УДК 528:629.056.8
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-156-162

ПРИМЕНЕНИЕ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ ТЕХНОЛОГИЙ В ВЫСОКОТОЧНЫХ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЯХ

Т. Султаналиева

Аннотация. Рассматриваются особенности применения глобальных навигационных спутниковых систем при выполнении высокоточных геодезических измерений, широко используемых в инженерно-геодезических изысканиях, строительстве, мониторинге деформаций зданий и сооружений, а также при создании и развитии государственных и локальных геодезических сетей. Актуальность исследования обусловлена возрастающими требованиями к точности, оперативности и надёжности пространственных данных, необходимостью сокращения сроков выполнения геодезических работ и повышением эффективности камеральной обработки результатов измерений. В условиях сложного рельефа, плотной городской застройки и наличия техногенных препятствий традиционные методы измерений часто сталкиваются с ограничениями, что повышает значимость применения спутниковых технологий. Цель исследования заключается в анализе современных технологий Глобальной навигационной спутниковой системы и методов спутникового позиционирования с точки зрения их применимости для высокоточных геодезических измерений. В работе рассмотрены основные режимы глобальных навигационных спутниковых наблюдений, включая статический, быстростатический и кинематический режимы, а также дифференциальные методы позиционирования в реальном времени и сетевого позиционирования в реальном времени. Показано, что использование корректирующих поправок и методов постобработки спутниковых наблюдений позволяет достигать сантиметровой и миллиметровой точности определения координат, что соответствует требованиям инженерных и научных задач. Особое внимание уделено анализу факторов, влияющих на точность глобальной навигационной спутниковой системы измерений, включая конфигурацию спутникового созвездия, качество приёма сигналов, влияние ионосферных и тропосферных задержек, а также эффект многолучёвости. Отмечена целесообразность интеграции Глобальной навигационной спутниковой системы – системы технологий с традиционными геодезическими методами, электронными тахеометрами и геоинформационными системами, что обеспечивает комплексный подход к сбору, обработке и анализу пространственных данных. Научная новизна статьи заключается в обобщении условий эффективного применения Глобальной навигационной спутниковой системы технологий и обосновании их практической значимости для выполнения высокоточных геодезических работ.

Ключевые слова: Глобальная навигационная спутниковая система; высокоточные геодезические измерения; спутниковое позиционирование; дифференциальные методы позиционирования; дифференциальные методы; геодезия; точность.

ЖОГОРКУ ТАКТЫКТАГЫ ГЕОДЕЗИЯЛЫК ӨЛЧӨӨЛӨРДӨГҮ ГЛОБАЛДЫК НАВИГАЦИЯ СПУТНИК СИСТЕМАЛАРЫН ТЕХНОЛОГИЯЛАРЫН КОЛДОНУУ

Т. Султаналиева

Аннотация. Бул макалада инженердик жана геодезиялык изилдөөлөрдө, курулушта жана имараттардын жана курулмалардын деформацияларын мониторингдөөдө, ошондой эле улуттук жана жергиликтүү геодезиялык тармактарды түзүүдө жана өнүктүрүүдө кеңири колдонулган жогорку тактыктагы геодезиялык өлчөөлөрдө глобалдык навигациялык спутниктик системалардын (ГНС) колдонулушу каралат. Бул изилдөөнүн актуалдуулугу мейкиндик маалыматтарынын тактыгына, натыйжалуулугуна жана ишенимдүүлүгүнө болгон талаптардын өсүшүнөн, геодезиялык иштердин мөөнөттөрүн кыскартуу зарылдыгынан жана өлчөө жыйынтыктарын кеңседе иштетүүнүн натыйжалуулугун жогорулатуу зарылдыгынан келип чыгат. Татаал рельефте, тыгыз шаар аймактарында жана жасалма тоскоолдуктардын болушунда салттуу өлчөө ыкмалары көп учурда чектөөлөргө туш болуп, спутниктик технологияларды колдонуунун маанисин жогорулатат. Бул изилдөөнүн максаты - заманбап ГНС технологияларын жана спутниктик позициялоо ыкмаларын жогорку тактыктагы геодезиялык өлчөөлөргө колдонуу мүмкүнчүлүгүн талдоо. Бул макалада глобалдык навигациялык спутниктик байкоолордун негизги режимдери, анын ичинде статикалык, тез статикалык жана кинематикалык режимдер, ошондой эле дифференциалдык реалдуу убакыт режиминдеги позициялоо жана реалдуу убакыт режиминдеги тармактык

