

## ГЕОДЕЗИЯ И МЕТРОЛОГИЯ БОЛЬШИХ ДЛИН И КОРОТКИХ ВЕКТОРОВ. ЭКСПЕРИМЕНТЫ И ЭТАЛОНЫ

**В. Купко, П. Нежмаков, А. Олейник, Е. Занимонский**  
ННЦ “Институт метрологии”, Харьков, Украина

**И. Тревого, И. Цюпак**  
Национальный университет “Львовская политехника”, Львов, Украина

**Я. Цисак**  
Институт геодезии и картографии, Варшава, Польша

**Ключевые слова:** эталон, линейные измерения, лазерные электронные дальнометры, ГНСС

### Постановка проблемы

Геодезия и метрология – это смежные научные дисциплины об измерениях: метрология имеет дело с измерениями вообще, а геодезия – с измерениями на поверхности Земли и в околоземном пространстве. Исторически геодезия была одним из источников метрологии как научной дисциплины. В настоящее время геодезия, оставаясь весьма развитой наукой об измерениях в конкретной научной области, успешно пользуется методами теории измерений (являющейся составной частью метрологии), а также методами и средствами метрологического обеспечения, опирающимися на соответствующие эталоны единиц физических величин и методики выполнения измерений. Наряду с традиционными темами геодезической метрологии – линейные и угловые измерения, нивелирование, гравиметрические и геодезические сети, сегодня необходимо рассматривать и метрологические проблемы космических геодезических технологий.

### Анализ состояния проблемы

В географических и геодезических измерениях на реальной местности используются специфические методики определения координат; фактически, геодезия и картография являются особым видом метрологии, нуждающимся в собственных системах стандартов и эталонов. Такими эталонами в классической геодезии являются национальные триангуляционные сети, и долгое время под геодезией понимали, в значительной степени, сумму практик и методов, позволяющих определять точные географические координаты объектов с помощью классической угломерной аппаратуры и триангуляционной сети.

Сети эти имеют не глобальный, а национальный характер и являются важным элементом государственной инфраструктуры, работа с ними, то есть геодезическая деятельность, требует обязательного лицензирования. Но относительно недавно все изменилось – эталоном в геодезии вместо национальной триангуляционной сети стала глобальная, спутниковая. Фактически, вместо строго засекреченных и ограниченных в пространстве национальных триангуляционных сетей возникла глобальная космическая

навигационная спутниковая система – ГНСС – видимая отовсюду, более точная и универсальная.

В связи с этим метрологам всех стран, кроме США и России, Китая и отчасти Евросоюза, приходится признать, что национальные спутниковые средства определения расстояний и координат на земной поверхности не опираются на национальные эталоны. Да и сами измерительные средства и программы обработки первичной информации для большинства стран являются импортными и “непрозрачными”.

В настоящее время перед геодезистами, геофизиками и метрологами стоит задача исследования и сопоставления лазерных электронных дальнометров (ЭДМ) и глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС) в области измерения длин от долей метра до нескольких километров с неопределенностью менее миллиметра. Следует сразу отметить некоторое различие в терминологии. Исследуемый диапазон относится к лазерной метрологии больших длин, а для ГНСС – это малые, до нескольких километров, и очень малые – от десятков сантиметров до сотни метров, векторы.

Космические и наземные методы не обеспечивают прослеживаемости результатов измерений длины к определению метра через скорость света, с неопределенностью на уровне долей миллиметра в данном диапазоне расстояний [1, 2]. Задача исследований, актуальных в настоящее время, состоит в том, чтобы выяснить причины расхождений результатов измерений, выполненных ЭДМ и ГНСС. По частным сообщениям и литературным данным, а также по результатам собственных исследований авторов этой статьи, упомянутые расхождения находятся на уровне от нескольких десятых долей миллиметра до единиц миллиметров.

Прослеживаемость к эталону соответствует наличию государственной поверочной схемы. Во главе такой схемы государственный эталон, который может двояким образом соотноситься с другими эталонами на международном уровне. В первом случае имеется международный эталон и его национальные копии, например, как это было с платино-иридиевым эталоном метра. Во втором случае национальные эталоны проходят процедуру ключевых сравнений, как, например, в абсолютной гравиметрии. В области ГНСС-измерений малых расстояний пока нет законодательно

признанного міжнародного еталона і схеми передачі одиниці довжини на національний рівень.

Измерения ГНСС являются одним из четырех космических геодезических методов создания глобальной системы координат, опирающейся на несколько десятков фундаментальных астрономо-геодезических пунктов, положение которых определяется по данным радиоинтерферометрии со сверхдлинными базами (РСДБ), лазерной локации искусственных спутников Земли (ЛЛС) и доплеровских орбитальных радиотехнических измерений на спутниках (ДОРИС) [3]. Именно мировая сеть перманентных станций ГНСС реализует глобальную систему координат и, по сути дела, является международным эталоном в области измерения больших длин.

