

УДК 528.3:531.5

ГАВРИЛЕНКО Ю.Н., СОКОЛОВ В.И., КОВАЛЕВ К.В. (Донецкий национальный технический университет)

## **СИСТЕМАТИЧЕСКАЯ СОСТАВЛЯЮЩАЯ ОШИБКИ GPS-НИВЕЛИРОВАНИЯ ПРИ КОРОТКИХ БАЗАХ, ВЫЗВАННАЯ ВЛИЯНИЕМ УКЛОНЕНИЕМ ОТВЕСНЫХ ЛИНИЙ**

*В статье выполнено исследование влияния уклонения отвесных линий на точность GPS-нивелирования при коротких базах. Для решения поставленных задач использовался экспериментальный метод исследований с последующей обработкой результатов измерений методами математической статистики и теории ошибок.*

В настоящее время GPS-наблюдения получили достаточно широкое распространение в геодезии и маркшейдерии (кадастровые работы, привязка аэрофотосъемки, создание и обновление планово-высотных сетей, геодезический мониторинг сдвижения земной поверхности др.). Условия городских территорий таковы, что большинство геодезических наблюдений производятся при незначительных расстояниях. В Донбассе важными являются мониторинговые исследования подработанных шахтами территорий, как при ведении горных работ, так и при закрытии шахт. Такие измерения характеризуются относительно небольшими расстояниями (в пределах 1–3 км), а также совместным использованием геометрического и спутникового нивелирования.

В публикациях последних лет [1–6] даётся описание исследований, в которых высокоточные GPS-наблюдения выполняются, в основном, на достаточно больших расстояниях между пунктами (более 10 км), в результате этого получают небольшие относительные ошибки. Кроме того, в сравнении с классическими методами при измерениях на больших расстояниях наблюдается значительное повышение производительности геодезических работ. Публикации по исследованиям точности GPS-нивелирования при коротких базах практически отсутствуют.

Предварительный анализ факторов расхождений между результатами геометрического нивелирования и GPS-нивелирования показал, что присутствуют систематические ошибки, превышающие средние квадратические ошибки спутниковых наблюдений. Эти систематические ошибки, скорее всего, вызваны тем, что при обработке GPS-наблюдений используются приближённые модели геоидов, где не учитывается влияние локальных изменений поверхности геоида. Поэтому основной целью настоящей работы является исследование влияния уклонения отвесных линий на точность GPS-нивелирования при коротких базах.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи исследования:

- создание экспериментального полигона;
- выполнение GPS-нивелирования и обработка результатов измерений;
- определение точности GPS-нивелирования при коротких базах;
- определение влияния уклонений отвесных линий на точность GPS-

