

ТЕЙШЕЙРА ДЕ КАРВАЛЬО АНТониО АЛВЕШ
РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПЛАНОВОЙ
ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ГОРОДА
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СОВРЕМЕННЫХ СПУТНИКОВЫХ
ТЕХНОЛОГИЙ (НА ПРИМЕРЕ Г. ЛУАНДА)

Специальность: 25.00.32 – Геодезия

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Геодезическая сеть Анголы построена разными исполнителями с использованием различных методов и инструментов, последствием этого стала неодинаковая точность измерений, в результате созданная сеть оказалось неоднородной по плотности и точности, а выполненные на территории Анголы геодезические и картографические работы недостаточны для обеспечения текущих задач народного хозяйства, не говоря уже о запросах ближайшего будущего. Для решения этих задач необходима современная государственная геодезическая сеть, которой к настоящему времени на территории Анголы нет. По результатам спутниковых измерений получаются координаты пунктов плановой геодезической сети города Луанды в системе WGS-84. Возникает необходимость определения параметров преобразования между плановой геодезической сетью Луанды и глобальной WGS-84.

Цель диссертационной работы

Диссертационная работа посвящена разработке методики модернизации плановой геодезической сети в городе Луанде с применением глобальных спутниковых навигационных систем.

Основные задачи исследования:

- модернизация плановой геодезической сети провинции Луанда при помощи новой технологии спутниковых измерений;
- обработка и анализ результатов, полученных при выполнении наблюдений модернизированной плановой геодезической сети в период с 2006 по 2010 гг.;
- расчет параметров преобразования плановой геодезической сети координат для провинции Луанда;
- статистический анализ параметров преобразования координат для провинции Луанда.

Научная новизна работы

1. Выполнен подробный анализ существующей геодезической сети Анголы, а так же точности, с которой были выполнены геодезические измерения.
2. Представлены математические обоснования выбора метода для решения задачи определения параметров преобразования координат в Луанде.
3. Разработана методика модернизации плановой геодезической сети г. Луанды.
4. Выполнен анализ полученных результатов спутниковых наблюдений и на их основании впервые вычислены параметры преобразования координат для провинции Луанда. Для сравнения вычисление параметров выполнено двумя способами.

Публикации и апробация работы

По результатам выполненных исследований по теме диссертации опубликована статья в журнале рекомендованном ВАК РФ.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, четырех разделов с подразделами, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы – 106 стр.. Диссертация содержит 22 таблицы, 28 рисунков и 12 страниц приложения. Список литературы составляет 41 наименование.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введение обоснована актуальность решаемой задачи, сформулированы цели и задачи исследования, обоснована научная новизна и практическая значимость работы.

ГЛАВА 1. АНГОЛА СЕГОДНЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ ЕЕ РАЗВИТИЯ

Ангола находится на африканском континенте в нижней части Южного полушария к востоку от Гринвичского меридиана. Площадь Анголы – 1246700 км².

В последние шесть лет – с 2003 г. и по настоящее время с наступлением мирного периода Ангола испытывает повышенный ритм экономического роста. Годовой рост валового национального продукта достиг за этот период средней

величины 14,7%. Это позволило снизить уровень безработицы до 22,5% в 2007 г. Действия правительства Анголы направлены на уменьшение зависимости ангольской экономики от нефти и алмазодобывающего сектора, развитие других экономических отраслей, требующих большого количества рабочей силы, что гарантирует повышение уровня занятости населения. Для успешного выполнения всеохватывающего национального проекта, который преобразует Анголу в процветающую, сильную, демократическую и современную страну с высоким уровнем научного, технического и культурного развития, включенную в региональную и мировую экономические системы, необходимо, в числе прочего, гарантировать создание:

- государственной высокоточной геодезической сети в единой системе координат с плотностью пунктов для картографирования страны в масштабе до 1:500 ;
- специальной пространственной сети – высокоточной опорной геодезической сети для передачи общих земных координат и закрепления этой международной системы на территории Республики Ангола.

ГЛАВА 2. ХАРАКТЕРИСТИКА СУЩЕСТВУЮЩЕЙ ГОСУДАРСТВЕННОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ В РЕСПУБЛИКЕ АНГОЛА

Геодезическая сеть на территории Республики Анголы создавалась различными организациями: Гидрографической Миссией Анголы (МНА), 1936-1942 гг.; Географической Миссией Анголы (МГА), 1942-1973 гг.; португальскими фирмами «ARTOP» и «ТЕСАFO», 1961-1964 гг., а также службой географии и кадастра Анголы (SGC), 1953 гг. Геодезические сети в Республике Ангола по точности подразделяются на 1, 2 и 3 классы. Внутри полигонов 1-го класса проложены звенья триангуляции 2-го класса, а также была развита сеть триангуляции 3-го класса. Геодезическая сеть, созданная Гидрографической Миссией Анголы, создавалась вдоль Атлантического побережья в виде одного ряда триангуляции. Геодезические сети, построенные Гидрографической Миссией Анголы и Географической Миссией Анголы, связаны между собой. Восточнее 18° (34 зона) геодезическая сеть создавалась португальскими фирмами «ARTOP» и «ТЕСАFO». Она состоит из рядов трилатерации и системы ходов полигонометрии. Плотность геодезических пунктов

на территории Анголы не равномерна – средняя плотность геодезических пунктов составляет 1 пункт на 375 км².

Вычисление координат геодезических пунктов проводилось первоначально на эллипсоиде Кларка 1866 г., а затем они были перевычислены на эллипсоид Кларка 1880 г. Высоты пунктов геодезической сети были получены в основном из тригонометрического нивелирования, используя в качестве исходных пункты, высоты которых определены из геометрического нивелирования. Анализ точности выполненных работ показывает, что из ранее выполненных работ только построения, выполненные Географической Миссией Анголы, укладываются в современные требования «Инструкции о построении и развитии ГГС».

Проведенные исследования, направленные на определение однородности существующей ГГС, показали, что существующая сеть настолько неоднородна по точности, что она фактически фиксирует разные, хотя и близкие системы координат. Это проявляется в очень больших значениях ошибок параметров преобразования координат провинции Луанда и глобальной системы координат WGS-84.

Высотное обоснование на территории Республики Анголы представлено сетью нивелирования высокой точности, созданной в период с 1956 по 1991 гг. только в западной части страны. Единого уравнивания пунктов геодезических сетей сгущения ГГС не было выполнено.

