

## АВІАЦІЙНА І КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК: 629.7.06

В.В. Конин, д.т.н.  
А.В. Куценко  
Т.И. ОлевинскаяЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОТОЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ  
GNSS ДЛЯ ПОСАДКИ ВОЗДУШНЫХ СУДОВ МАЛОЙ АВИАЦИИНациональный авиационный университет, [vkonin@mail.ru](mailto:vkonin@mail.ru), [olevinska-ans@yandex.ru](mailto:olevinska-ans@yandex.ru).

*Проведено экспериментальное исследование возможности применения высокоточных технологий при посадке воздушных судов малой авиации. Выполнены испытания в статике и в динамике. Ключевые слова: спутниковая навигация, глобальная навигационная спутниковая система, посадка летательных аппаратов, Precise Point Positioning.*

**Введение.** Роль спутниковых технологий в воздушной навигации становится более важной с каждым годом. С помощью глобальных навигационных спутниковых систем (GNSS) осуществляется навигация на всех этапах полета вплоть до посадки воздушных судов по первой категории [1]. Спутниковая система посадки GLS (GNSS Landing System) сертифицирована для наведения летательных аппаратов (ЛА) по первой категории ICAO. Планируется дальнейшая разработка и сертификация системы по второй и третьей категориям. С 2005 года бортовое оборудование системы GLS устанавливается на самолеты различных эксплуатантов (Qantas, Air Berlin, S7, Delta Airlines и др.). Развертывание наземного сегмента системы планируется в европейском регионе к 2020 году [2].

Существуют различные подходы к формированию параметров наведения (углового отклонения ЛА от глиссады в вертикальной и горизонтальной плоскостях) при посадке по GLS [3, 4, 5]. Общим для них является формирование виртуальных опорных поверхностей в пространстве с использованием точек, координаты которых измерены с помощью геодезических средств. Основное различие заключается в выборе опорной поверхности для вычисления отклонений в плоскости глиссады. Это может быть гиперboloид из двух пластов, перевернутый конус с вершиной в точке пересечения линии глиссады с ВПП либо плоскость, сформированная в пространстве по координатам трех точек на ВПП.

Исследования и опыт эксплуатации показали ряд преимуществ спутниковой системы посадки перед ILS (Instrument Landing System) и другими радиомаячными системами. Наземное оборудование такой системы можно размещать в любом месте в окрестностях аэропорта, не привязываясь к конкретной точке на местности. При этом сигнал от наземного оборудования спутниковой системы навигации можно уловить на большом расстоянии от аэропорта, что теоретически позволяет использовать один комплект оборудования для обеспечения посадки ЛА на нескольких близкорасположенных аэродромах. Кроме того, наземная станция GLS способна формировать до 49 различных опорных траекторий, используя одну радиочастоту.

Бортовой сегмент системы GLS на современных транспортных самолетах представлен многорежимным приемником MMR [6], который поддерживает функцию посадки и базовое позиционирование по GNSS на протяжении всего полета.

Технология GLS применяется только в крупных аэропортах транспортной авиации, но она может быть взята за основу для создания системы точного наведения на посадочных площадках, рассчитанных на прием ВС малой авиации. В настоящее время такие посадочные площадки, как правило, имеют условия только для захода на посадку по правилам визуальных полетов (ПВП), которые устанавливают существенные ограничения по метеоусловиям.

В Приложении 10 (том 1) к конвенции ICAO [7] содержатся технические требования, предъявляемые к точности системы GNSS. Ошибка службы стандартного определения местоположения (SNS) не должна превышать: в горизонтальной плоскости – 13 м, в вертикальной – 22 м (глобальное среднее для 95% времени). Вместе с тем, этим же документом регламентируется точность системы посадки, относящейся к первой категории точного захода. Максимально допустимое отклонение в опорной точке устанавливается на уровне  $\pm 10,5$  м по горизонтали и 6 м вверх – по вертикали. Следовательно, стандартной точности недостаточно для обеспечения точного захода на посадку.

В настоящее время создано несколько спутниковых навигационных технологий, обеспечивающих высокоточное определение координат в реальном времени и в динамике [8 - 13]. Технология

OmniSTAR для наземних об'єктів була нами експериментально перевірена і показала можливість досягнення дециметрової точності [14].