Тем не менее, в настоящее время поверка приемных комплексов ГНСС в целом и их поэлементная (приемник, антенна, программа обработки) аттестация на соответствие метрологическим требованиям, указанным в документации производителя, проводится на существующих полигонах и базисах, созданных с помощью ЭДМ [4–6]. Лазерные дальномеры, в конечном итоге, воспроизводят длину, опираясь на эталон метра, реализуемый на основе интерферометров со стабилизированными лазерами. Для расстояний, не больших, чем 10 километров, относительная погрешность лазерного дальномера ( $3 \cdot 10^{-7}$ ) меньше, чем регламентируемая погрешность серийных приемников глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС) [6, 7]. Однако относительная погрешность геодезических применений ГНСС класса “high-end” (высшего уровня точности), даже на таких расстояниях, может быть в несколько раз меньше. В работе [8] приводятся данные о том, что относительная погрешность масштаба европейского фрагмента глобальной сети оценивается величиной  $10^{-9}$ .

Таким образом, наиболее точные ГНСС-измерения в большей части измеряемого диапазона не входят в сферу современного метрологического контроля. Это вовсе не означает, что не следует доверять декларируемым в литературе оценкам точности измерений. Как правило, это серьезные и обоснованные работы, выполняемые по специально разработанным методикам. Именно методическими приемами удается расширить возможности серийных приемников за пределы регламентированной точности. В значительной мере успех этой работы объясняется использованием специализированного программного обеспечения – научных программных пакетов, например, Bernese и GIPSY-OASIS а также тщательным исследованием корректности вычислений.

#### Постановка задачи

Многочисленные исследования, проведенные на метрологических полигонах [4–7, 9–15], дали возможность определить оптимальное время накопления данных, сопоставить возможности приемников различных фирм, точность и удобство использования научных и прикладных программ, оценить точность измерения расстояний от единиц метров до километров.

Вместе с этим оказалось, что измеренные расстояния между реперами, на которых устанавливались антенны приемников, изменяются на миллиметровом уровне в суточном и сезонном циклах.

Чтобы выяснить причины этого явления, обрабатывались результаты непрерывных измерений, в течение нескольких лет, на двойных перманентных станциях европейской сети EPN (European Permanent Net), на базовых станциях локальной сети в харьковском регионе, а также пунктов дальномерного полигона “Липцы” ННЦ “Институт метрологии” [16].

В работе проводился анализ неопределенности и воспроизводимости ГНСС измерений малых расстояний (далее, для краткости, ГНСС-измерений) в зависимости от условий измерений. Основной акцент сделан на получение статистически устойчивых выводов с целью обоснования предложений элементов поверочной схемы на основе международных эталонов.

Совокупность таких пар станций глобальной сети можно представить как распределенный эталон длины в области измерений малых расстояний – коротких векторов – больших длин. Для внедрения этого международного эталона в метрологическую практику необходимо оценить неопределенности воспроизведения расстояний между парами станций, предложить техническое решение для национальных эталонов и способа передачи единицы длины к этим эталонам и далее к рабочим средствам измерений ГНСС.

Расстояния между перманентными станциями можно считать наиболее точными результатами геодезических измерений [8]. Для практического использования этих результатов есть только одно существенное ограничение – с погрешностью в миллиметры и менее известны расстояния между “виртуальными” пространственными объектами, а именно средними фазовыми центрами приемных антенн ГНСС на двух частотах. В настоящее время практически нет ни одной перманентной станции ГНСС, координаты которой, а фактически, координаты линейной комбинации фазовых центров антенны на двух частотах, были бы связаны с координатами близлежащего геодезического пункта на субмиллиметровом уровне точности. Таким образом, нет возможности связать ГНСС и дальномерные измерения с такой точностью.

Чтобы выйти из положения, можно использовать метрологические полигоны, подобные Липецкому полигону ННЦ “Институт метрологии” и эталонному базису Яворовского научного геодезического полигона, реперные пункты которого следует дооборудовать для того, чтобы обеспечить возможность установки одновременно двух геодезических приборов – антенны ГНСС и отражателя дальномера.

Возможны два варианта метрологической связи пунктов такого полигона с международным эталоном в виде сети перманентных станций. В первом случае реперные пункты полигона непосредственно включаются в глобальную или региональную сеть, становятся перманентными станциями, элементами распределенного международного эталона. Располо-

женные соосно с антеннами геодезические приборы, отражатели, дальнометры можно использовать для сравнения результатов измерения длин двумя различными способами, дальномерным и ГНСС. Полигон аттестуется как национальный эталон.

Во втором случае на пунктах полигона устанавливаются приемники ГНСС и работают в режиме, аналогичному тому, в котором работают приемники перманентных станций. Обработка первичных данных, накапливаемых в приемниках, и вычисление расстояния между пунктами выполняется с помощью откалиброванного (аттестованного) эталонного программного пакета. В процессе калибровки вычисляются расстояния между парами перманентных станций и сопоставляются с расстояниями, вычисленными по координатам этих станций из глобальных или региональных сетевых решений. Таким образом устанавливается связь национального эталона с международным.