В результате проведенного анализа необходимо отметить следующие недостатки существующей плановой геодезической сети города Луанды: отсутствие совместной математической обработки всех имеющихся государственных плановых геодезических сетей; отсутствие высокоточной связи между государственными, местными и городскими системами координат; необеспеченность всех заинтересованных организаций современной геоинформацией; отсутствие связи с общеземными системами координат IERS (International Earth Rotation Service), WGS-84, IGS; существующая в настоящее время плановая геодезическая сеть г. Луанды ни по точности, ни по плотности не отвечает перспективам и современным требованиям и соответственно нуждается в коренной модернизации;

Получившая в настоящее время широкое распространение спутниковая технология позволяет успешно решать вышеперечисленные проблемы, обеспечивая при этом не только высокий уровень точности, но и развитие плановой геодезической сети города Луанды со значительным технико-экономическим эффектом.

ГЛАВА 3. МЕТОДЫ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ КООРДИНАТ

Для модернизации геодезической сети Анголы следует пользоваться современными спутниковыми технологиями. В настоящее время наиболее развитыми системами спутниковых наблюдений в мире являются GPS и ГЛОНАСС. При их использовании координаты пунктов будут получены в одной из данных референцных систем, связанных с общеземными эллипсоидами WGS-84 и ПЗ-90. Ангола пользуется системой координат Кларка 1880 г., из этого следует, что преобразование координат из одной геодезической системы в другую фундаментально важно и должно проводиться со всей возможной осторожностью.

Преобразование координат из национальной системы в систему координат спутниковых наблюдений и обратно является серьезной задачей и требует глубокого исследования. В работе рассмотрены следующие методы преобразования координат: аффинный, ортогональный, конформный.

В Луанде для преобразования координат можно использовать либо конформный метод, либо метод ортогонального преобразования, так как в обоих случаях масштабный коэффициент постоянен для всех координатных осей или равен единице. Относительно операции масштабирования следует выполнить подробный анализ непосредственно для случая Луанды.

Масштабный коэффициент $m = (1 + \mu)$ рассчитывается по следующей формуле:

$$m = S_{\Gamma} / S_{\text{СП}}, \quad (1)$$

где S_{Γ} – расстояние между смежными пунктами в сети ГГС; $S_{\text{СП}}$ – расстояние между смежными пунктами в сети СГС.

Дифференцируя формулу (1) и переходя к средней квадратической погрешности, получим:

$$m_m / m = \sqrt{m_{S_{\Gamma}}^2 / S_{\Gamma}^2 + m_{S_{\text{СП}}}^2 / S_{\text{СП}}^2}. \quad (2)$$

Координаты или приращения координат, вычисленные по результатам

спутниковых измерений, характеризуются относительной ошибкой $m_{\text{СП}} / S_{\text{СП}} = 1/2000000$, в то время как взаимное положение пунктов существующей сети в Луанде характеризуется относительной ошибкой на порядок грубее. Стороны сети триангуляции 1-го класса были определены с относительной ошибкой $m_{\text{СТ}} / S_{\text{Г}} = 1/300000$. Подставив эти величины в формулу (2), и учитывая что масштабный коэффициент $m \approx 1$, в лучшем случае получим $\frac{m_m}{m} = 3 \cdot 10^{-6}$, а наиболее часто $\frac{m_m}{m} = 1 \cdot 10^{-5}$.

Как видно из расчетов, несложно убедиться в том, что точность вычисления масштабного коэффициента не может превышать относительную ошибку взаимного положения пунктов городской геодезической сети в Луанде. Однако учитывая то обстоятельство, что при преобразовании координат происходит согласование более точных спутниковых определений с менее точными значениями приращений координат государственной геодезической сети, можно утверждать, что определение и использование масштабного коэффициента в Луанде не желательно.

По данной причине не рекомендуется вычислять масштабный коэффициент при преобразовании координат из системы, используемой для эллипсоида Кларка 1880 г., в систему, используемую для эллипсоида WGS-84, и обратно. Использование масштабного коэффициента в Луанде приведет к неизбежному снижению точности результатов спутниковых измерений.

Из выполненного анализа следует, что для использования в Луанде наиболее оптимальным является *ортогональный метод* преобразования координат

Оценка точности преобразованных координат при ортогональном методе

Общее ортогональное преобразование описывается соотношением, где каждый связующий пункт позволяет составить следующее уравнение:

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_{\text{гео}} \\ Y_{\text{гео}} \\ Z_{\text{гео}} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где X, Y, Z – преобразованные координаты; $X_{\text{гео}}, Y_{\text{гео}}, Z_{\text{гео}}$ – преобразуемые коор-

динаты (координаты, относящиеся к геоцентрической системе);

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_2 & a_3 \\ b_1 & b_2 & b_3 \\ c_1 & c_2 & c_3 \end{bmatrix} - \text{ортогональная матрица вращения; } \Delta X, \Delta Y, \Delta Z - \text{смещение}$$

начала координат.

Ортогональная матрица вращения A систем координат представляет собой произведение матриц последовательного поворота, которая получена последовательным вращением координатных осей на углы α, β, γ : $A = A(\alpha)A(\beta)A(\gamma)$.

После определения элементов матрицы A получим:

$$X = \cos \beta \cos \gamma X_{\text{geo}} + \cos \beta \sin \gamma Y_{\text{geo}} + \sin \beta Z_{\text{geo}} + \Delta X; \quad (4)$$

$$Y = -\sin \alpha \sin \beta \cos \gamma X_{\text{geo}} - \cos \alpha \sin \gamma X_{\text{geo}} - \sin \alpha \sin \beta \sin \gamma Y_{\text{geo}} + \cos \alpha \cos \gamma Y_{\text{geo}} + \sin \alpha \cos \beta Z_{\text{geo}} + \Delta Y; \quad (5)$$

$$Z = -\cos \alpha \sin \beta \cos \gamma X_{\text{geo}} + \sin \alpha \sin \gamma X_{\text{geo}} - \cos \alpha \sin \beta \sin \gamma Y_{\text{geo}} - \sin \alpha \cos \gamma Y_{\text{geo}} + \cos \alpha \cos \beta Z_{\text{geo}} + \Delta Z. \quad (6)$$

Определим средние квадратические ошибки преобразованных координат X, Y, Z , чтобы обосновать выбор ортогонального метода преобразования координат для применения в Луанде. С этой целью установим зависимость между малыми изменениями преобразованных координат X, Y, Z преобразуемых координат $X_{\text{geo}}, Y_{\text{geo}}, Z_{\text{geo}}$ и параметров преобразования $\alpha, \beta, \gamma, \Delta X, \Delta Y, \Delta Z$.