В даній роботі експериментально досліджується високоточна технологія PPP (Precise Point Positioning), найбільш підходяща для застосування на аеродромах малої авіації. Заявлена точність технології становить 4 см [8]. Принцип дії PPP зображений на рис. 1. Основним перевагою даної технології перед режимом RTK і диференціальним режимом є відсутність необхідності в опорних наземних станціях з обмеженим радіусом дії в безпосередній близькості від користувача. Це суттєво спрощує оперативну логістику.



Рис. 1 – Принцип дії PPP

**Постановка задач дослідження.** Цілью роботи є експериментальне дослідження можливості застосування високоточних технологій при посадці повітряних судів малої авіації.

**Изложение теоретического материала.** Експериментальне дослідження проводилось на прикладі технології TerraStar – сервіса точного позиціонування, розробленого для забезпечення сантиметрової точності вимірювань по всій поверхні Землі. Сервіс базується на методіці PPP, передбачаючій виключення всіх системних помилок глобальної навігаційної супутникової системи методами прямих вичислень, точного моделювання і максимально приближених оцінок [16]. Методика включає набір поправок до орбіт і часів GPS і GLONASS, що дозволяє забезпечувати точність позиціонування незалежно від місцезнаходження користувача. Точність вимірювань досягається шляхом використання обох несущих частот – L1 і L2. В експерименті, описаному в даній статті, для виробки навігаційного рішення застосовувались дані від чотирьох систем – ГЛОНАСС, GPS, Galileo і BEIDOU. Використовувались по дві частоти систем ГЛОНАСС і GPS і одна частота системи Galileo.

Корекції орбіт і часів, отримані від станцій мережі TerraStar, передаються на кожен супутник для виключення супутникових складових помилок вимірювань. Вироблені поправки для користувачів, знаходячись в європейському регіоні, в тому числі в Україні, передаються з допомогою геостационарного супутника, розташованого на довготі 25°E. Зона його покриття зображена на рис. 2. Інформація передається на частоті 1539.8825 МГц.

**Експериментальне дослідження.** Для проведення експериментального дослідження можливості застосування високоточних технологій при посадці повітряних судів малої авіації використовувався многочастотний приймач GNSS OEM719 фірми Novatel [15] і коректуюча інформація фірми TerraStar, поступаюча з геостационарного супутника 25E. Експерименти були виконані в два етапи. На першому етапі досліджувалися точності в статичному режимі з різними конфігураціями супутників чотирьох систем: GPS, ГЛОНАСС, Galileo, BEIDOU. На другому етапі вимірювальна апаратура була встановлена на квадрокоптер, і точнісні характеристики оцінювалися в динаміці (при підйомі і зниженні квадрокоптера).

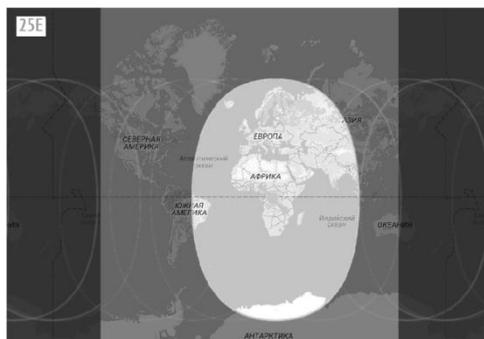


Рис. 2 – Зона покриття геостационарного супутника 25Е

**Результаты испытаний первого этапа.** На рис. 3 показаны типичные характеристики точности при применении четырех спутниковых систем для доступных на текущее время спутников. Центр круговой диаграммы на рисунках соответствует положению фазового центра антенны, цифры 0, 30, 60 обозначают уровни углов видимости спутников (углов маски), значения  $\pm 0.03\text{m}$  и аналогичные являются среднеквадратическими отклонениями в метрах на текущий момент времени, указанного внизу рисунка. Обозначения спутников: окружность – GPS, квадрат – ГЛОНАСС, ромб – Galileo, пятиугольник – BEIDOU. Указанные на рис. 3 СКО практически не изменяются на большом (несколько часов) временном интервале и слабо зависят от времени суток. Интервал времени для вхождения в высокоточный режим – несколько десятков минут.