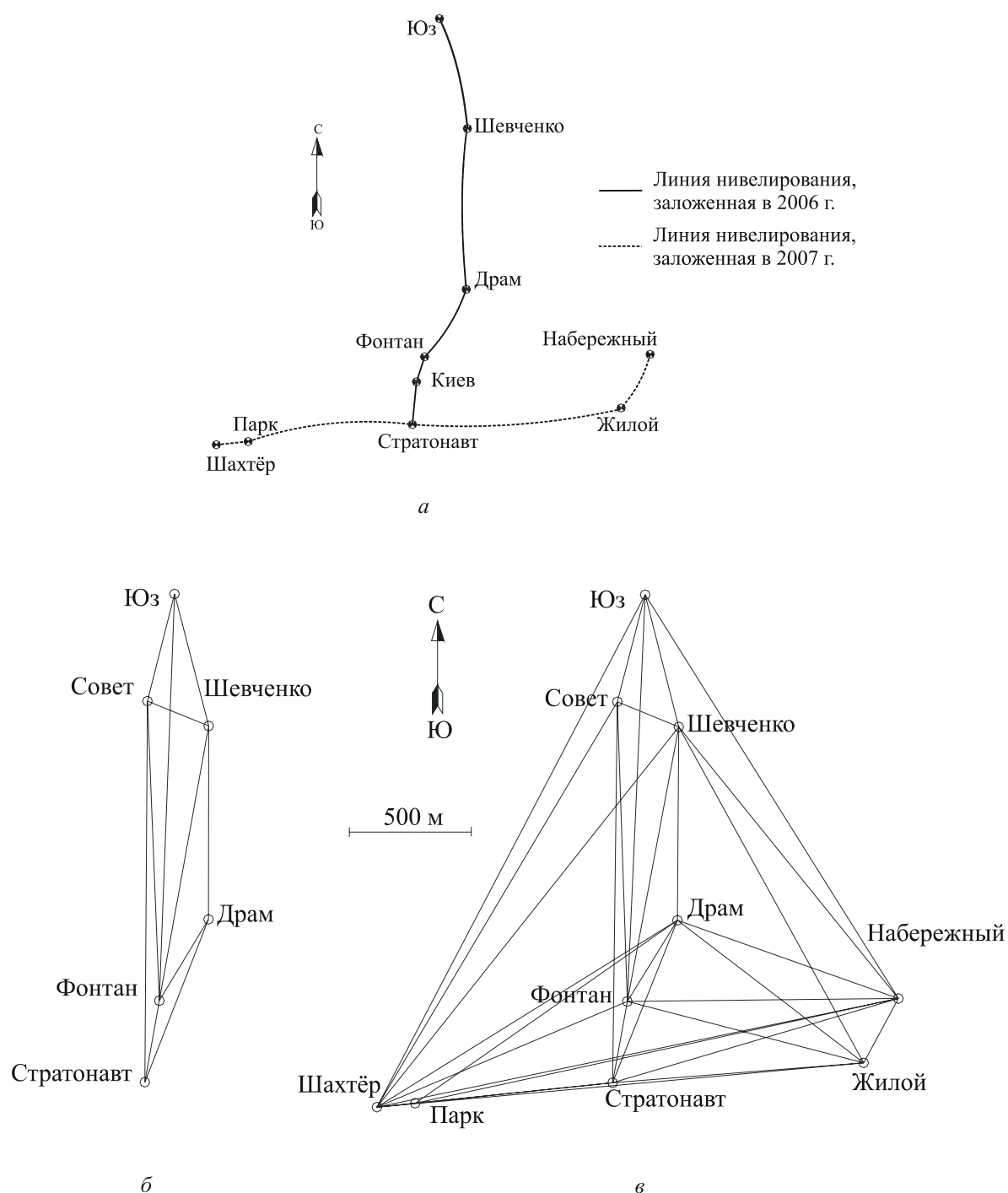
нивелирования при коротких базах.

Для решения поставленных задач использовался экспериментальный метод исследований с последующей обработкой результатов измерений методами математической статистики и теории ошибок.

В 2006 г. в центральной части г.Донецка были начаты работы по созданию экспериментального полигона, который представляет собой систему грунтовых пунктов.

На экспериментальном полигоне выполнялись GPS-наблюдения в статическом режиме и нивелирование по программе II класса.

Первоначально полигон был вытянут вдоль меридиана (рис.1,*а*). В 2007 г. была добавлена вторая линия, вытянутая в широтном направлении (рис.1,*а*). В окончательном виде полигон содержит 14 реперов. Общая протяжённость полигона с юга на север составляет 2 км, а с востока на запад – 2,1 км. Максимальное превышение между реперами – 66 м. Величина средней квадратической ошибки определения превышения нивелированием II класса составила 3,7 мм на км хода.



**Рис.1.** Схема экспериментального полигона (*а*) и спутниковых наблюдений в 2006 г. (*б*) и в 2007 г. (*в*)

GPS-наблюдения выполнялись по мере развития экспериментального полигона. Продолжительность измерения отдельного вектора составляла, как правило, 30 минут, частота записи данных – 1 секунда, угол маски – 10°. Измерения выполнялись одночастотными приёмниками ProMARK-X-СМ фирмы Magellan и двухчастотными приёмниками Z-Max фирмы Thales. Паспортная точность приёмников ProMARK-X-СМ в статическом режиме характеризуется средними квадратическими ошибками 15 мм + 3 мм на километр базовой линии как в плане, так и по высоте. Точность приёмников Z-Max: в плане – 5 мм + 0,5 мм/км, по высоте – 10 мм + 0,5 мм/км. На этапе постобработки выполнялась повекторная обработка измерений с помощью программного модуля GNSS Studio THALES Navigation в системе WGS-84, с использованием модель геоида EGM-96 (Earth Geoid Model).