Дифференцируя равенство (4), получим:

$$dX = \left[-(\sin \beta \cos \gamma) X_{\text{geo}} - (\sin \beta \sin \gamma) Y_{\text{geo}} - \cos \beta Z_{\text{geo}} \right] \rho^{-1} d\beta + \left(\begin{array}{l} -\sin \gamma \cos \beta X_{\text{geo}} + \\ + \cos \gamma \cos \beta Y_{\text{geo}} \end{array} \right) \rho^{-1} d\gamma + \cos \beta \cos \gamma dX_{\text{geo}} + \cos \beta \sin \gamma dY_{\text{geo}} + \sin \beta dZ_{\text{geo}} + d\Delta X. \quad (7)$$

Введем обозначения:

$$\left. \begin{array}{l} A_X = \left[-(\sin \beta \cos \gamma) X_{\text{geo}} - (\sin \beta \sin \gamma) Y_{\text{geo}} - \cos \beta Z_{\text{geo}} \right] \rho^{-1} \\ B_X = (-\sin \gamma \cos \beta X_{\text{geo}} + \cos \gamma \cos \beta Y_{\text{geo}}) \rho^{-1} \\ C_X = \cos \beta \cos \gamma \\ D_X = \cos \beta \sin \gamma \\ E_X = \sin \beta \end{array} \right\}. \quad (8)$$

Аналогично, дифференцируя равенства (5) и (6) и введя соответствующие обозначения, окончательно получим

$$\begin{aligned} dX &= A_X d\beta + B_X d\gamma + C_X dX_{\text{geo}} + D_X dY_{\text{geo}} + E_X dZ_{\text{geo}} + d\Delta X; \\ dY &= A_Y d\alpha + B_Y d\beta + C_Y d\gamma + D_Y dX_{\text{geo}} + E_Y dY_{\text{geo}} + F_Y dZ_{\text{geo}} + d\Delta Y; \end{aligned} \quad (9)$$

$$dZ = A_Z d\alpha + B_Z d\beta + C_Z d\gamma + D_Z dX_{\text{гео}} + E_Z dY_{\text{гео}} + F_Z dZ_{\text{гео}} + d\Delta Z.$$

Средние квадратические ошибки преобразованных координат равны:

$$\begin{aligned} m_X^2 &= A_X^2 m_\beta^2 + B_X^2 m_\gamma^2 + C_X^2 m_{X_{\text{гео}}}^2 + D_X^2 m_{Y_{\text{гео}}}^2 + E_X^2 m_{Z_{\text{гео}}}^2 + m_{\Delta X}^2; \\ m_Y^2 &= A_Y^2 m_\alpha^2 + B_Y^2 m_\beta^2 + C_Y^2 m_\gamma^2 + D_Y^2 m_{X_{\text{гео}}}^2 + E_Y^2 m_{Y_{\text{гео}}}^2 + F_Y^2 m_{Z_{\text{гео}}}^2 + m_{\Delta Y}^2; \\ m_Z^2 &= A_Z^2 m_\alpha^2 + B_Z^2 m_\beta^2 + C_Z^2 m_\gamma^2 + D_Z^2 m_{X_{\text{гео}}}^2 + E_Z^2 m_{Y_{\text{гео}}}^2 + F_Z^2 m_{Z_{\text{гео}}}^2 + m_{\Delta Z}^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Для иллюстрации возьмем пример геодезической опорной сети современного города Луанда, где прямоугольные пространственные координаты пункта FORT имеют следующие значения:

$$X_{\text{ГЕО}} = 6136345,058 \text{ м}; Y_{\text{ГЕО}} = 1441915,379 \text{ м}; Z_{\text{ГЕО}} = 97023333,391 \text{ м}.$$

Используя формулу (8), определим коэффициенты:

$$\left. \begin{aligned} A_X &= 5, & B_X &= 7, & C_X &= 1, & D_X &= E_X = 0 \\ A_Y &= 5, & B_Y &= D_Y = F_Y = 07, & C_Y &= 30, & E_Y &= 1 \\ A_Z &= 7, & B_Z &= 30, & C_Z &= D_Z = E_Z = 0, & F_Z &= 1 \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Подставим (11) в уравнение (3), в результате получим:

$$\left. \begin{aligned} m_X^2 &= 5^2 m_\beta^2 + 7^2 m_\gamma^2 + m_{X_{\text{гео}}}^2 + m_{\Delta X}^2 \\ m_Y^2 &= 5^2 m_\alpha^2 + 30^2 m_\gamma^2 + m_{Y_{\text{гео}}}^2 + m_{\Delta Y}^2 \\ m_Z^2 &= 7^2 m_\alpha^2 + 30^2 m_\beta^2 + m_{Z_{\text{гео}}}^2 + m_{\Delta Z}^2 \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Характерной особенностью формулы (10) является то, что найдено точность вычисления параметров преобразования, тогда мы можем определить допустимую (ожидаемую) точность преобразованных координат.

Точность определения параметров преобразования в г. Луанде равна:

$$\begin{aligned} m_{\Delta X} \approx m_{\Delta Y} \approx m_{\Delta Z} &\approx 0,100 \text{ м}; m_\alpha \approx m_\beta \approx m_\gamma \approx 0,001", \quad \text{средняя квадратическая} \\ \text{ошибка преобразуемых координат} & \quad m_{X_{\text{ГЕО}}} = 0,025 \text{ м}; \quad m_{Y_{\text{ГЕО}}} = 0,042 \text{ м}; \\ m_{Z_{\text{ГЕО}}} &= 0,027 \text{ м}, \quad \text{подставив эти величины в формулу (12), получим:} \\ m_X &= 0,103 \text{ м}; m_Y = 0,108 \text{ м}; m_Z = 0,103 \text{ м}. \end{aligned}$$

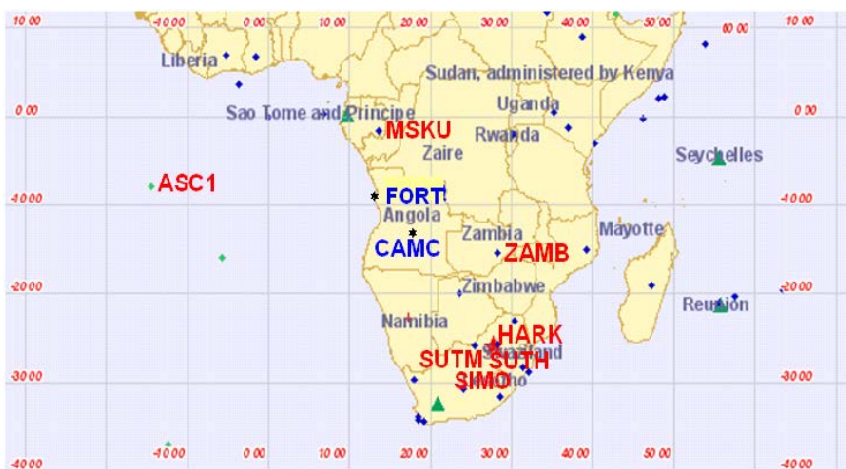
Отсюда можно сделать следующий вывод: при модернизации плановой геодезической сети с использованием современных спутниковых технологий точность преобразованного положения пункта в Луанде при ортогональном методе можно достигнуть 0,180 м.