Наряду с достоинствами у реперных пунктов полигона в Липцах есть существенный недостаток – наличие поблизости от антенн металлических предметов. Посадочное место, с помощью которого центрируется геодезическое устройство, выполнено на стальной пластине, размеры которой сравнимы с длиной принимаемой электромагнитной волны. Поэтому для уменьшения влияния эффектов ближнего поля приходится поднимать антенну над репером. Оптимальная высота, определявшаяся в ходе исследований, зависит от типа антенны и составляет единицы дециметров (рис. 1).

Металлическая площадка для обслуживания аппаратуры является источником вторичного (отраженного) поля, принимаемого антенной. Устранить влияние этого источника многолучевости можно только за счет использования геодезических антенн высшего качества типа “choke-ring”.



Рис. 1. Один из реперных пунктов полигона “Липцы” с антенной “choke-ring”

### Результаты обработки первичных данных, полученных на двойных перманентных станциях и полигоне в Липцах

Объектом исследования является влияние условий выполнения измерений малых расстояний методами ГНСС на неопределенность и воспроизводимость результатов. В перечень этих условий входят:

- собственно величина измеряемого расстояния;
- время накопления данных;
- электродинамическое окружение антенн на пунктах, между которыми измеряется расстояние, особенности ближнего поля и отражения сигналов;
- метеорологическое окружение реперных пунктов, влияющее на различие тропосферной задержки сигналов распространения спутниковых сигналов до антенн на этих реперах.

Погрешности на этапе накопления первичных данных определяются влиянием среды распространения сигналов, эффектами приема антенной отраженных сигналов и помех, дифракционными явлениями вблизи антенны, шумами и собственными погрешностями приемной аппаратуры. Далее эти погрешности преобразовываются в процессе обработки и дополняются погрешностями вычислений.

При работе на эталонном уровне точности к этапу статистической обработки образуются достаточно большие массивы данных, от десятков до десятков тысяч единичных результатов измерений. При малых расстояниях на сегодня нет стандартизованных приемов обработки данных, и авторы поставили задачу – попробовать найти подход к такой стандартизации обработки, также, как и к регламентации всего измерительного процесса.

Обработка первичных данных, накапливаемых в приемниках на одной частоте с интервалом времени между измерительными эпохами 30 секунд, проводилась научной программой Bernese и фирменной прикладной программой GNSS-Solutions в кинематическом режиме и результаты вычисления длины соответствовали каждой эпохе.

Измеряемые расстояния варьировали от нескольких метров до пяти километров. Во всех выполненных тестах использованы однотипные антенны на обоих концах измеряемого базиса, что в значительной мере способствовало компенсации погрешностей измерений расстояния из-за вариаций положения фазовых центров антенн.

Прежде всего оценивалась неопределенность измерений по типу А. Оказалось, что существуют два диапазона расстояний по отношению к этой неопределенности (рис. 2). Вначале неопределенность практически не зависит от расстояния, а при его увеличении, начиная с 60–70 метров, монотонно увеличивается до “насыщения” на расстояниях порядка единиц километров. В первом диапазоне вписывается прямая с уравнением  $y[\text{мм}]=2$ , а во втором – логистический фрагмент кривой с уравнением  $y[\text{мм}]=5-0,2/L$ , где  $L$  – расстояние в километрах. Дальнейшее накопление статистического материала на существующих линейных базисах, на двойных перманентных станциях и на создаваемых специальных метрологических базисах позволит уточнить приведенные выше результаты.

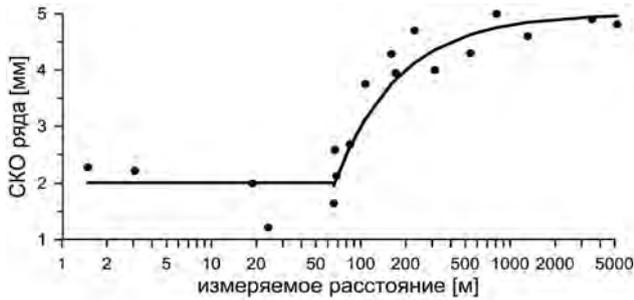


Рис. 2. Неопределенность по типу А, оцениваемая как SKO ряда единичных измерений расстояния, в зависимости от расстояния между пунктами

Неопределенность по типу А ГНСС-измерений имеет как случайную составляющую, так и составляющую, которую можно интерпретировать как детерминированный хаос. Случайная составляющая является следствием шумовых процессов в приемниках, помех и шумовой модуляции принимаемых сигналов. Хаотическая составляющая является следствием нелинейной реакции измерительной системы на изменение спутниковой конфигурации. На следующем этапе был проведен анализ на предмет определения соотношения случайной и хаотической составляющей.