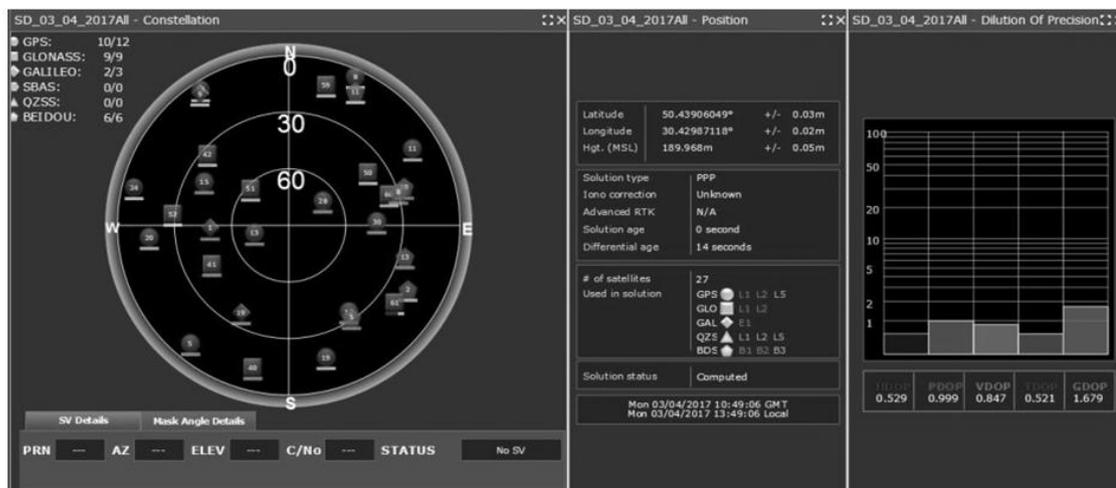


Рис.3 - Диаграмма видимости 27 спутников четырех систем и характеристики точности

Ряд столбцов в правой части рисунка отображает текущие геометрические факторы (слева направо): HDOP, PDOP, VDOP, TDOP, GDOP. Как следует из рис. 3, при наличии в зоне видимости 27 спутников суммарное геометрическое снижение точности по местоположению и времени (GDOP) составило 1,679. При этом были достигнуты следующие показатели точности (СКО): по широте ( $\pm 0.03\text{m}$ ), долготе ( $\pm 0.02\text{m}$ ), высоте ( $\pm 0.05\text{m}$ ).

Экспериментальное исследование точности каждой системы в отдельности и комбинаций отдельных систем дало следующие результаты. Для системы GPS при наличии 10 спутников в зоне видимости точности (СКО) по широте ( $\pm 0.04\text{m}$ ), долготе ( $\pm 0.03\text{m}$ ), высоте ( $\pm 0.07\text{m}$ ) на большом временном интервале изменяются на 1-2 единицы во втором знаке. Для системы ГЛОНАСС при наличии 7 спутников в зоне видимости точности (СКО) по широте ( $\pm 0.05\text{m}$ ), долготе ( $\pm 0.07\text{m}$ ), высоте ( $\pm 0.11\text{m}$ ) на большом временном интервале изменяются на 1-2 единицы во втором знаке. При совместном использовании GPS (12 спутников) и ГЛОНАСС (9 спутников) точности (СКО) по широте ( $\pm 0.05\text{m}$ ), долготе ( $\pm 0.05\text{m}$ ), высоте ( $\pm 0.09\text{m}$ ) на большом временном интервале изменяются на 1-2 единицы во втором знаке и имеют тенденцию к уменьшению. Эти две системы оказывают критическое влияние на точность измерений. Комбинации систем, в которых отсутствуют GPS или ГЛОНАСС, не поддерживаются на больших временных интервалах. Эти комбинации обеспечивают достаточно высокую точность в течение 6 минут, но при условии, что перед этим измерения производились в высокоточном режиме. Так, комбинация из 5 спутников Galileo и 4 спутников

BEIDOU забезпечує точність по широті ( $\pm 0.25\text{m}$ ), довготі ( $\pm 0.2\text{m}$ ), висоті ( $\pm 0.49\text{m}$ ), а комбінація з 2 супутників Galileo і 4 супутників BEIDOU при GDOP=11 дозволяє підтримувати точність вимірювань на рівні ( $\pm 0.57\text{m}$ ) по широті, ( $\pm 1.73\text{m}$ ) по довготі і ( $\pm 1.33\text{m}$ ) по висоті.