ГЛАВА 4. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МОДЕРНИЗАЦИИ ПЛАНОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ ГОРОДА ЛУАНДА

Учитывая, что провинция Луанда является самой индустриализированной провинцией Анголы, а также из-за срочной необходимости реконструкции геодезической сети, в диссертации отдан приоритет провинции Луанда и создан проект модернизации на основе спутниковой технологии высокоточной геодезической сети (ВОГС). ВОГС служит для определения положения пунктов государственной геодезической сети Анголы в прямоугольной пространственной системе координат X, Y, Z , а также используется для создания высокоточных карт высот квазигеоида. Каждый пункт ВОГС связан с одним из пунктов Самасура (Бие) или Fortaleza (Луанда), которые связаны с пунктами мировой геодезической сети WGS-84, IGS.

Выбор опорных станций IGS

Основными требованиями при выборе опорных станций IGS являются наличие измерительной информации и метеопараметров в интервале 2007–2010 гг., координат и скоростей их изменения, наиболее близкое положение относительно



пунктов Fortaleza и Самасура, взаимная согласованность координат станций. Схема расположения используемых станций приведена на рис. 1.

Определение координат станций FORT и CAM в системе

Рисунок 1. Схема расположения станций

ITRF-2005 относительно выбранных станций IGS выполнено по суточным файлам измерений. Даты измерений: 22, 28 октября; 3, 8, 15, 21, 26 ноября; 3, 8, 15 декабря 2009 г.

Предрасчет точности выполнен методом моделирования, используя программу AJURGPS. Уравнивание выполнено по базисным линиям (векторам) между станциями IGS (MSKU, ZAMB, HARK). В качестве примера приводятся результаты измерений и оценка точности передачи координат со станции MSKU на пункт FORT (табл. 1).

Можно сделать вывод, что в случае установки активных станций GNSS на пунктах FORT и CAM, ожидаемую точность взаимного положения пунктов после уравнивания можно получить в пределах 5-10 мм. Последующие измерения должны быть выполнены во всех комбинациях, т. е. по векторам между опорными станциями IGS (MSKU, ZAMB, HARK) и пунктами FORT и CAM. Получив уравненные координаты пунктов FORT и CAM, нужно использовать эти пункты в качестве исходных для уравнивания ВОГС в координатной системе WGS-84.

Таблица 1. Оценка точности передачи координат со станции MSKU на пункт FORT

Результаты измерений			$d_x, \text{ м}$	$d_y, \text{ м}$	$d_z, \text{ м}$	$d_x^2, \text{ м}$	$d_y^2, \text{ м}$	$d_z^2, \text{ м}$
X, м	Y, м	Z, м						
6136345,058	1441915,379	-9702333,391	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6136345,023	1441915,339	-9702333,369	-0,035	-0,040	0,022	0,001	0,002	0,000
6136345,078	1441915,441	-9702333,365	0,020	0,032	0,026	0,000	0,001	0,001
6136345,090	1441915,404	-9702333,357	0,032	0,025	0,034	0,001	0,001	0,001
6136345,085	1441915,424	-9702333,363	0,027	0,045	0,028	0,001	0,002	0,001
6136345,071	1441915,329	-9702333,424	0,013	-0,050	-0,033	0,000	0,003	0,001
6136345,074	1441915,347	-9702333,427	0,016	-0,032	-0,036	0,000	0,001	0,001
6136345,076	1441915,399	-9702333,363	0,018	0,020	0,028	0,000	0,000	0,001
6136345,043	1441915,429	-9702333,372	-0,015	0,050	0,019	0,000	0,003	0,000
6136345,027	1441915,424	-9702333,402	-0,031	0,045	-0,011	0,001	0,002	0,000
6136345,092	1441915,431	-9702333,367	0,034	0,052	0,024	0,001	0,003	0,001
$m =$						0,080	0,134	0,086

В таблице d_x, d_y, d_z – отклонения от величин опорных координат пункта FORT.

Средние квадратические ошибки определения средних значений координат пункта FORT: $m_x = 0,025 \text{ м}$; $m_y = 0,042 \text{ м}$; $m_z = 0,027 \text{ м}$.

После уравнивания пунктов FORT и CAM имеются: вектор неизвестных x_{i-1} , матрица обратных весов $Q_{x_{i-1}}$ и квадратичная формула $\Phi_{i-1} = V_{i-1}^T P_{i-1} V_{i-1}$. После этого к сети присоединяются измерения, выполненные на пунктах первого этапа построения сети ВОГС – Munguanha, Marco 23, P.Alex, Tchizo с уравнениями поправок $V_i \Delta x_i + L_i$. Для контроля точности можно выполнить повторное уравнивание. До уравнивания вычисляют приближенные координаты определяемых пунктов X_0, Y_0, Z_0 . В результате уравнивания определяют поправки в эти координаты $\partial_x, \partial_y, \partial_z$ и поправки V_x, V_y, V_z в измеренные приращения координат $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$.

Провинция Луанда имеет площадь, равную приблизительно 3000 км², та-

ким образом, одного пункта ВОГС (FORT) достаточно, чтобы покрыть всю провинцию, так как планируется, что средние расстояния между смежными пунктами ВОГС будут около 100 км, и что каждый из этих пунктов будет покрывать площадь приблизительно в 31400 км².

Результаты измерений спутниковым методом на пунктах городской геодезической сети

В период с 2007 по 2010 гг. группа, руководимая автором настоящей работы, представила Институту географии и кадастра Анголы (IGCA) проект по модернизации геодезической сети г. Луанда. Схема проектируемой сети показана на рис. 2.

Были выполнены наблюдения на 19-ти пунктах, 5 из которых уже принадлежат городской геодезической сети (Fortaleza, Morro da Cruz, Parque, Quibenga, Sassalemba).