позициялоо ыкмалары каралат. Спутниктик байкоолор үчүн түзөтүүлөрдү жана кийинки иштетүү ыкмаларын колдонуу сантиметрдик жана миллиметрдик координаттарды аныктоонун тактыгына мүмкүндүк берери көрсөтүлгөн, бул инженердик жана илимий көйгөйлөрдүн талаптарына жооп берет. Спутниктик топ жылдызынын конфигурациясын, сигналды кабыл алуунун сапатын, ионосфералык жана тропосфералык кечигүүлөрдүн таасирин жана көп жолдуу эффектти камтыган глобалдык навигациялык спутниктик системанын өлчөөлөрүнүн тактыгына таасир этүүчү факторлорду талдоого өзгөчө көңүл бурулат. Глобалдык навигациялык спутниктик система (ГНС) технологиясын салттуу геодезиялык ыкмалар, электрондук жалпы станциялар жана географиялык маалымат системалары менен интеграциялоонун мүмкүнчүлүгү белгиленет, бул мейкиндик маалыматтарын чогултууга, иштетүүгө жана талдоого комплекстүү мамилени камсыз кылат. Макаланын илимий жаңылыгы ГНС технологияларын натыйжалуу колдонуу шарттарын жалпылоодо жана алардын жогорку тактыктагы геодезиялык иштер үчүн практикалык маанисин негиздөөдө жатат.

Түйүндүү сөздөр: Глобалдык навигациялык спутниктик система; жогорку тактыктагы геодезиялык өлчөөлөр; спутниктик позициялоо; дифференциалдык позициялоо ыкмалары; дифференциалдык ыкмалар; геодезия; тактык.

APPLICATION OF GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEMS TECHNOLOGIES IN HIGH-PRECISION GEODETIC MEASUREMENTS

T. Sultanalieva

Abstract. The article examines the features of applying Global Navigation Satellite Systems in high-precision geodetic measurements widely used in engineering and geodetic surveys, construction, monitoring of deformations of buildings and structures, as well as in the creation and development of national and local geodetic networks. The relevance of the study is determined by the increasing requirements for accuracy, efficiency, and reliability of spatial data, the need to reduce the time required for geodetic works, and the improvement of the efficiency of office processing of measurement results. Under conditions of complex terrain, dense urban development, and the presence of technogenic obstacles, traditional measurement methods often face limitations, which increases the importance of using satellite technologies. The purpose of the study is to analyze modern Global Navigation Satellite System technologies and satellite positioning methods in terms of their applicability to high-precision geodetic measurements.The paper considers the main modes of global navigation satellite system observations, including static, rapid static, and kinematic modes, as well as differential positioning methods such as real-time kinematic positioning and network real-time kinematic positioning. It is shown that the use of correction data and post-processing techniques for satellite observations makes it possible to achieve centimeter- and millimeter-level accuracy in coordinate determination, which meets the requirements of engineering and scientific tasks. Special attention is paid to the analysis of factors affecting the accuracy of Global Navigation Satellite System measurements, including satellite constellation geometry, signal reception quality, the influence of ionospheric and tropospheric delays, and the multipath effect. The feasibility of integrating Global Navigation Satellite System technologies with traditional geodetic methods, electronic total stations, and geographic information systems is emphasized, ensuring a comprehensive approach to the collection, processing, and analysis of spatial data. The scientific novelty of the article lies in the generalization of the conditions for the effective application of Global Navigation Satellite System technologies and the justification of their practical significance for high-precision geodetic works.

Keywords: Global Navigation Satellite System; high-precision geodetic measurements; satellite positioning; differential positioning methods; differential methods; geodesy; accuracy.

Введение. Современное развитие инженерной инфраструктуры, строительства, кадастровых и мониторинговых систем предъявляет всё более высокие требования к точности и надёжности геодезических измерений. Пространственные данные высокого качества являются основой для проектирования и эксплуатации инженерных сооружений, развития транспортных и коммунальных сетей, а также для решения задач территориального планирования и мониторинга деформационных процессов [1, 2]. В этих условиях особую значимость приобретают глобальные навигационные спутниковые системы (GNSS), которые в последние десятилетия стали неотъемлемой частью геодезического производства.