По мірі зниження воздушного судна во время посадки зростає ймовірність того, що частина супутників буде прихована з поля зору із-за особливостей рельєфу або розташованих в зоні аеродрому об'єктів. Було проведено моделювання такої ситуації, для чого на визначеному етапі задавався кут маски, рівний  $50^\circ$ . Результати моделювання зображені на рис. 4. В верхній частині зображення зображені діаграма видимості супутників і характеристики точності в перші секунди після штучного обмеження кута видимості супутників, приведеного до різкого погіршення геометричного фактора, дані про який представлені в нижньому лівому куті зображення.

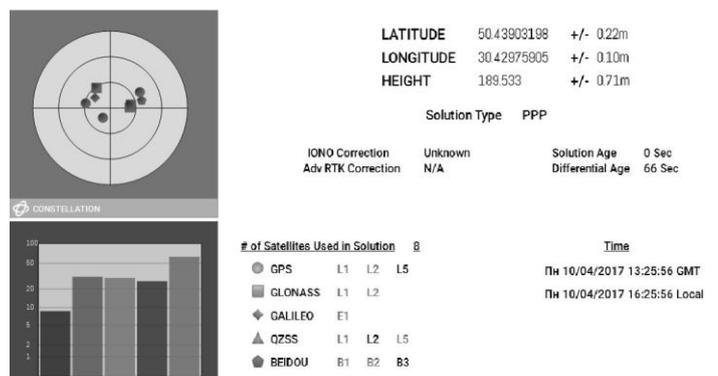


Рис. 4 – Діаграма видимості супутників і характеристики точності в момент задання кута маски  $50^\circ$

Із рис. 4 слідує, що при великому геометричному факторі ( $\text{GDOP} > 60$ ) в течение некоторого часу зберігаються хороші характеристики точності: ( $\pm 0.22\text{m}$ ) по широті, ( $\pm 0.10\text{m}$ ) по довготі і ( $\pm 0.71\text{m}$ ) по висоті. Така точність дозволяє здійснити точний заход на посадку по приборам в разі раптового зменшення кількості супутників в зоні видимості і погіршення їх взаємного розташування (на рис. 4 в навігаційному рішенні приймають участь 8 супутників: 3 супутника системи GPS, 3 супутника системи ГЛОНАСС і 2 супутника системи BEIDOU).

Через некоторое время после возникновения неблагоприятной ситуации точность начинает ухудшаться. Во время проведения данного эксперимента через 7 минут после задання кута маски кількість супутників в зоні видимості зменшилось до 6 - 2 супутників системи GPS, 3 супутників системи ГЛОНАСС і 1 супутника системи BEIDOU. В то время як точність вимірювання координат в плані продовжувала підтримуватися практично на прежнему рівні, точність вимірювання координат по висоті погіршилась до ( $\pm 1.50\text{m}$ ). Можна зробити висновок, що при використанні технології PPP точність підтримується на прийнятному рівні в течение нескольких минут – времени, достаточного для посадки ВС малої авіації.

**Результаты испытаний второго этапа.** На рис. 5 зображені діаграма видимості супутників, інформація про геометричних факторах і характеристики точності в началі моделювання, в період накоплення інформації, дозволяющей підвищити рівень точності.

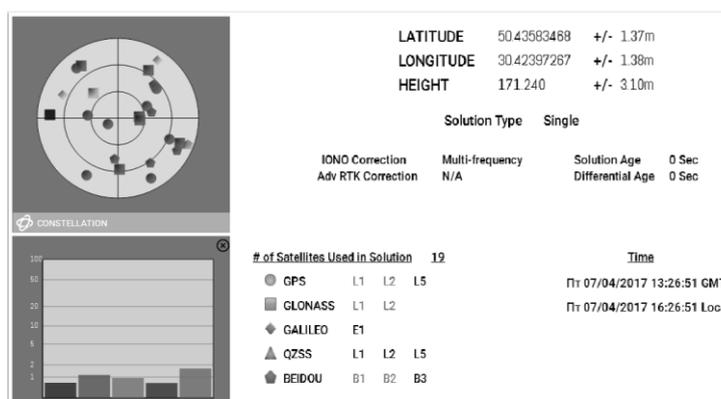


Рис.5 – Діаграма видимості супутників і характеристики точності на першій минуті моделювання

