

*На правах рукописи*

**ЧАН Тхань Шон**



**СОЗДАНИЕ ОПОРНОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ  
ПРИ ИЗЫСКАНИЯХ И СТРОИТЕЛЬСТВЕ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СПУТНИКОВОЙ ТЕХНОЛОГИИ  
ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОПОЦЕНТРИЧЕСКИХ КООРДИНАТ**

*Специальность 25.00.32 - Геодезия*

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

**Санкт-Петербург – 2020**

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет».

*Научный руководитель* –  
доктор технических наук

*Мустафин Мурат Газизович*

*Официальные оппоненты:*

*Мазуров Борис Тимофеевич*  
доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра космической и физической геодезии, профессор.

*Никитчин Андрей Андреевич*  
кандидат технических наук, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I», кафедра инженерной геодезии, доцент.

*Ведущая организация* – федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Защита диссертации состоится 21 апреля 2020 г. в 14 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета ГУ 212.224.08 Горного университета по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Горного университета и на сайте [www.spmi.ru](http://www.spmi.ru).

Автореферат разослан 21 февраля 2020 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



КУЗИН  
Антон Александрович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Создание геодезической основы – одна из главных задач при изысканиях и строительстве, определяющая качество выполняемых инженерных работ. Сегодня глобальные навигационные спутниковые системы (далее ГНСС) широко применяются для создания геодезических сетей различного назначения, обеспечивая повышение точности измерений. Вместе с тем, практическое делопроизводство связано с плоскими системами прямоугольных координат. Их применение удобно при выполнении инженерных задач и связано с переводом координат из геоцентрической системы на некую проекцию. Традиционный подход создания геодезической основы в России связан с использованием плоских прямоугольных координат, определяемых в проекции Гаусса-Крюгера. Налаженный алгоритм перевода координат пунктов государственной геодезической сети (ГГС) в проекцию Гаусса-Крюгера обеспечивает создание геодезической основы для строительства. Однако возможность существенного уточнения координат геодезических сетей сгущения на основе применения ГНСС-технологии и автоматизированного выбора оптимальной плоской проекции координат делают весьма перспективным рассмотрение вопроса об использовании проекций, альтернативных проекции Гаусса-Крюгера. Кроме того, известно, что точность перевода геоцентрических координат в систему плоских зональных координат существенно уменьшается с удалением от осевого меридиана зоны. Сегодня исследования в этом направлении определяют тенденцию развития методов построения 2D поверхностей на основе данных ГНСС измерений. Особенно такой подход эффективен для стран, где недостаточно развита или отсутствует государственная геодезическая сеть. Во Вьетнаме остро стоит вопрос как о развитии (сгущении) ГГС для обеспечения строительства городов и поселков, так и какую плоскую систему координат использовать. Тема построения различных плоских проекций на основе данных спутниковых технологий отражается во многих научных публикациях.

Проработкой вопросов по созданию геодезических сетей на основе спутниковых технологий занимались такие известные ученые, как Антонович К.М., Баландин В.Н., Балбеков А. А., Бойко Е.Г., Брынъ

М.Я., Виноградов А. В., Воронин Е.Г., Герасименко М.Д., Зарзура Ф.Х., Ключин Е. Б., Мазуров Б.Т., Маркузе Ю.И., Огородова Л. В., Резникова И. Б., Юзефович А. П. и др. Во многом благодаря результатам работ этих исследователей созданы по данным спутниковых определений опорные геодезические сети (ОГС) для изысканий и строительства. ГНСС технологии позволили реконструировать и повысить точность городских геодезических сетей. Оказалось также, что применение спутниковых технологий эффективно не только при создании высокоточных ГГС (СГС-1, СГС-2), но и для ОГС в строительстве.

В диссертации предлагается использовать данные спутниковых определений для вычисления плановых координат для топоцентрической поверхности. Преимущества можно получить в определенных зонах и условиях, а возможность сравнения при переводе координат в проекцию Гаусса-Крюгера покажет эффективность способа и позволит контролировать конечные результаты. В работе приведено обоснование методики использования топоцентрических координат для разных геодезических задач при изыскании и строительстве.

**Цель работы.** Повышение точности и оперативности геодезических работ в строительстве за счет использования спутниковой технологии позиционирования и преобразования координат на топоцентрическую поверхность.

**Идея работы** состоит в возможности создания геодезической основы для строительства в проекции геоцентрических координат на топоцентрическую плоскость, определением нормальных высот на основе построения локальной модели поверхности квазигеоида с оценкой точности основных разбивочных работ.