На рис. 3 представлены вариации измеренного расстояния в течение суток для двух пар пунктов. В одном случае (рис. 3, а) видно доминирование случайных погрешностей, а во втором случае (рис. 3, б) доминируют хаотические. Анализ условий измерений показал, что в первом случае использовались геодезические антенны высокого качества, типа “chock-ring”, установленные оптимальным образом на бетонных столбах. Во втором случае использовали простые антенны, плохо подавляющие отраженные сигналы и, кроме того, установленные в непосредственной близости от металлической поверхности реперного пункта. Большинство исследованных ситуаций на пунктах находятся между этими крайними случаями.

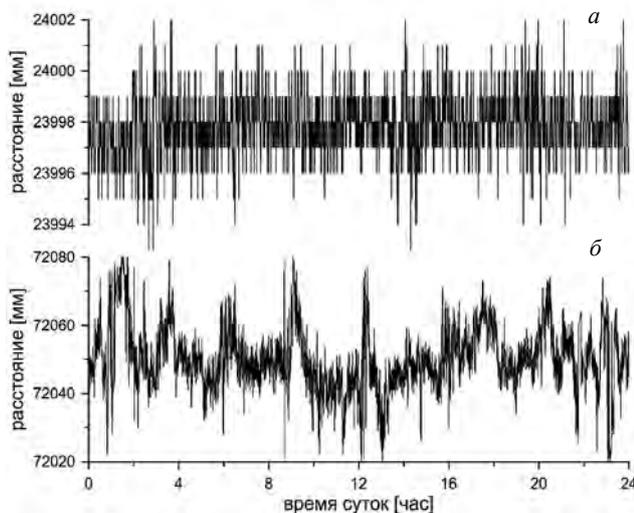


Рис. 3. Вариации результатов измерения расстояния между двумя парами пунктов при хорошем (а) и плохом (б) подавлении эффектов ближнего поля около приемных антенн

Для ГНСС-измерений хорошо известной причиной переменных систематических погрешностей является приемная антенна и ее электродинамическое окружение. Лучшие геодезические антенны, подавляющие многолучевость, имеют значительные вариации положения фазового центра и нуждаются в индивидуальной калибровке. После калибровки, тем не менее, возможны неучтенные вариации, зависящие от наличия электропроводных предметов вблизи антенны. Так как влияние электродинамического окружения антенны существенно зависит от углов поступления сигналов при регулярно изменяющейся в течение суток спутниковой конфигурации, то очень важно использовать оптимальную длительность измерительных сессий.

Хаотические погрешности повторяются с периодом, равным звездным суткам (23 часа 56 минут), что является характерной особенностью GPS, данные которой в основном и определяют точность ГНСС-измерений. Использование данных ГЛОНАСС несущественно улучшает результаты измерений. Таким образом, накапливая результаты наблюдений за время, кратное суткам, можно подавить хаотическую составляющую, однако желательно ее все-таки минимизировать за счет правильного использования приемных антенн.

Задачу учета систематических погрешностей измерения расстояния между пунктами из-за различия тропосферной задержки распространения спутниковых сигналов до приемных антенн на этих пунктах обосновано в работе [17]. Экспериментальные исследования этой погрешности выполнены в работе [16], некоторые результаты которой приведены ниже. Влияние локальных градиентов запаздывания сигналов в приземной тропосфере, которым обычно пренебрегают, было проверено в ходе специального исследования.

Обычно реперы, на которых фиксированы антенны, находятся на свободной территории, иногда окруженной невысоким лесом, не ограничивающим видимость спутников. Схематически ситуация показана на рис. 4, а. Такие ландшафтные особенности приводят к существенным горизонтальным градиентам температуры и влажности приземного слоя тропосферы, особенно в солнечный летний день. В свою очередь, градиенты практически отсутствуют дождливой осенней ночью. Если близкие станции имеют антенны, расположенные на различных высотах, – например, около полутора метров над поверхностью грунта и в полуметре над крышей двухэтажного здания (схема на рис. 4, б), то локальные тропосферные градиенты также проявляются.

Количественные оценки влияния локальных тропосферных градиентов на результаты измерения малых расстояний показаны на рис. 5 для двух пар станций. Результаты на рис. 5, а соответствуют схеме на рис. 4, а, а на рис. 5, б – схеме рис. 4, б соответственно.

Предполагается, и это предположение проходит проверку, что эти эффекты минимальны для пунктов километровой метрологической базиса “Липцы” Харьковского ННЦ “Институт метрологии” и эталонного базиса Яворовского научного геодезического полигона. Реперные пункты расположены на однородной поверхности, представляющей собой травянистый луг, который является наиболее желательным с точки зрения минимизации эффектов многолучевости.