Из рис. 5 следует, что в зоне видимости на момент начала моделирования находятся 19 работающих спутников – 8 спутников системы GPS, 6 спутников системы ГЛОНАСС и 5 спутников системы BEIDOU. Геометрический фактор GDOP < 2, что свидетельствует об удачном геометрическом расположении спутников относительно пользователя. Точность измерения координат составляет ( $\pm 1.37\text{m}$ ) по широте, ( $\pm 1.38\text{m}$ ) по долготе и ( $\pm 3.10\text{m}$ ) по высоте. Следующий снимок (рис. 6) был сделан через 8 минут после начала моделирования. В навигационном решении участвуют 20 спутников – 9 спутников системы GPS, 6 спутников системы ГЛОНАСС, 5 спутников системы BEIDOU, значение GDOP практически не изменилось. Точность измерения координат повысилась и составляет ( $\pm 0.37\text{m}$ ) по широте, ( $\pm 0.67\text{m}$ ) по долготе и ( $\pm 1.03\text{m}$ ) по высоте.

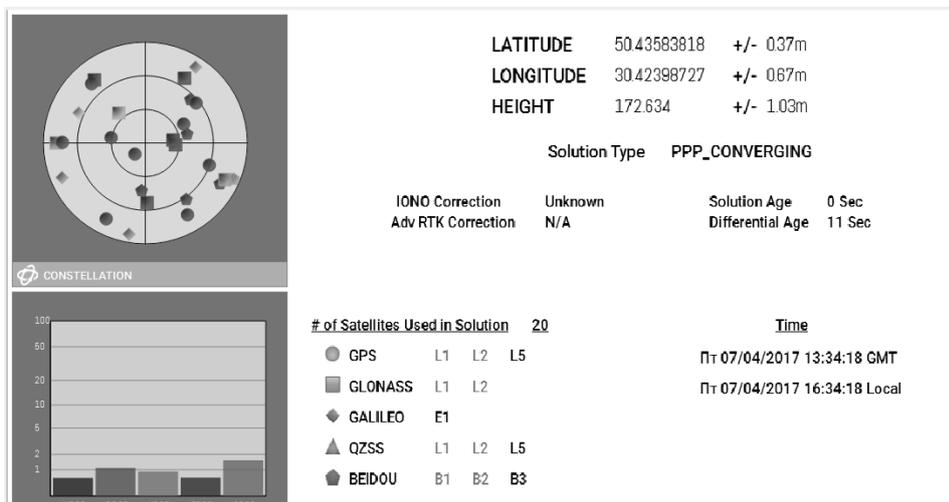


Рис.6 – Диаграмма видимости спутников и характеристики точности через 8 минут после начала моделирования

Еще через 48 минут квадрокоптер с установленным на него приемником начал набор высоты (рис. 7). Благодаря накопившейся к этому времени информации точность измерения координат в момент начала набора составила ( $\pm 0.03\text{m}$ ) по широте, ( $\pm 0.02\text{m}$ ) по долготе и ( $\pm 0.06\text{m}$ ) по высоте при 22 спутниках в зоне видимости, из которых к 20 (9 спутникам системы GPS, 5 спутникам системы ГЛОНАСС, 6 спутникам системы BEIDOU) были доступны поправки.