**Основные задачи исследования:**

1. Анализ методов перевода геоцентрических координат на различные проекции, в том числе на топоцентрическую поверхность.
2. Математическое моделирование геодезических опорных сетей с целью оптимизации по точности расположения ее пунктов.
3. Разработать методику расчета нормальных высот пунктов по данным спутниковых определений.
4. Проверка разработанной методики построения опорной сети на объектах Вьетнама.

**Методология и методы исследований.** При исследованиях используются методы и способы теории математической обработки геодезических измерений, математической статистики и моделирования геодезических сетей, методы аналитической геометрии на плоскости и в пространстве.

**Научная новизна работы** исследования заключается в следующем:

- зависимости отклонений топоцентрических координат от геоцентрических и сравнение их с зональными координатами в проекции Гаусса-Крюгера;

- методика ориентирования топоцентрической поверхности по нормали к отвесной линии с оценкой искажений координатного положения точек в зависимости от расстояния до точки касания поверхностей;

- методика передачи отметок на монтажные горизонты с использованием локальной топоцентрической плоскости.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. При изысканиях и строительстве геодезические сети, как правило, создают с использованием спутниковой технологии, при этом опорную сеть следует проецировать на топоцентрическую плоскость, что дает преимущество по точности и в плане, и по отметкам относительно проекции Гаусса-Крюгера, величина которого зависит от расположения участка строительства относительно осевого меридиана зоны.

2. Ориентирование топоцентрической плоскости целесообразно выполнять по нормали к отвесной линии, определение которой с требуемой точностью можно вычислять с учетом аномалий высот и вращением эллипсоида.

3. Использование топоцентрических координат позволяет уменьшить погрешности проецирования длин линий геодезических сетей на участках до 20 км более чем двукратно относительно проекции Гаусса-Крюгера.

**Теоретическая и практическая значимость работы**  
Предложен актуальный подход к формированию геодезической основы при изысканиях и строительстве, заключающийся в применении локальной плоской поверхности с топоцентрическими координатами. Опорная геодезическая сеть, созданная в топоцентрических координатах, имеет минимальные искажения

относительно геоцентрических координат, в которых сегодня выполняются львиная доля геодезических работ. Разработана инженерная методика построения опорных геодезических сетей. Практически важным является то обстоятельство, что применение топоцентрических координат и разработанного алгоритма автоматизации расчета, позволяют при проектировании и строительстве различных объектов ориентировать локальную плоскую поверхность нормально отвесной линии и делать перевычисления относительно других картографических проекций. Результаты и выводы диссертации могут быть использованы в учебных программах для студентов геодезических направлений, научных и проектных организациях геодезического профиля. В Санкт-Петербурге результаты исследований будут использованы в ООО «БЕНТА», ООО «Экоскан» и др. Широкое применение планируется во Вьетнаме в проектных и геодезических организациях при строительстве разных объектов.

**Достоверность и обоснованность научных положений и рекомендаций** обеспечивались корректной постановкой исследовательских задач, тщательным планированием эксперимента, использованием соответствующего целям и задачам исследования математического аппарата, применением аттестованных измерительных средств, апробированных методик измерения и обработки данных, оценкой точности измерений. Результаты исследований согласуются с выводами, полученными разными исследователями, независимо от разработок автора.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на международных, всероссийских и региональных конференциях, в том числе: в Горном университете на XIII Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии при недропользовании», секция «Инновационные технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре» (2017 г.), в СПбГУ на Международной научно-практической конференции «Геодезия, картография, геоинформатика и кадастры. От идеи до внедрения» (2017 г.) и на Большом географическом фестивале (2019г).

**Личный вклад автора** заключается в выборе темы работы, цели, задач исследования, поиске и анализе информации необходимой для проведения исследований. Результатом самостоятельного исследования соискателя являются разработанные и исследованные

методы, теоретические и практические рекомендации, выявленные зависимости.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 12 статей, из них 6 статей в изданиях, включенных в перечень ВАК, 2 в изданиях, индексируемых международной базой данных SCOPUS и Web of Science.

### **Реализация результатов работы**

Теоретические выводы и практические рекомендации работы целесообразно использовать в геодезических организациях и в учебном процессе при обучении студентов геодезических направлений, в том числе в Горном университете, внедрение результатов работы предполагается в геодезических фирмах Вьетнама и России.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений, изложенных на 162 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 60 рисунков, 42 таблицы, список литературы из 108 российских и зарубежных наименований.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** приведены предпосылки к выполнению данной работы. Дано общее описание актуальности темы исследований и подходов к решению поставленных задач

**В первой главе** диссертации приведено обоснование актуальности работы, подкрепляемая работами различных специалистов по теме исследований, а также разработкой достаточных предпосылок для их совершенствования. Сформулированы цель, идея диссертационной работы и задачи исследований.