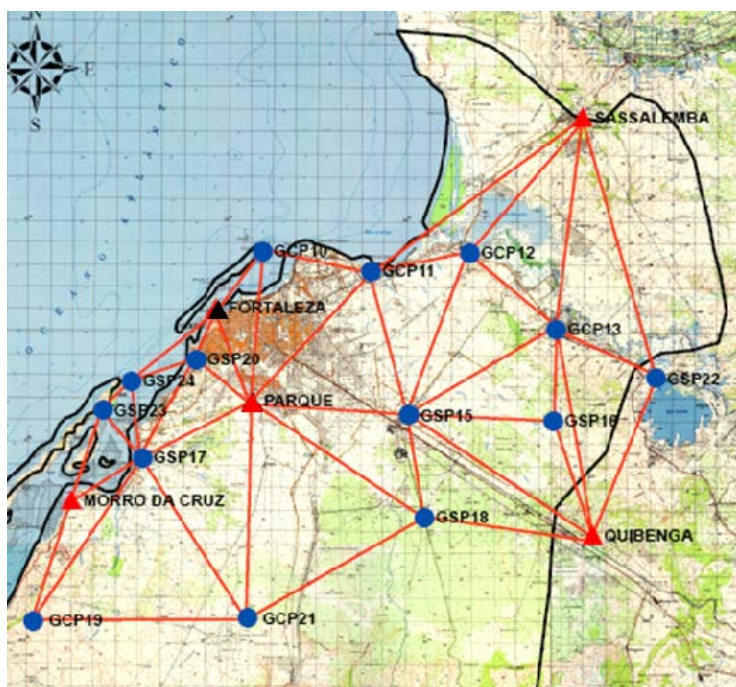


Рисунок 2. Проект модернизации геодезической сети Луанды

- ▲ – пункты ГГС I-го класса;
- – пункты городской сети Луанды;
- ▲ FORTALEZA – пункт ГГС I-го класса, будущая активная станция GNSS

Sassalemba). Пункт Fortaleza в будущем станет пунктом ВОГС (рис. 2). Измерения на всех пунктах производились двухчастотными геодезическими приемниками – модель 4000SSE Trimble. Наблюдения при помощи GPS выполнялись в статическом режиме. Было установлено, что наблюдения должны производиться с использованием 6-8 или более спутников, с ограничением угла маски от 15°. Наблюдения выполнялись одно-

временно на четырех пунктах. В результате были выполнены 11 сеансов наблюдений, каждый сеанс продолжался два часа.

Из анализа невязок (трехмерного вектора $w_{\Delta X}, w_{\Delta Y}, w_{\Delta Z}$) можно заключить, что максимальная невязка составила 0,006 м, а точность наблюдений модернизированной сети провинции Луанда – $w_{\Delta S_{\max}} / D_{\text{cp}} = 1:8000000$. Для независимых базовых векторов, измеренных дважды в разные дни, максимальное расхожде-

ние повторных линий составило: $\Delta X - 7$ мм; $\Delta Y - 8$ мм; $\Delta Z - 5$ мм. Данные наблюдений GPS являются удовлетворительными и отвечают техническим нормам, применяемым при построении спутниковых геодезических сетей. После окончания наблюдений выполнялось уравнивание всех измерений.

Глобальные методы преобразования координат обеспечивают высокую точность при работе с точными координатными системами, например, ITRF-2005. При преобразовании локальных референчных координат ошибки могут значительно возрасти из-за того, что параметры связи координатных систем во многих случаях определяются по ограниченной выборке точек и не могут учитывать локальные нелинейные искажения в сетях. Чтобы уменьшить эту ошибку, в локальных областях необходимо пользоваться методами, в которых переход от одной системы в другую выполняют по тем же алгоритмам, которые используются в глобальных методах, по параметрам перехода.

Анализируя средние квадратические ошибки m_E, m_N плоских координат в проекции Меркатора E_i, N_i , можно определить, насколько в среднем повышается точность определения координат пунктов сети в результате уравнивания с использованием только диагональных элементов корреляционных матриц и с помощью полной корреляционной матрицы. Результаты исследования показали, что максимальные значения составляют величины: первый вариант $m_{E_1} = 0,019$ м, $m_{N_1} = 0,020$ м; второй вариант $m_{E_1} = 0,025$ м, $m_{N_1} = 0,025$ м.

Коэффициенты C_E, C_N , среднего повышения точности абсцисс и ординат: $C_E = m_{E_2} / m_{E_1} \approx 1,5$; $C_N = m_{N_2} / m_{N_1} \approx 1,5$. Следовательно, если использовать при уравнивании полную корреляционную матрицу, то точность определения плановых координат в провинции Луанда повысится в среднем в 1,5 раза.

Анализ определения точности взаимного положения смежных пунктов модернизированной сети провинции Луанда показал, что в результате уравнивания точность определения относительной ошибки стороны городской сети Луанды не хуже, чем допустимая относительная ошибка стороны СГС-1. Отсюда можно сделать вывод, что в целом городская сеть Луанды может служить как

сеть первого порядка опорной государственной геодезической сети Анголы, и в будущем следует повышать ее точность для обеспечения обновления планов города всех масштабов.

Вычисление параметров преобразования координат

Математическая модель преобразования координат, которая будет использоваться в Луанде – это ортогональный метод. Пространственные прямоугольные координаты пунктов, полученные на основании геодезических координат, на эллипсоид Кларка 1880 г., вычислены по известным формулам:

$$\left. \begin{aligned} X_i &= (N_i + H_{G_i}) \cos B_i \cos L_i \\ Y_i &= (N_i + H_{G_i}) \cos B_i \sin L_i \\ Z_i &= (N_i + H_{G_i}) \sin B_i - e^2 N_i \sin B_i \end{aligned} \right\};$$

где N – радиус кривизны первого вертикала: $N_i = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_i}$; a – большая полуось эллипсоида; e – эксцентриситет; $e = \sqrt{a^2 - b^2} / a$; b – малая полуось эллипсоида; H_G – геодезическая высота пункта.

При проведении эксперимента для обработки данных были использованы два варианта. Для первого варианта уравнивание выполнено параметрическим методом. В параметрическом методе линейная модель представлена следующим выражением:

$$V = AX + L, \quad (13)$$

где $V_{(3n \times 1)}$ – вектор поправок; $A_{(3n \times 6)}$ – матрица коэффициентов; X – матрица неизвестных (параметры преобразования); L – свободный член;

$$L_{(57 \times 1)} = \begin{bmatrix} X_{i_{\text{geo}}} - X_i \\ Y_{i_{\text{geo}}} - Y_i \\ Z_{i_{\text{geo}}} - Z_i \end{bmatrix}; \quad X, Y, Z - \text{преобразованные координаты}; \quad X_{\text{geo}}, Y_{\text{geo}}, Z_{\text{geo}} - \text{преобразуемые координаты.}$$

Для решения уравнения (13) используется метод наименьших квадратов. Таким образом, параметры преобразования можно найти при помощи уравнения: $X = -N^{-1}U$, где $N_{(6 \times 6)} = A^T P A$ – нормальная матрица; $U_{(6 \times 1)} = A^T P L$.