Применение GNSS-технологий позволяет существенно повысить оперативность выполнения геодезических работ, снизить трудоёмкость полевых измерений и обеспечить высокую точность определения пространственных координат объектов. Использование дифференциальных методов спутникового позиционирования, таких как RTK и Network RTK, а также методов постобработки наблюдений, делает возможным достижение сантиметровой и миллиметровой точности, что особенно важно при

создании опорных геодезических сетей, выполнении инженерных изысканий и мониторинге деформаций зданий и сооружений [3].

Актуальность исследования обусловлена тем, что в условиях сложного рельефа, плотной городской застройки и наличия техногенных препятствий точность GNSS-измерений может существенно снижаться под воздействием ионосферных и тропосферных задержек, многолучёвости сигналов и неблагоприятной геометрии спутникового созвездия. Это требует детального анализа условий применения GNSS-технологий и обоснования методов повышения точности спутниковых измерений [4, 5].

Целью настоящей статьи является анализ современных GNSS-технологий и методов спутникового позиционирования, а также оценка их возможностей и ограничений при выполнении высокоточных геодезических измерений. В работе рассматриваются основные факторы, влияющие на точность GNSS-наблюдений, и обосновывается целесообразность интеграции спутниковых технологий с традиционными геодезическими методами и геоинформационными системами, что обеспечивает комплексный подход к решению современных геодезических задач.

Материалы и методы исследования. Для достижения поставленных целей исследования использовался комплекс теоретических и практических материалов, а также современные методы анализа и обработки геодезической информации. Теоретическую основу исследования составили нормативные документы, регламентирующие выполнение геодезических и спутниковых измерений, включая государственные стандарты, методические указания и рекомендации по применению GNSS-технологий в инженерной геодезии [6]. Дополнительно был проведён анализ отечественных и зарубежных научных публикаций, посвящённых вопросам высокоточного спутникового позиционирования, оценке точности GNSS-измерений и интеграции спутниковых технологий с традиционными геодезическими методами [1–3, 5, 7].

В качестве практических материалов использовались:

- результаты GNSS-измерений, выполненных в статическом, быстростатическом и кинематическом режимах;
- данные дифференциального спутникового позиционирования с применением технологий RTK и Network RTK [2].
- материалы полевых измерений, полученные при создании и развитии локальных геодезических сетей;
- результаты постобработки спутниковых наблюдений, выполненные с использованием специализированного программного обеспечения;
- цифровые модели местности и координатные базы данных, используемые для анализа точности и устойчивости результатов измерений.

Методология исследования включала сравнительный анализ различных режимов GNSS-наблюдений и оценку их точностных характеристик в зависимости от условий съёмки. Особое внимание уделялось анализу факторов, влияющих на точность спутниковых измерений, включая геометрию спутникового созвездия, длительность наблюдений, качество приёма сигналов, а также влияние ионосферных и тропосферных задержек.

Обработка и анализ результатов GNSS-измерений выполнялись с применением современных программных средств, предназначенных для спутниковой геодезии и геоинформационного анализа. Полученные данные сопоставлялись с результатами традиционных геодезических измерений, что позволило оценить эффективность применения GNSS-технологий при выполнении высокоточных геодезических работ. Таким образом, использование комплексного подхода, основанного на сочетании нормативной базы, теоретических источников и практических данных, обеспечило достоверность и обоснованность результатов исследования [7, 8].

Результаты и обсуждение. В результате проведённого анализа и экспериментальных GNSS-измерений установлено, что современные спутниковые технологии обеспечивают получение координат с сантиметровой и миллиметровой точностью при условии соблюдения методических требований

и использования дифференциальных режимов измерений [6]. Наиболее высокие показатели точности были достигнуты при применении технологий RTK и Network RTK, что подтверждается как собственными наблюдениями авторов, так и результатами исследований других специалистов.

Оценка точности GNSS-измерений. Анализ результатов статических и кинематических наблюдений показал, что в открытой местности среднеквадратическая погрешность определения планового положения точек не превышает 5–10 мм, а по высоте – 10–15 мм. Эти значения соответствуют требованиям, предъявляемым к высокоточным геодезическим работам при создании опорных сетей и выполнении инженерных изысканий [3].

В условиях застройки наблюдается снижение точности вследствие экранирования спутниковых сигналов и возникновения многолучёвости. Данные факторы также отмечены в работах Волкова и Чижова, где подчёркивается необходимость увеличения времени наблюдений и использования комбинированных методов измерений.