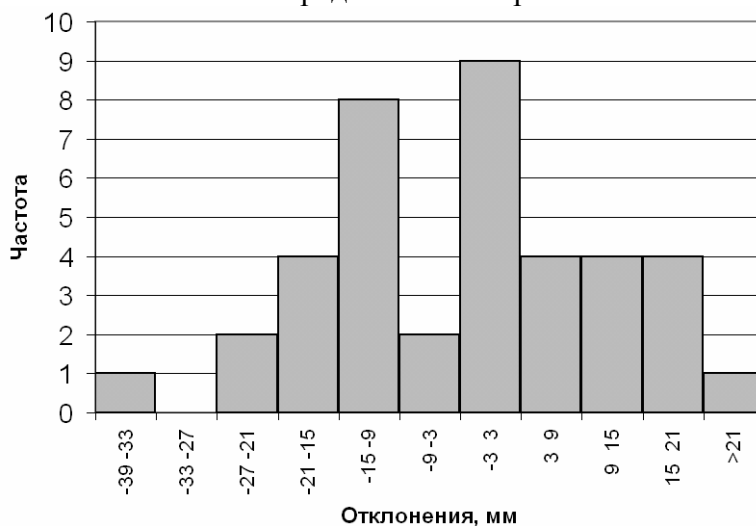
В 2006 г. на экспериментальном полигоне двухчастотными приёмниками Z-Max было выполнено измерение 11 векторов (см. рис.1,б). Подавляющее число векторов имели азимут в диапазоне  $\pm 10^\circ$ . Минимальная длина вектора составляла 271 м, максимальная – 1667 м. За счет последующего развития полигона в 2007 г. было увеличено потенциальное число измеряемых векторов. В 2007 г. выполнено измерение 45-ти векторов (см. рис.1,в). Измерения производились двумя одночастотными приёмниками ProMARK-X-СМ и одним двухчастотным приёмником Z-Max. Минимальная длина вектора в этих измерениях составила 159 м, максимальная – 2370 м. Измеренные векторы имели широкий диапазон изменения азимутов.

На основании результатов нивелирования II класса и GPS-нивелирования были получены отклонения  $\delta_h$  превышений при GPS-нивелировании от превышений при геометрическом нивелировании:

$$\delta_h = h_{\text{GPS}} - h, \quad (1)$$

где  $h_{\text{GPS}}$  – превышение, вычисленное из GPS-измерений с использованием модели геоида EGM-96;  $h$  – превышение, полученное по результатам нивелирования II класса.

Далее была выполнена оценка точности GPS-нивелирования (см. табл. 1). Гистограмма этих отклонений представлена на рис.2.



**Рис.2.** Гистограмма отклонений превышений GPS-нивелирования от геометрического нивелирования (до обработки)

Анализ отклонений показал, что в них содержится систематическая составляющая (большинство отклонений отрицательные), а математическое ожидание отклонений составляет  $-3,0$  мм, т.е. центр рассеяния отклонений смещён в сторону отрицательных значений. Среднее квадратическое отклонение составило 13,8 мм.

Наиболее вероятной причиной наличия систематической составляющей в превышениях GPS-нивелирования является наличие неучтенных уклонов отвесных линий. При выполнении геометрического нивелирования превышения определялись относительно уровенных поверхностей, а при обработке GPS-нивелирования использовалась модель геоида EGM-96, где не учитываются локальные отступления геоида.

Уклонение отвесной линии  $v$  по некоторому направлению с геодезическим азимутом  $A$ , согласно [6], определяется по формуле:

$$v = \xi \cdot \cos A + \eta \cdot \sin A, \quad (2)$$

где  $\xi$  – проекция полного уклонения отвесной линии на меридиан;  $\eta$  – проекция полного уклонения отвесной линии в первый вертикал.

С учетом этого по каждому вектору можно составить следующее параметрическое уравнение:

$$\frac{S}{\rho''} \cdot v'' + h_{\text{GPS}} - h = v, \quad (3)$$

где  $S$  – длина измеряемого вектора;  $v$  – поправка в превышение из GPS-нивелирования.

С учётом формулы (2) параметрическое уравнение преобразуется к следующему виду:

$$\frac{S}{\rho''} \cos A \xi'' + \frac{S}{\rho''} \sin A \eta'' + h_{\text{GPS}} - h = v, \quad (4)$$

Данные уравнения, число которых равно числу измеренных превышений из GPS-нивелирования, составляют систему, которая решается по способу наименьших квадратов. В результате решения определяются слагающие уклонения отвесных линий.

Результаты уравнивания данных полученных на экспериментальном полигоне приведены в таблице. Величины составляющих уклонения отвесных линий определялись как в 2006 г., так и в 2007 г. (см. табл. 2).