Ошибка единицы веса

$$\mu = \sqrt{V^T P V / 3n - 6}, \quad (14)$$

где μ – средняя квадратическая ошибка единицы веса; n – количество наблюдаемых пунктов.

Получив решение (14), оценка точности параметров преобразования выполняется по формуле: $m_{\Delta X} = \mu\sqrt{Q_{11}}$; $m_{\Delta Y} = \mu\sqrt{Q_{22}}$; $m_{\Delta Z} = \mu\sqrt{Q_{33}}$; $m_{\alpha} = \mu\sqrt{Q_{44}}$;
 $m_{\beta} = \mu\sqrt{Q_{55}}$; $m_{\gamma} = \mu\sqrt{Q_{66}}$, (15)

где Q_{ii} - диагональные элементы обратной матрицы нормальных уравнений.

Во втором варианте для оценки параметров преобразования было использовано линейное уравнение, в котором вектор поправок заменен вектором помех n , и добавлена новая величина – случайный сигнал s' :

$$L_{(3q \times 1)} = A_{(3q \times u)} X_{(u \times 1)} + s'_{(3q \times 1)} + n_{(3q \times 1)}, \quad (16)$$

где L – вектор свободных элементов; A – матрица коэффициентов; X – вектор уравненных параметров; n – вектор помех (ошибки наблюдений); s' – вектор случайных сигналов в пунктах наблюдений q ; q – число пунктов наблюдения; u – число оцениваемых параметров.

Уравнение (16) имеет три составляющих: одна систематическая AX , и две случайных n и s' . Составляющая AX может быть представлена математической моделью и называется моделируемой частью; случайные составляющие представляют немоделируемую часть. Случайный сигнал s' может быть понят как недостаток математической модели, т. е. невозможность данной модели полностью описать соотношение между вектором L и параметрами X . Вторым вариантом для оценки параметров преобразования – это процесс, в котором комбинируются уравнивание, фильтрация и интерполяция. Оценка параметров X может быть принята как уравнивание, удаление помех n из результатов наблюдений – как фильтрация, и оценка сигнала s в пунктах, где не были выполнены наблюдения, – как интерполяция.

Обработка данных для получения результатов была выполнена с использованием программы MATLAB. Вычисление параметров преобразования по методу наименьших квадратов требует наличия пунктов с известными прямоугольными пространственными координатами X , Y , Z , в системах WGS-84 и

Кларка 1880 г., где векторы свободных элементов задаются разницей координат идентичных станций. Данными, использованными для настоящего эксперимента, являются координаты 19 пунктов городской геодезической сети Луанды. Вектор свободных элементов, использованный в процессе вычисления параметров преобразования, был определен при помощи выражения $L_{(57 \times 1)} = \begin{bmatrix} X_{i_{\text{reo}}} - X_i \\ Y_{i_{\text{reo}}} - Y_i \\ Z_{i_{\text{reo}}} - Z_i \end{bmatrix}$.

Ковариационная функция C может быть построена на основании вектора свободных элементов по показательным результатам дисперсий и ковариаций. Показательные результаты дисперсии вычисляются по следующим формулам:

$$C_1(0) = \frac{1}{n-1} \sum_{K=1}^n [I_i - \bar{I}]^2;$$

$$C_1(\Delta) = \frac{1}{n_k-1} \sum_{K=1}^n [I_i - \bar{I}][I_k - \bar{I}].$$

где n – общее количество свободных элементов; n_k – количество свободных элементов в определенном интервале, для которого вычисляются ковариации; I_i, I_j, \bar{I} – собственно свободные элементы, где \bar{I} – их средняя величина.

Пространственные расстояния $[(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2 + (Z_i - Z_j)^2]^{\frac{1}{2}}$ разделены на равные интервалы δ . В каждом интервале ковариации вычислены для трех компонент (X, Y, Z) . В табл. 2 показаны результаты ковариаций $C_1(\Delta)$, вычисленные по свободным элементам. В каждом интервале ковариация была вычислена для средней точки, где величина δ равна 3 км.

Таблица 2. Вычисленные ковариации

Расстояние, км	$C_1(\Delta)_X, \text{ м}^2$	$C_1(\Delta)_Y, \text{ м}^2$	$C_1(\Delta)_Z, \text{ м}^2$
3	0,159895625	0,188300946	0,036451794
6	0,119047424	0,180112742	0,02446291
9	0,081104722	0,178527223	0,022088633
12	0,078157412	0,177444468	0,019709624
15	0,072844243	0,158558663	0,015422519
18	0,062042435	0,155243039	0,012913824
21	0,060103419	0,143918186	0,011751016
24	0,056732114	0,143664873	0,011485696

Параметры преобразования координат

Как было сказано выше, для вычисления параметров преобразования в провинции Луанда были использованы два варианта. Соотношение между двумя системами WGS-84 и Кларка 1880 г. было установлено при помощи трех смещений и трех поворотов. В процессе вычисления для первого варианта матрица весов P была принята как единичная матрица, а матрица дисперсий и ковариаций была смоделирована на основании данных, как показано в табл. 2. В табл. 3 представлены шесть параметров преобразования для провинции Луанда, которые показывают, что неоднородность данных геодезической сети в г. Луанде оказывает влияние на точность определения параметров преобразования. При этом минимальное значение среднего квадратического определения угла поворота m_α может составлять величину в линейном размере порядка 0,032 м. Таким образом, погрешности определения параметров преобразования координат при удалении от исходного пункта Fortaleza, будут возрастать.

Исходя из этого, можно сделать следующий вывод: параметры преобразования координат, приведенные в табл. 3, могут быть использованы только в городе Луанде.

Таблица 3. Параметры преобразования координат

Первый вариант		Второй вариант	
параметры	средняя квадратическая ошибка	параметры	средняя квадратическая ошибка
$\Delta X = 134,760\text{м}$	$\pm 0,265\text{м}$	$\Delta X = 132,513\text{м}$	$\pm 0,105\text{м}$
$\Delta Y = 42,735\text{м}$	$\pm 0,377\text{м}$	$\Delta Y = 42,740\text{м}$	$\pm 0,108\text{м}$
$\Delta Z = 231,534\text{м}$	$\pm 0,357\text{м}$	$\Delta Z = 229,208\text{м}$	$\pm 0,118\text{м}$
$\alpha'' = -4,118$	$\pm 0,001''$	$\alpha'' = -6,258$	$\pm 0,001''$
$\beta'' = -0,976$	$\pm 0,002''$	$\beta'' = -1,686$	$\pm 0,002''$
$\gamma'' = -9,471$	$\pm 0,010''$	$\gamma'' = -8,358$	$\pm 0,005''$

По окончанию процесса вычисления параметров преобразования по методу наименьших квадратов можно вывести некоторые гипотезы, подтверждаемые классическим распределением, например, критерием χ^2 для дисперсии.