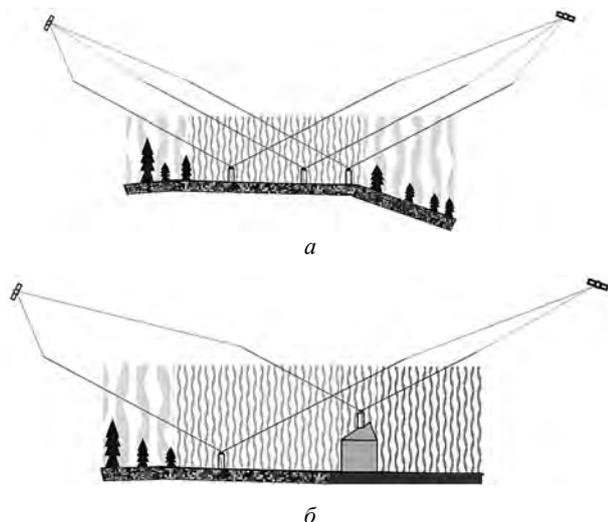


Рис. 4. Схема образования локальных градиентов показателя преломления в приземном слое воздуха из-за ландшафтных особенностей полигона (а) и из-за расположения антенны на разной высоте (б)

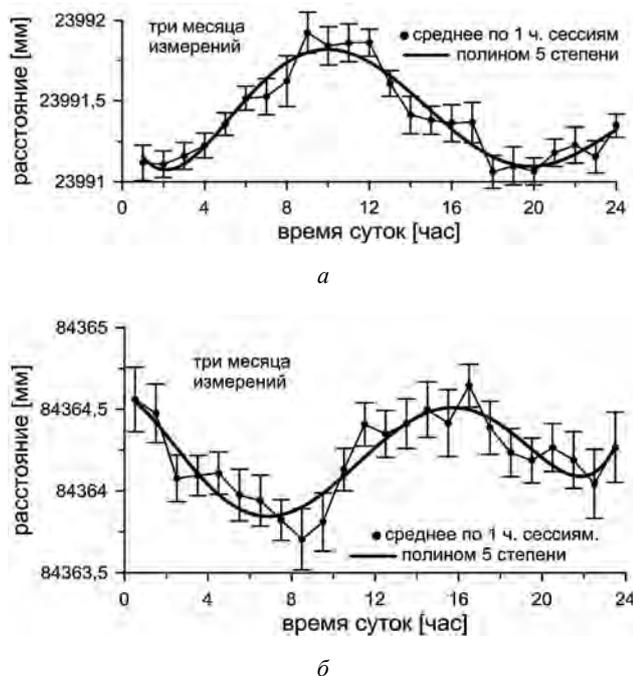


Рис. 5. Суточные вариации результатов измерений расстояний между пунктами на высоте 1,5 м над поверхностью (а) и между пунктами, один из которых на высоте 1,5 м, а второй на крыше двухэтажного здания (б)

### Результаты исследования погрешностей линейных измерений на рабочих эталонах Яворовского научного геодезического полигона (НГП)

Современные линейные измерения основаны на скорости распространения электромагнитных волн, постоянной в вакууме. Внешняя среда, атмосфера и гравитационное поле Земли изменяют скорость и искривляют траекторию волны. Впрочем, гравитационные релятивистские эффекты пренебрежимо малы в прикладной геодезии. В настоящее время измерения длины возможны наземными лазерными ЭДМ либо спутниковыми технологиями, например,

ГНСС. Влияние внешней среды на наземные и спутниковые методы различное и это одна из причин расхождения между результатами линейных измерений, выполняемых с помощью ЭДМ и ГНСС.

Исследования, связанные с измерениями длин линий, выполненные на эталонном линейном базисе с помощью электронных тахеометров (Leica TCR-1201, Trimble S8 и Leica TM30), показали [7], что при измерении метеопараметров только в начальной точке влияние атмосферы на погрешность измерения линии 100–200 м составляет около 1–1,5 мм, а линии длиной 2,3 км достигает 4–5 мм. При этом в измеренные длины линий, превышающих 800–1000 м, необходимо вводить поправки за рефракцию и кривизну Земли.

Погрешности определения расстояний методом ГНСС зависят от длительности сессии наблюдений. При длительности сессии не менее 15 часов погрешность не превышает 1 мм даже в случае длины линии до 20 км [11]. На рис. 6 представлены графики погрешностей определения расстояний (А – 10, G – 14 и Т – 20 км) с накоплением длительности сессии на 1 час от одного до 24 часов для двух дней (186 и 187).

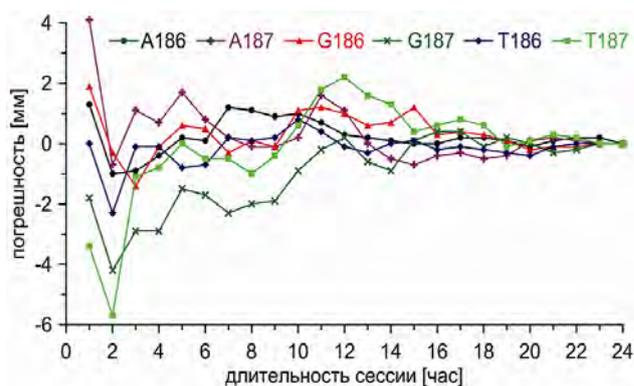


Рис. 6. Погрешности определения расстояний из обработки ГНСС-наблюдений

Для метрологической аттестации линий эталонного базиса применена методика [18] одновременных ГНСС-наблюдений на 10 пунктах и определения длин линий во всех комбинациях с оценкой погрешностей измерений методом наименьших квадратов. Полученные погрешности измерения 45 линий ( $n \cdot [n-1]/2$ ) менее 1 мм. Распределение погрешностей следующее: для 28 линий – до 0,1 мм, от 0,11 до 0,4 мм – еще для 14 линий, а максимальная погрешность – 0,82 мм.