**Табл. 2.** Составляющие уклонения отвесных линий и их ошибки

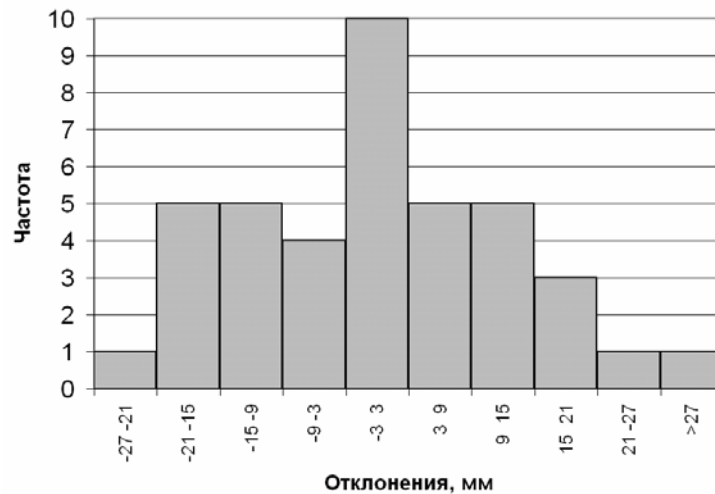
Годы измерений	Составляющие уклонения отвесной линии		Средние квадратические ошибки,			Количество уравнений
	$\xi$ , "	$\eta$ , "	$m_h$ , мм	$m_\xi$ , "	$m_\eta$ , "	
2006	+0,8	+4,8	10,3	0,7	4,8	10
2007	-0,7	+2,5	13,4	0,7	1,0	28
2006–2007	-0,1	+2,1	12,8	0,5	0,9	38

Из оценки точности измерений, выполненных в 2006 г. видно, что величина  $\xi$  определена гораздо лучше, чем величина  $\eta$ . Причиной этого является вытянутость полигона в меридиональном направлении. После реконструкции полигона средние квадратические ошибки определения обеих составляющих практически одинаковы.

Гистограмма распределения поправок в превышения из GPS-нивелирования, полученных в результате нахождения неизвестных уклонений, представлена на рис.3. Математическое ожидание откорректированных отклонений составило +0,4 мм.

Отличия в уклонениях отвесных линий в меридиане, определенные по данным измерений в 2006 г. и 2007 г., не превышают их средних квадратических ошибок, а значение, вычисленное по всем измерениям близко к нулю.

Слагающая уклонения отвесной линии в первом вертикале в районе исследованной составила около 2". Для вектора длиной 1,0 км, вытянутого в широтном направлении, это дает систематическую ошибку в определении превышения равную 10 мм. Такая систематическая ошибка по своей величине соизмерима с случайной составляющей (см.табл.). При увеличении длины вектора случайная ошибка будет оставаться примерно такой же, а систематическая будет возрастать прямо пропорционально расстоянию нивелирования.



**Рис.3.** Гистограмма отклонений превышений GPS-нивелирования от геометрического нивелирования (после обработки)

Выполненные исследования показали, что локальные уклонения отвесных линий могут приводить к систематическим ошибкам, которые по величине могут быть равны или превышать случайные ошибки при GPS-нивелировании как с односторонними, так и с двухчастотными приемниками. Поэтому в районе работ необходимо иметь как минимум две линии высокоточного геометрического нивелирования, с использованием которых должны определяться локальные уклонения отвесных линий. Одна из линий нивелирования должна быть вытянута в широтном, а вторая в – в меридианном направлении.

### ***Библиографический список***

1. **Романишин І. Б.** Розробка технології оптимального моделювання GPS-мережі: Автореферат дис. кан. техн. наук - Львів.: Національний університет «Львівська політехніка», 2006. - 19 с.
2. **Калинич І. В.** Розробка методики побудови мережі GPS-нівелювання в Закарпатському регіоні: автореферат дис. кан. техн. наук - Львів.: Національний університет «Львівська політехніка», 2006. - 16 с.
3. К вопросу оценки точности спутниковых определений, выполняемых на геодинимических полигонах. **Серебрякова Л. И., Горобец В. П., Козлова Л. Ю., Сермягин Р. А.** // Геодезия и картография, 2006. - №6. - С.34-39.
4. Исследование точности Государственной геодезической сети на территории Московской области с использованием Спутниковой системы (проект «Москва»). **Логинов С. А., Бойков В. В., Рогозин В. П., Монахова М. А.** // Геодезия и картография, 2006, №6. - С.23-28.
5. **Куприянов А. О., Бородко Е. А.** Комплексные испытания интегрированной картографо-геодезической спутниковой аппаратуры// Геодезия и картография, 2006, №10. - С.41-45.
6. **Высшая геодезия** / Под ред. В.Г.Здановича. – М.: Недра, 1970 – 512 с.