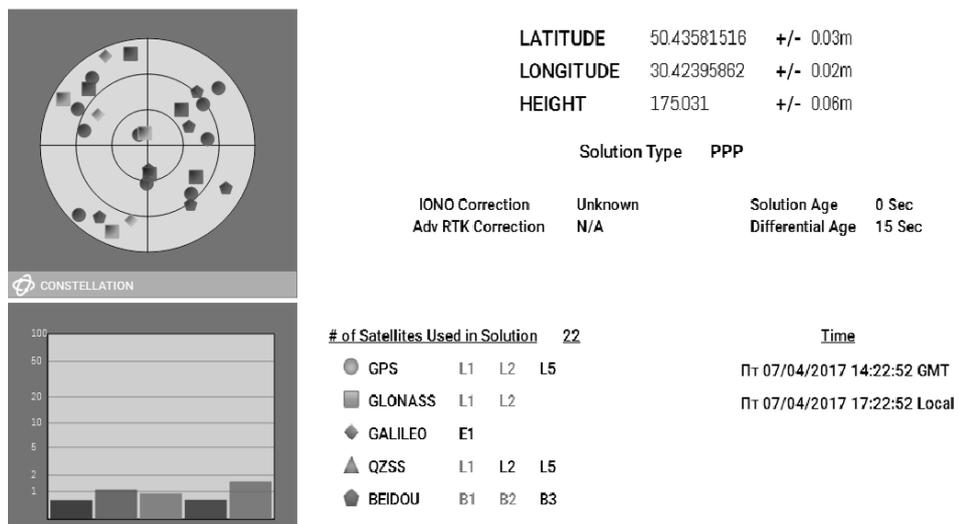


Рис.7 – Диаграмма видимости спутников и характеристики точности в момент начала набора высоты

Через 3,5 минуты после начала набора высоты квадрокоптер достиг высшей точки своего полета (рис. 8). Точность измерения координат поддерживалась на прежнем уровне - ( $\pm 0.03\text{m}$ ) по широте, ( $\pm 0.02\text{m}$ ) по долготе и ( $\pm 0.06\text{m}$ ) по высоте при 24 спутниках в зоне видимости и GDOP < 2.

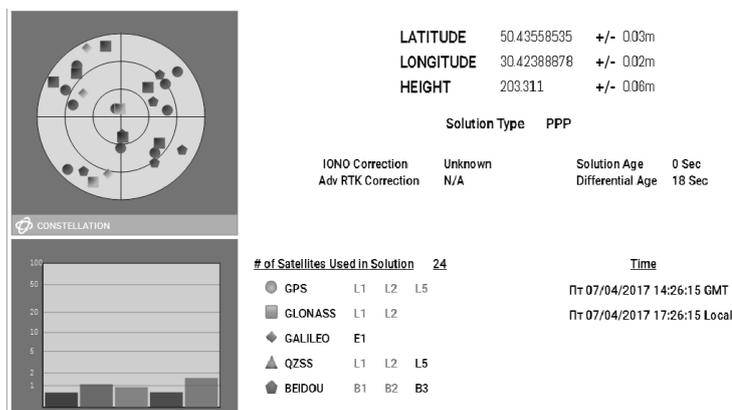


Рис.8 – Диаграмма видимости спутников и характеристики точности в высшей точке

После достижения высшей точки полета квадрокоптер перешел в снижение и через 1,5 минуты совершил посадку (рис. 9).

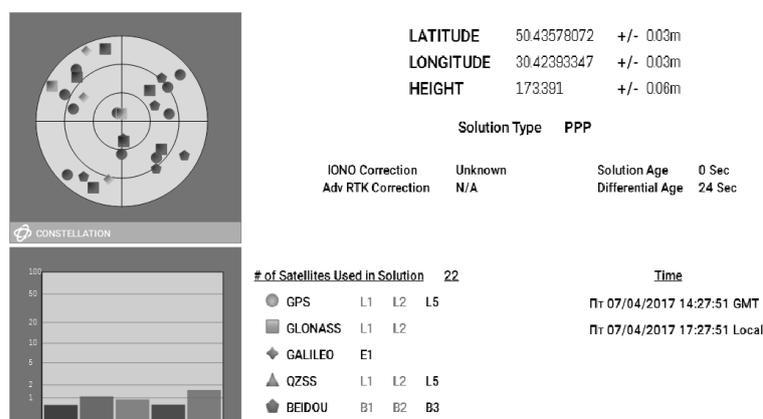


Рис.9 – Диаграмма видимости спутников и характеристики точности в момент посадки

На всем протяжении снижения точность измерения координат поддерживалась на достигнутом ранее уровне - ( $\pm 0.03m$ ) по широте, ( $\pm 0.02m$ ) по долготе и ( $\pm 0.06m$ ) по высоте при 22 спутниках в зоне видимости и  $GDOP < 2$ .