Следовательно, разрабатывая и применяя специальные методики измерений и их обработки, можно достигать лучшего согласия между наземными и спутниковыми измерениями.

Если измерять большие расстояния или линии между точками на поверхности Земли при условии отсутствия взаимной видимости, то здесь спутниковые методы незаменимы. Например, из шести (2005–2008, 2010, 2013 гг.) кампаний GPS-наблюдений (3–5 суточных) определены координаты пунктов фундаментальной геодезической сети Яворовского НГП. Оценка внутренней относительной погрешности пунктов составляет  $3 \cdot 10^{-7}$  [18].

Нивелирование также является измерением линий, но в вертикальной плоскости, где влияние градиентов параметров атмосферы существенно больше. Перспективным методом является GPS-нивелирование и определение относительных высот или превышений. Одна из задач геодезической метрологии [19] – контроль точности новых спутниковых методик измерений и определения величин, измеряемых наземными методами. При этом пункты фундаментальной геодезической сети должны служить реперными точками. Для этого пункты эталонного линейного базиса и фундаментальной геодезической сети Яворовского НГП обеспечены определениями высот из геометрического нивелирования II класса, для чего проложено около 120 км двойных ходов с привязкой к реперам I класса. Получены погрешности определения превышений между пунктами эталонного линейного базиса около 5 мм [20] (максимальное расстояние между пунктами 2,3 км). Определение нормальных высот пунктов эталонного базиса с использованием гравитационной модели EGM-08 выполнено с ошибками 11–13 см. Высоты квазигеоида вычислены для пунктов фундаментальной геодезической сети со стандартным уклоном около 3 см по результатам шести кампаний GPS-наблюдений (расстояния до 20 км) [12].

Таким образом, полученные результаты позволяют надеяться на возможность определения высот пунктов методом GPS-нивелирования с точностью II класса.

### Обсуждение результатов

В работе оценено состояние метрологического обеспечения измерений больших длин электронными дальномерами и средствами ГНСС. Исследована специфическая погрешность, связанная с локальными градиентами задержки сигналов в приземном слое тропосферы, вызванными различием свойств подстилающей поверхности в окрестности пунктов, на которых находятся приемные антенны ГНСС. Особенно заметны такие градиенты в солнечный летний день и практически отсутствуют дождливой осенней ночью. Расположение антенн на разной высоте, на фундаменте высотой около полутора метров и над крышей здания усугубляет проблему влияния локальных тропосферных градиентов.

Исследования показали, что результаты вычислений расстояний, выполняемых различными программами, отличаются на уровне единиц миллиметров. Очевидно, что к результатам, полученным научным пакетом Bernese, больший уровень доверия, чем к полученным прикладным пакетом, например, GNSS-Solutions. Однако для решения метрологических задач необходимо проведение расширенного анализа на существенно большем массиве данных, при сопоставлении результатов, полученных различными научными и прикладными программами. Подобные сопоставления выполнялись и выполняются, однако не применительно к весьма специфической задаче измерения длин в диапазоне от метра до километра с субмиллиметровой неопределенностью.

Анализируя возможность сравнения результатов измерений длины методами ГНСС и дальномерами, следует принимать во внимание наличие существенного различия в организации измерений этими методами. Дальномером выполняются прямые измерения расстояния, чаще всего многократные с соответствующей статистической обработкой. Измерения ГНСС на высшем уровне точности – это всегда многократные измерения на нескольких пунктах геодезической сети с последующим уравниванием, в процессе которого и определяются расстояния между пунктами. Наибольшая точность обеспечивается в глобальных сетях, опирающихся на координаты контрольных станций, определенные несколькими методами, не относящимися собственно к ГНСС. Именно эти методы обеспечивают воспроизведение единицы длины через скорость электромагнитных волн в диапазоне глобальных расстояний. Геодезические сети на основе ГНСС-измерений передают единицу длины в диапазон расстояний от тысяч до десятков километров, а для двойных перманентных станций – и до десятков метров.

Следует подчеркнуть, что с эталоном длины связаны не отдельные пункты или комплекты измерительных приборов, приемников ГНСС и соответствующего программного обеспечения, а именно расстояния между пунктами глобальной или обширной континентальной сети. Длительные, многолетние наблюдения на пунктах, которые являются перманентными станциями, обработка данных несколькими программными пакетами в нескольких независимых вычислительных центрах, уравнивание по сети станций и усреднение результатов дают возможность оценивать неопределенность расстояний между пунктами на миллиметровом уровне при удачной конфигурации сети в окрестности этих пунктов.