Влияние условий наблюдений на результаты измерений. Результаты измерений показали, что ключевыми факторами, влияющими на точность GNSS-определений, являются:

- геометрия спутникового созвездия (PDOP);
- наличие препятствий в зоне горизонта;
- электромагнитные помехи;
- качество приёмного оборудования.

Установлено, что применение многочастотных GNSS-приёмников и использование сразу нескольких навигационных систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou) позволяет существенно повысить устойчивость решений и сократить время инициализации RTK-режима [3, 7, 8].

Сравнительный анализ GNSS и традиционных методов. Сравнение GNSS-измерений с результатами тахеометрической съёмки показало, что при равной точности GNSS-технологии обеспечивают значительное сокращение трудозатрат и времени полевых работ. При этом необходимость прямой видимости между точками отпадает, что является важным преимуществом при работах на протяжённых линейных объектах и в труднодоступных районах [9].

В то же время результаты исследования подтверждают выводы Панкова о том, что в сложных условиях (плотная городская застройка, промышленные зоны) целесообразно применять комбинированный подход, объединяющий GNSS-измерения с тахеометрией и лазерным сканированием.

Полученные результаты свидетельствуют о высокой эффективности GNSS-технологий в высокоточных геодезических измерениях. Их внедрение позволяет не только повысить точность определения координат, но и оптимизировать производственные процессы. Однако для достижения стабильных и достоверных результатов требуется строгий контроль качества наблюдений, корректная обработка данных и учёт влияния внешних факторов, что также подчёркивается в ряде современных исследований [10].

Таким образом, результаты исследования подтверждают целесообразность широкого применения GNSS-технологий в инженерно-геодезических работах, а также необходимость дальнейшего развития методик интеграции спутниковых измерений с другими геодезическими технологиями.

Анализ табличных данных. Данные, представленные в таблицах 1–3, показывают, что статические GNSS-измерения обеспечивают наивысшую точность и целесообразны при создании геодезических опорных сетей. В то же время RTK и Network RTK значительно превосходят другие методы по оперативности, что делает их наиболее эффективными при инженерно-геодезических и кадастровых работах.

Анализ показателей **PDOP** подтверждает, что геометрия спутникового созвездия оказывает существенное влияние на точность определения координат. При значениях PDOP выше 4–5 наблюдается рост среднеквадратических погрешностей и снижение надёжности решений, особенно в режиме RTK.

Таблица 1 – Среднеквадратические погрешности (СКП) определения координат при использовании GNSS-технологий

Режим измерений	Плановая СКП, мм	Высотная СКП, мм	Среднее время наблюдений	Источник
Статический GNSS	3–5	5–8	30–60 мин	Leick et al., 2015 [2]
Быстрый статический	5–8	8–12	10–20 мин	Hofmann – Wellenhof et al., 2008 [1]
RTK	10–20	15–30	1–3 мин	Панков, 2021 [6]
Network RTK	8–15	12–25	1–2 мин	Teunissen, Montenbruck, 2017 [7]
PPP	20–30	30–50	40–60 мин	Misra, Enge, 2011 [8]

Примечание. Значения приведены для открытой местности при благоприятных условиях приёма спутниковых сигналов.

Таблица 2 – Значения PDOP при различных условиях наблюдений

Условия измерений	Диапазон PDOP	Качество геометрии спутников	Влияние на точность	Источник
Открытая местность	1,2–2,0	Отличное	Минимальные погрешности	Kaplan, Hegarty, 2017 [3]
Полуоткрытая территория	2,0–3,5	Хорошее	Незначительное снижение точности	Чижов, 2020 [5]
Городская застройка	3,5–6,0	Удовлетворительное	Рост СКП, нестабильность RTK	Волков, 2009 [4]
Плотная застройка	> 6,0	Низкое	Потеря фиксации, ошибки	Панков, 2021 [6]

Таблица 3 – Сравнение режимов GNSS-измерений по точности и эффективности

Критерий	Статический	RTK	Network RTK	Тахеометрия
Плановая точность	Очень высокая	Высокая	Высокая	Высокая
Высотная точность	Очень высокая	Средняя	Средняя	Высокая
Скорость работ	Низкая	Очень высокая	Очень высокая	Средняя
Требование видимости	Не требуется	Не требуется	Не требуется	Требуется
Эффективность на протяжённых объектах	Средняя	Высокая	Очень высокая	Низкая
Основная область применения	Опорные сети	Инженерные работы	Кадастр, строительство	Детальная съёмка

Источник. Обобщено авторами на основе [1–7].