Распределение χ^2 дает возможность оценить степень согласованности теоретического и статистического распределений. Для распределения χ^2 составлены специальные таблицы.

При анализе результатов уравнивания используется глобальный тест, основанный на распределении χ^2 :

$$\chi_{\text{выч}}^2 = \frac{v\sigma_0^2(\text{постериори})}{\sigma_0^2(\text{априори})} = \frac{V^T P V}{\sigma_0^2}. \quad (17)$$

Тест часто используется на практике и для его применения сформулированы две гипотезы: H_0 – нулевая гипотеза $\sigma_0^2(\text{априори}) = \sigma_0^2(\text{постериори})$; H_1 – альтернативная гипотеза $\sigma_0^2(\text{априори}) < \sigma_0^2(\text{постериори})$.

Нулевая гипотеза H_0 принимается, если:

$$\chi_{\text{выч}}^2 < \chi_{(v;1-\alpha)}^2,$$

где $\chi_{\text{выч}}^2$ – вычисленное распределение, основанное на формуле (17);

$\chi_{(v;1-\alpha)}^2$ – теоретическое распределение, основанное на распределении χ^2 ;

α – уровень значимости; σ_0^2 (априори) – априорная дисперсия; σ_0^2 (постериори) – апостериорная дисперсия.

Статистический анализ для оценки качества вычисленных параметров был выполнен при помощи глобального теста, основанного на распределении χ^2 . Были использованы: уровень значимости 5%, и степень свободы $v = 3n - 6 = 51$, где n – количество наблюдаемых пунктов. В табл. 4 показаны данные статистического анализа вычислений, представленных в табл. 3.

Таблица 4. Данные статистического анализа, выполненного при помощи глобального теста

Параметр	1 вариант	2 вариант
$V^T P V$	2,099	2,087
v	51	51
$\sigma_0^2(\text{постериори})$	0,041	0,039
$\chi_{\text{выч}}^2$	2,099	2,087
$\chi_{(51;0,95)}^2$	34,764	34,764

По данным, приведенным в табл. 4, можно заключить, что нулевая гипотеза H_0 принимается при уровне значимости 5%, так как величина $\chi_{выч.}^2 < \chi_{(51;0,95)}^2$.

Так же было вычислено σ_0^2 (постериори) при помощи уравнения:

$$\sigma_0^2(\text{постериори}) = \frac{V^T P V}{v}.$$

Из анализа табл. 3, как было сказано выше, имеются два различных способа вычисления параметров преобразования.

Критерием, принятым для выбора параметров преобразования, было использование так называемых контрольных пунктов. Контрольными пунктами являются пункты, не вошедшие в процесс вычисления параметров преобразования ни в первом, ни во втором варианте. Параллельно с работой автора диссертации, эти пункты были определены Институтом геодезии и картографии Анголы (IGCA).

Сравнение двух примененных способов может быть проведено на основании анализа разности координат контрольных пунктов по следующей формуле:

$$\begin{bmatrix} \Delta X, \text{ м} \\ \Delta Y, \text{ м} \\ \Delta Z, \text{ м} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_{\text{вариант}} - X_{\text{контроль}} \\ Y_{\text{вариант}} - Y_{\text{контроль}} \\ Z_{\text{вариант}} - Z_{\text{контроль}} \end{bmatrix},$$

где указание «вариант» относится к координатам, определенным при помощи первого или второго варианта, а указание «контроль» относится к прямоугольным пространственным координатам контрольных пунктов.

Рисунки 3-5 показывают результаты, полученные при вычислении разности между координатами, определенными при помощи первого и второго варианта, и известными координатами контрольных пунктов.