В интересующем нас диапазоне длин, от метра до километра, имеется только несколько пар перманентных станций, расстояния между которыми соотносятся с эталоном длины, воспроизводимым космическими техниками и передаваемым с помощью геодезических ГНСС-сетей. Никаких других методов и средств измерений в этом диапазоне, связанных с космическими техниками, нет. Неправоммерно использовать даже наилучшие комплекты антенн и приемников с наиболее продвинутыми программами для определения расстояния между двумя пунктами для сравнения с дальномерами, если только эти приемники и программы не были поверены и (или) откалиброваны на пунктах (пунктах-спутниках) перманентных станций в рабочем диапазоне длин.

### Выводы

Из опыта метрологов и геодезистов следует, что современное состояние метрологического обеспечения традиционных измерений в геодезии удовлетворяет запросам практики.

В области высокоточных ГНСС-измерений существуют определенные проблемы с поверкой аппаратуры и с методикой измерений. Реализация рассмотренных в работе возможностей оценки систематических



Рис. 7. Фрагмент возможной поверочной схемы в области больших длин (малых расстояний), основанной не на национальных, а на международных эталонах и средствах измерений

погрешностей на пунктах-спутниках permanentных станций и случайных погрешностей путем масштабирования оценок по внутренней сходимости даст возможность обоснованного представления точности измерений координат и расстояний ГНСС-методами.

**Замечания к программе дальнейших работ**

1. Расстояния между пунктами глобальной геодезической сети станций ГНСС прослеживаются к эталону длины (расстояния), определяемому через скорость электромагнитной волны и время ее распространения.

2. Глобальная сеть permanentных станций ГНСС – это сеть пунктов, координаты которых получены в результате длительных наблюдений и уравнивания. Миллиметровая точность координат пунктов сети и расстояний между ними, достигаемая благодаря уравниванию, вовсе не может быть обеспечена, например, для двух пунктов, не входящих в сеть, независимо от длительности наблюдений и совершенства программ обработки данных.

3. Координаты пунктов и, соответственно, расстояния между ними, относятся к линейной комбинации средних координат фазовых центров антенн на двух частотах. В подавляющем большинстве случаев эти координаты не могут быть перенесены на отдельные реперы, которые предназначены для установки геодезических приборов, таких как приемная антенна ГНСС или отражатель лазерного дальномера. Иными словами, глобальная сеть приемников ГНСС с точки зрения метрологического обеспечения измерений больших длин является “вещью в себе”, воспроизводя расстояния с высокой точностью, но не давая возможности сравнения с другими средствами измерений.

4. В терминах поверочных схем необходимо наличие средства сравнения (эталона-переносчика) для связи с рабочими средствами измерений ГНСС и со второй ветвью поверочной схемы измерений больших длин электронными дальномерами. Таким эталоном сравнения может быть комплекс программ для обработки первичных данных, накапливаемых в

приемниках пар permanentных станций, расположенных на малых расстояниях друг от друга. Результаты обработки расчетов расстояний таким комплексом программ в допустимых пределах должны соответствовать расстояниям, получаемым из глобальных сетевых решений.

В процессе аттестации рабочих эталонов – линейных геодезических базисов первичные данные с приемников на пунктах базиса обрабатываются комплексом программ эталона сравнения. Расстояния, полученные в процессе этой обработки и относящиеся к средним фазовым центрам антенн на пунктах, пересчитываются к физическим маркерам пунктов с использованием данных калибровки антенн.

5. Дополнением к использованию эталона-переносчика является включение в мировую сеть permanentных станций нескольких реперных пунктов дальномерного базиса, которые приспособлены для одновременной установки двух геодезических приборов – антенны приемника ГНСС и отражателя дальномера. Такие реперные пункты имеются на дальномерном базисе “Липцы” ННЦ “Институт метрологии”.

**Литература**

1. JRP SIB 60 Metrology for long distance surveying. – Режим доступа: <http://www.ptb.de/emrp/sib60-home.html>.
2. Jokela J., Häkli P., Ahola J., Būga A., Putrimas R. On traceability of long distances // XIX IMEKO World Congress Fundamental and Applied Metrology. September 6–11, 2009, Lisbon, Portugal.
3. Dehant V. International and national geodesy and its three pillars: (1) geometry and kinematics, (2) Earth orientation and rotation, and (3) gravity field and its variability / in: Proc. Earth Sciences day of the CNBGG “Geodesy and geophysics for the third millennium?” Belgian Academy of Sciences, October 13, 2005, eds. E. Arijs and B. Ducarme. – P. 27–35.
4. Національний еталонний лінійно-геодезичний полігон / Купко В., Прокопов О., Лукін І., Соболев В.,