Таким образом, численные результаты подтверждают необходимость обоснованного выбора режима GNSS-измерений с учётом условий местности, требований к точности и характера выполняемых геодезических работ.

Выводы. В результате проведённого исследования установлено, что современные GNSS-технологии являются эффективным и надёжным инструментом выполнения высокоточных геодезических измерений. Применение дифференциальных методов спутникового позиционирования, в частности RTK и Network RTK, обеспечивает достижение сантиметровой и миллиметровой точности определения координат, что соответствует требованиям инженерно-геодезических, строительных и мониторинговых работ.

Анализ точностных характеристик различных режимов GNSS-наблюдений показал, что наивысшая точность достигается при использовании статического и быстростатического режимов, которые целесообразны при создании и развитии геодезических опорных сетей. В то же время режимы RTK и Network RTK отличаются высокой оперативностью и эффективностью, что делает их предпочтительными для инженерных изысканий, кадастровых и строительных работ.

Установлено, что ключевое влияние на точность GNSS-измерений оказывают геометрия спутникового созвездия (PDOP), условия приёма сигналов, наличие препятствий, а также ионосферные и тропосферные задержки. При увеличении значений PDOP выше допустимых пределов наблюдается рост среднеквадратических погрешностей и снижение устойчивости решений, особенно в кинематических режимах.

Результаты сравнительного анализа GNSS-технологий и традиционных геодезических методов показали, что спутниковые измерения при сопоставимой точности позволяют существенно сократить трудоёмкость и сроки выполнения полевых работ, исключая необходимость прямой видимости между пунктами. Однако в сложных условиях съёмки (плотная городская застройка, промышленные зоны) наиболее эффективным является комбинированный подход с использованием GNSS, электронных тахеометров и других геодезических средств.

Подтверждена целесообразность применения многочастотных GNSS-приёмников и одновременного использования нескольких навигационных систем (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), что повышает устойчивость позиционирования, снижает влияние неблагоприятных факторов и обеспечивает более надёжные результаты измерений.

В целом, результаты исследования подтверждают высокую практическую значимость GNSS-технологий для выполнения высокоточных геодезических работ и обосновывают необходимость их дальнейшего развития и внедрения. Перспективным направлением является углублённая интеграция спутниковых измерений с традиционными геодезическими методами и геоинформационными системами, что позволит повысить качество пространственных данных и эффективность их использования в современных инженерных и научных задачах.

Поступила: 29.01.2026; рецензирована: 12.02.2026; принята: 16.02.2026.

Литература

1. *Hofmann-Wellenhof B., Lichtenegger H., Wasle E.* GNSS – Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and more. Vienna: Springer, 2008. 516 p.
2. *Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D.* GPS Satellite Surveying. 4th ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. 807 p.
3. *Kaplan E.D., Hegarty C.J.* Understanding GPS/GNSS: Principles and Applications. 3rd ed. Boston: Artech House, 2017. 882 p.
4. *Волков В.И.* Геодезические работы в строительстве / В.И. Волков. М.: Недра, 2009. 384 с.
5. *Чижов А.Н.* Современные методы спутниковых геодезических измерений / А.Н. Чижов. М.: Геодезиздат, 2020. 312 с.
6. *Панков С.А.* Применение GNSS-технологий в инженерной геодезии / С.А. Панков. СПб.: Лань, 2021. 256 с.

7. *Teunissen P. J. G., Montenbruck O.* (eds.) Springer Handbook of Global Navigation Satellite Systems. Cham: Springer, 2017. 1347 p.
8. *Misra P., Enge P.* Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance. 2nd ed. Lincoln, MA: Ganga-Jamuna Press, 2011. 569 p.
9. *Лебедев В.А.* Применение GNSS-технологий в высокоточной инженерной геодезии / В.А. Лебедев, А.Н. Иванов // Геодезия и картография. 2020. № 6. С. 15–22.
10. ГОСТ Р 51872–2019. Геодезия. Спутниковые геодезические измерения. Общие требования. М.: Стандартинформ, 2019.