medium to long-range single-baseline RTK: an alternative for network-based RTK?», *Journal of Navigation*, pp. 1–20, doi: 10.1017/s0373463323000243.
7. Lyu, Z. and Gao, Y. (2020), «An SVM Based Weight Scheme for Improving Kinematic GNSS Positioning Accuracy with Low-Cost GNSS Receiver in Urban Environments», *Sensors*, Vol. 20, No. 24, pp. 1–14, doi: 10.3390/s20247265.
8. Lee, H.S. et al. (2023), «Assessing efficiency of GPS ephemerides in different region using Precise Point Positioning», *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vol. XLVIII-4/W6-2022, pp. 195–199, doi: 10.5194/isprs-archives-xxviii-4-w6-2022-195-2023.
9. Japan Aerospace Exploration Agency (2021), Yu, N. and Toru, Y., «Enhancing Navigation Accuracy in Geostationary Orbit Through Utilization of Regional Navigation Satellite System», 22 p., doi: 10.21203/rs.3.rs-2662234/v1.
10. Dolgikh, O. et al. (2021), «The use of the construction with a digital camera and GPS receiver while researching dangerous areas», *E3S Web of Conferences*, Vol. 280, doi: 10.1051/e3sconf/202128008009.

**Побігайло** Діана Петрівна – аспірант, асистент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

Наукові інтереси:

- супутникова навігація.

**Іськов** Сергій Станіславович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри маркшейдерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<http://orcid.org/0000-0002-9618-489X>.

Наукові інтереси:

- проектування гірничих підприємств;
- геолого-економічна оцінка родовищ корисних копалин;
- маркшейдерська справа.

**Pobihailo D.P., Iskov S.S.**

#### Modern methods of improving the accuracy of GPS positioning

At mining enterprises, the use of modern geodetic devices is gaining more and more popularity. These technologies are easy to use, capable of performing complex mathematical calculations and significantly shorten the time of measurement work. Despite all their advantages, in some cases, modern devices can face certain difficulties, which can significantly affect the accuracy of measuring the coordinates of points, the time it takes to complete a job, and the efficiency of using a particular device in general. When using a GPS receiver, the most important thing is the stability of receiving data from satellites. As a rule, quarries do not always provide ideal conditions for using GPS receivers. The main problem is the complex relief of the area, which blocks the direct visibility of the satellites. Due to the formation of such a situation, the receiver is unable to function properly, causing delays in the performance of works. Such methods as D-GPS (Differential GPS), RTK (Real-Time Kinematic), PPP (Precise Point Positioning) can be used to solve this problem. The solution to improve the satellite signal can be the use of a controlled antenna, which, although complex in structure, is reasonably effective. The use of a virtual satellite, which serves as an additional satellite to correct the geometry of real satellites, is also considered. The article describes each of the methods used to improve the radio signal. Depending on the complexity of the local conditions, the requirements for accuracy and the financial capacity of the mining enterprise, any of the described methods may be used in reality.

**Keywords:** GNSS; GPS receive; RTK; GDOP; visibility of satellites; shadow effect; methods to improve accuracy; GPS positioning in difficult conditions.

Стаття надійшла до редакції 17.05.2024.