- Косенко О., Кофман О. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. праць. – Львів, 2004. – С. 98–104.
5. Тревого І. С. Особливості метрологічної атестації еталонних геодезичних базисів / Тревого І. С., Цюпак І. М. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва : зб. наук. праць. – Львів, 2014. – Вип. I (27). – С. 29–33.
  6. Meyer T H. Checking GNSS-determined positions with EDM-observed distances / Meyer T. H.; Pozdnyakov V. // Survey Review. – Vol. 45. Issue 331 (July 2013). – P. 275–280.
  7. Тревого І. С. Метрологічна атестація еталонних базисів технологією GNSS / І. С. Тревого, І. М. Цюпак // Метрологія та прилади. – 2014. – № 6. – С. 52–55.
  8. Status of ITRF2014. Analysis Work is still in progress / Altamimi Z., Rebischung P., Métivier L., Collilieux X. // EUREF Symposium. – Leipzig, June, 2015.
  9. Можливості визначення відносного місцеположення з міліметровою точністю / Клепфер Є., Іванов В., Антонюк В., Корольов В., Воронков С., Савчук С., Тревого І. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. праць. – Львів, 2004. – С. 384–390.
  10. Кравченко Н. И. Методы и средства метрологического обеспечения линейных измерений на геодинимических полигонах Украины / Кравченко Н. И., Неежмаков П. И. // Український метрологічний журнал. – 2004. – Вип. 2. – С. 23–28.
  11. Цюпак І. М. Точність визначення координат пунктів і довжин ліній за сесіями GPS-спостережень різної тривалості / І. М. Цюпак // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. праць. – Львів, 2012.– Вип. I (23).– С. 57–59.
  12. Нові результати і перспективи досліджень на Яворівському науковому геодезичному полігоні / Тревого І. С., Цюпак І. М., Паляниця Б. Б., Волошин В. У. // Сучасні досягнення геодезичної науки та виробництва: зб. наук. праць. – Львів, 2016. – Вип. I (31). – С. 41–46.
  13. Состояние и перспективы работ по метрологическому обеспечению GPS измерений на эталонном полигоне ХГНИИМ / Занимонский Е. М., Копыл В. К., Купко Вл. С., Лукин И. В., Прокопов А. В., Сидоренко Г. С. // III Міжнародна науково-технічна конференція “Метрологія в електроніці–2000”: наук. праці конфер. Т. 2. – Харків, 2000. – С. 196–198.
  14. Nyberg S. GPS Deformation Measurements at Olkiluoto in 2012 / Nyberg S., Kallio U., Koivula H. // Posiva Working Report 2013–16.
  15. Metrological investigations of GNSS receivers on the basis of data from IGS/EPN and EUPOS stations of local permanent GNSS networks in Poland and Ukraine / Cisak J., Godah W., Zak L., Kupko V. S., Kostrikov A. V., Zanimonskiy Y. M. // EUREF Symposium. – Paris, 6–8 June 2012.
  16. Investigation of uncertainty of GNSS-based distance metrology using EPN double stations data / Cisak J., Zak L., Stepniak K., Wielgosz P., Kupko V. S., Olijnyk A. Y. Liubzhyn A., Zanimonskiy Y. M. // EUREF Symposium – Vilnius. – June 2014.
  17. Вшивкова О. В. Разработка концепции и технологии эффективного учета влияния приземного слоя атмосферы на угловые и линейные геодезические измерения: докт. дисс... Москва, 2011.
  18. Тревого І. С. Фундаментальна геодезична мережа як основа метрологічного забезпечення сучасних супутникових технологій / Тревого І. С., Цюпак І. М. // Вісник геодезії та картографії. – 2014. – № 3 (90). – С. 5–7.
  19. Спиридонов А. И. Основы геодезической метрологии / А. И. Спиридонов. – М.: Картгеоцентр-Геодезиздат, 2003. – 248 с.
  20. Trevoho I. S. Determination of normal height points of the standard of geodetic test field by GNSS technology / Trevoho I. S., Tsyupak I. M. // Метрологія та прилади. – 2015. – № 4. – С. 50–54.
- Геодезія і метрологія великих довжин і коротких векторів. Експерименти і еталони**  
В. Купко, П. Неежмаков, А. Олейник,  
Є. Занимонський, І. Тревого, І. Цюпак, Я. Цисак
- Зіставлено результати вітчизняних експериментів у сфері метрологічного забезпечення вимірювань великих довжин. Викладено концепцію міжнародного еталона й показано можливості використання в його складі українських геодезичних полігонів.
- Геодезия и метрология больших длин и коротких векторов. Эксперименты и эталоны**  
В. Купко, П. Неежмаков, А. Олейник,  
Е. Занимонский, И. Тревого, И. Цюпак, Я. Цисак
- Сопоставлены результаты отечественных экспериментов в области метрологического обеспечения измерений больших длин. Представлена концепция международного эталона и показаны возможности использования в его составе украинских геодезических полигонов.
- Geodesy and metrology of long distances and short vectors. Experiments and standards**  
V. Kupko, P. Neezhmakov, A. Oleynik,  
E. Zanimonskiy, I. Trevoho, I. Tsyupak, J. Cisak
- The results of domestic experiments in the field of metrological assurance of measuring of long distances were compared. The concept of the international standard was presented and the possibility of using of Ukrainian geodetic polygons in this standard was shown.