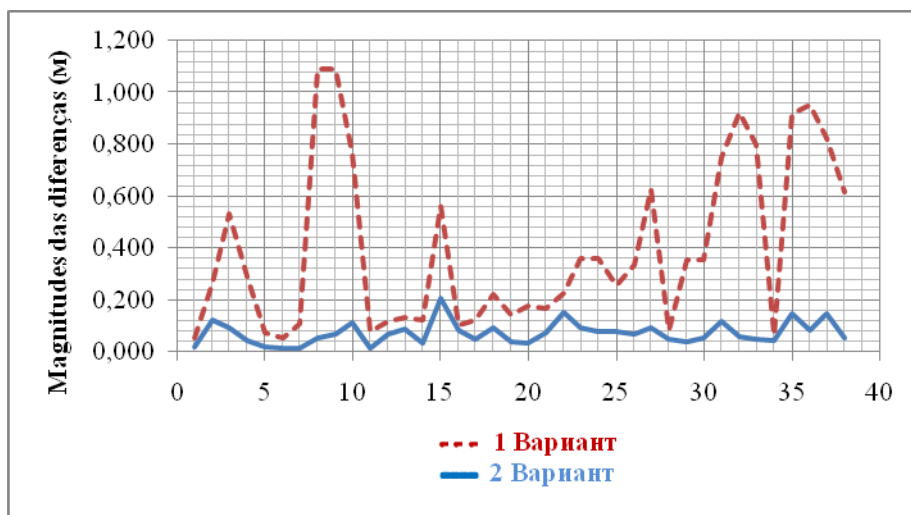


Рисунок 3. Разность ΔX для первого и второго вариантов

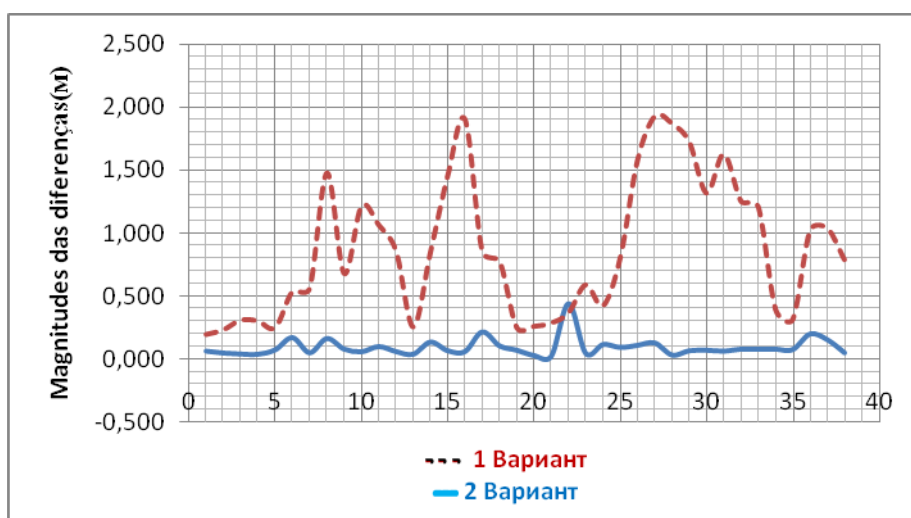


Рисунок 4. Разность ΔY для первого и второго вариантов

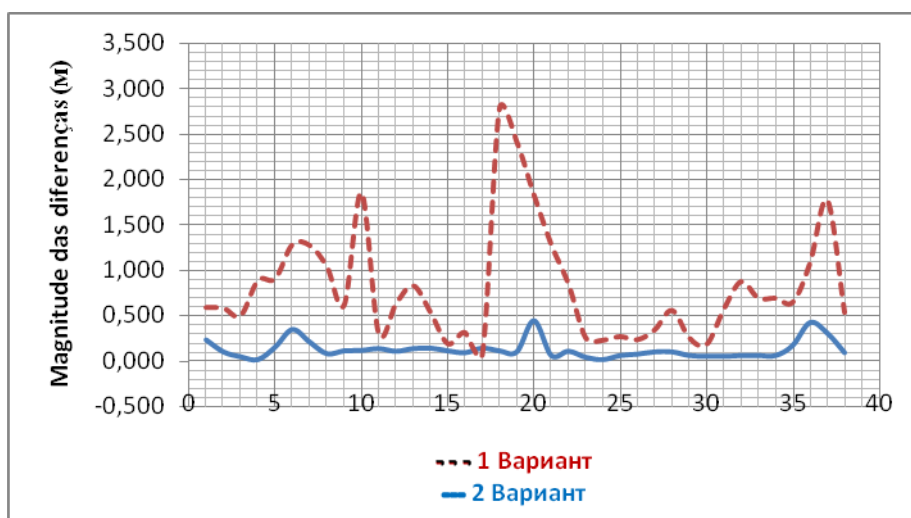


Рисунок 5. Разность ΔZ для первого и второго вариантов

Проведя анализ рисунков 3-5, можно заключить, что разности, получен-

ные для второго варианта меньше, чем для первого, т. е. координаты, полученные при применении второго варианта, более приближены к координатам контрольных пунктов.

Можно сделать вывод, что параметры преобразования, которые будут применяться в провинции Луанда, это параметры, определенные при помощи второго варианта, так как в данном случае результаты показывают наибольшее приближение к контрольным величинам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе исследований, проведенных в настоящей диссертационной работе, можно сделать обобщенный вывод о том, что представленный материал охватывает комплекс вопросов, относящихся к разработке методики модернизации плановой геодезической сети г. Луанда. В основу разработанной методики положены современные возможности определения пространственных прямоугольных координат геодезической сети г. Луанда с применением глобальных спутниковых навигационных систем. При этом в процессе реализации упомянутого комплекса решены следующие задачи.

1. Изучена вся территория Анголы в физико-географическом и геодезическом отношениях.

2. Проанализированы ранее выполненные геодезические и картографические работы.

3. На основании предварительной оценки точности доказано, что существующая на сегодняшний день плановая геодезическая сеть города Луанды по точности и по плотности не соответствует современным требованиям.

4. Исследована привязка пункта ВОГС (FORT и CAM) к опорным пунктам международной сети WGS, IGS. Предрасчет точности выполнен методом математического моделирования. Точность определения средних значений координат исходного пункта Fortaleza (FORT):

$$m_x = 0,025 \text{ м}; m_y = 0,042 \text{ м}; m_z = 0,027 \text{ м}.$$

5. В Луанде создана городская сеть, основанная на использовании современной техники наблюдений спутников GNSS.

6. Выполнено уравнивание спутниковой геодезической сети (СГС) в городе Луанде.

7. Точностные исследования обработки результатов спутниковых измерений при модернизации геодезической сети провинции Луанда показали, что в целом городская сеть Луанды может служить как сеть первого порядка опорной государственной геодезической сети Анголы.

8. Созданная при участии автора координатная основа обеспечивает эффективное применение спутниковых систем в Луанде при решении координатных задач широким кругом пользователей.

9. Показано, что если использовать при уравнивании полную корреляционную матрицу, то точность определения плановых координат в провинции Луанда улучшится в среднем в 1,5 раза.

10. Обоснован выбор метода преобразования координат в городе Луанде.

11. Исследованы два способа определения параметров связи систем координат ГГС города Луанды с общеземной системой координат. В результате исследования показано, что при использовании второго способа точность определения параметров преобразования координат повысится почти в 2 раза.

Отсюда сделан вывод, что параметры преобразования координат, которые будут применяться в провинции Луанда, это параметры, определенные при помощи второго варианта:

$$\Delta X = 132,513 \text{ м}; \Delta Y = 42,740 \text{ м}; \Delta Z = 229,208 \text{ м}; \alpha'' = -6,258;$$
$$\beta'' = -1,686; \gamma'' = -8,358.$$

Данная диссертационная работа посвящена решению вопросов совершенствования методов повышения точности определения параметров преобразования координат в городе Луанде. Для достижения этой цели при преобразовании координат в Луанде использован ортогональный метод. Определение и использование масштабного коэффициента в Луанде приведет к неизбежному снижению точности результатов спутниковых измерений.

Из-за неоднородности данных существующей плановой геодезической сети города Луанды разработан алгоритм, который определяет фактическую допустимую величину средней квадратической ошибки преобразованных координат по точности вычисления параметров преобразования координат. Этот алгоритм позволяет контролировать точность, с которой были вычислены параметры преобразования координат.

Представленные в диссертации результаты модернизации городской геодезической сети Луанды подтверждают высокую эффективность применения GNSS-методов в развитии и создании надежных опорных геодезических сетей.

Настоящий проект модернизации геодезической сети провинции Луанды с применением глобальных спутниковых навигационных систем может послужить моделью для других провинций в Республике Ангола.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Тейшейра де Карвальо Аитонио Алвеш. Основные направления современной модернизации геодезической сети Анголы. // "Известия ВУЗов Геодезия и аэрофотосъёмка" 2011. – N 5. – С. 31-33.
2. Тейшейра де Карвальо Аитонио Алвеш. Модернизация плановой геодезической сети в городе Луанда с использованием современных спутниковых технологий. Международная конференция Организации Объединенных Наций ЮНЕСКО по стабильному развитию в Анголе, факультет естественных наук, Луанда, 2008.
3. Тейшейра де Карвальо Аитонио Алвеш. Параметры преобразования в городе Луанде. Факультет естественных наук, Луанда, 2011.