**Выводы.** Проведенные эксперименты, показали принципиальную возможность выполнения посадки воздушных судов малой авиации с использованием высокоточных технологий. Авторы выражают признательность группе компаний «С.П.С.» и компании TerraStar за возможность использовать высокоточный сервис для проведения исследований, а также Сергею Флерко за дискуссию на «Форуме о геодезии и навигации» (<http://eps.com.ua/phpbb/>) по отклонениям, выработанными навигационными приемниками.

#### Список литературных источников:

1. Конин В.В. Обеспечение точных заходов на посадку методами спутниковой навигации в системе CNS/ATM Украины / В.В. Конин, В.В. Загоруйко // Космічна наука і технологія. –2001. – Т.7, №4.– С. 25–30.
2. Imrich T. GNSS Landing System (GLS) and Required Navigation Performance (RNP) / T. Imrich // AFCEA CNS/ATM Conference : int.conf. 25 April 2007, Orlando, Florida – Orlando 2007.
3. Пат.US 6239745 B1. Satellite landing system having instrument landing system look alike guidance / D. Alexander Stratton; заявл. 30.07.1999; опубл. 29.05.2001.
4. Пат. US 20120265376 A1. Airplane Position Assurance Monitor / Steven L. Fleiger-Holmes, Timothy Allen Murphy, Jean Marie Crane; заявл. 12.04.2011; опубл. 18.10.2012.
5. Ковалевский Э.А. Определение параметров наведения при посадке летательного аппарата по технологии GNSS/ Э.А. Ковалевский, В.В. Конин, Т.И. Олевинская. // Вестник Национального авиационного университета. – 2013. - №3(56). – С.18-21.
6. Stratton, D. Alexander. Multi-Mode Receivers for Verification of Ground- and Space-Based Augmentation Systems / Stratton, D. Alexander, Warburton, John, Magrogan, Mike // *Proceedings of the*

- 17th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2004)*, Long Beach, CA-September 2004.-pp. 2324-2330.
7. Авиационная электросвязь. Приложение 10 к Конвенции о международной гражданской авиации ИКАО. Издание шестое, июль 2006 года.
  8. GPS World staff. NovAtel correct with TerraStar Service now available. – Режим доступа: <http://gpsworld.com/novatel-correct-with-terra-star-service-now-available/> - Дата доступа: 21.04.2014.
  9. OmniSTAR Services. - Режим доступа: <http://www.omnistar.com>. – Дата доступа: 25.01.2008
  10. Starfix global positioning - Режим доступа: <https://www.fugro.com/about-fugro/our-expertise/innovations/starfix-global-positioning>
  11. Chaochao Wang. StarFire GNSS: The Next Generation StarFire Global Satellite Based Augmentation System / Chaochao Wang, Ronald Hatch // Информационный бюллетень Navcom – Режим доступа: <https://waps.net.au/wp-content/uploads/2017/02/6-Navcom-StarFire-Report-2012.pdf>
  12. Veripos to Provide High Precision Positioning Services to Shearwater Geoservices Norway AS – Режим доступа: <https://www.veripos.com/about-veripos/news/news-releases-2017/veripos-to-provide-high-precision-positioning-services-to-shearwater-geoservices-norway-as/>- Дата доступа: 23.03.2017.
  13. Trimble centerpoint RTX post-processing service - Режим доступа: <http://www.trimblertx.com>.
  14. Харченко В.П. GPS-навигация и геодезическая съемка - результаты экспериментальной верификации технологии OmniSTAR / В.П. Харченко, А.А. Жалило, В.М. Кондратюк, В.В. Конин, А.В. Куценко, В.Г. Сушко, Д.А. Шелковенков, В.М. Шокало // Научный вестник ГосНИИ „АЭРОНАВИГАЦИЯ”. - 2007.– № 7.– С. 28- 36.
  15. OEM719 Multi-Frequency GNSS Receiver - Режим доступа: <http://www.novatel.com/products/gnss-receivers/oem-receiver-boards/oem7-receivers/oem719/>.
  16. Виноградов А.В. Оценка точности метода Precise Point Positioning и возможности его применения при кадастровых работах / А.В. Виноградов, А.В. Войтенко, А.Ю. Жигулин // Геопрофи.–2010.–№2.–С.27-30.