**Во второй главе** приведена разработка методики перевода координат из геоцентрической системы на топоцентрическую плоскость по данным ГНСС-измерений. Определены особенности ориентирования топоцентрической поверхности с учетом уклонов отвесной линии. Показаны отклонения топоцентрических координат от геоцентрических для разных размеров и участков земной поверхности. Дано их сравнение с координатами, полученными при использовании зональной системы плоских прямоугольных координат Гаусса–Крюгера.

**В третьей главе** разработана методика применения топоцентрических координат при инженерно-геодезических изысканиях и строительстве. Рассмотрены практические приложения.

**В четвертой главе** на объектах Вьетнама приведено описание применения разработанной методики использования топоцентрических координат.

**В заключении** изложены основные результаты и выводы, полученные в результате исследований.

Главные результаты диссертационного исследования отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. При изысканиях и строительстве геодезические сети, как правило, создают с использованием спутниковой технологии, при этом опорную сеть следует проецировать на топоцентрическую плоскость, что дает преимущество по точности и в плане, и по отметкам относительно проекции Гаусса-Крюгера, величина которого зависит от расположения участка строительства относительно осевого меридиана зоны.**

Известно, что точность положения пунктов геодезической сети, отстоящих существенно от осевого меридиана, значительно уменьшается в проекции UTM (или Гаусса-Крюгера) относительно геоцентрических координат. Кроме того, определение координат в смежных областях зон довольно трудоемко. Эти проблемные вопросы во многом снимаются с применением ГНСС технологии измерений и, в частности, при использовании топоцентрических координат по нижеприведенному алгоритму. Локальная топоцентрическая система координат получается переносом начала геоцентрической системы к точке  $O_1$ , находящейся на земной поверхности (см. рисунок 1). В топоцентрической системе координат оси будут параллельны соответствующим осям геоцентрической системы координат. При этом  $O_1$  – начало системы координат. Строим по правилу левой руки: ось  $O_z$  совпадает с нормалью, проходящей через  $O_1$  (зенитное направление). Ось  $O_x$  направляется по осевому меридиану (направление на север). Ось  $O_y$  перпендикулярна осям  $O_x$  и  $O_z$ . Таким образом, топоцентрическая система координат ориентируется поэтапного, путем вращения и перемещения геоцентрической системы координат, определяемых по ГНСС-технологии.

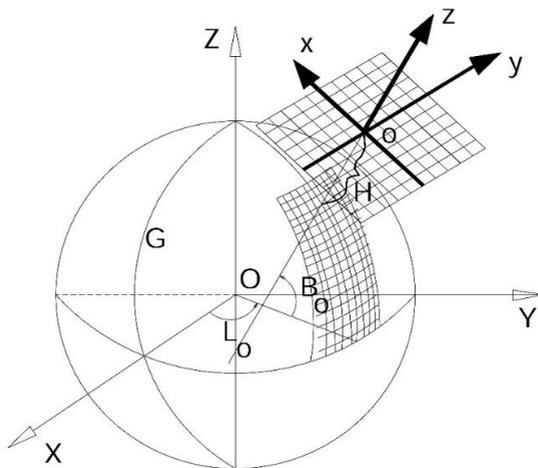


Рисунок 1 – Топоцентрическая система координат

Преобразование из геоцентрической системы координат в локальную топоцентрическую систему представлено следующими выражениями:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где  $(x \ y \ z)^T$  – координаты в топоцентрической системе;  $(X \ Y \ Z)^T$  – координаты в геоцентрической системе;  $(X_0 \ Y_0 \ Z_0)^T$  – координаты в геоцентрической системе пункта референции сети;  $B_0, L_0$  – геодезические координаты пункта референции сети;  $R$  – матрица преобразования (разворота)

$$R^T = \begin{bmatrix} -\sin B_0 \cos L_0 & -\sin B_0 \sin L_0 & \cos B_0 \\ -\sin L_0 & \cos L_0 & 0 \\ \cos B_0 \cos L_0 & \cos B_0 \sin L_0 & \sin B_0 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Из соотношения (1) можем вычислить поправки (коэффициенты)  $\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$  для перехода от геоцентрической системы к топоцентрической системе:

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \end{bmatrix} = R^T \begin{bmatrix} \Delta X \\ \Delta Y \\ \Delta Z \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Выразим ковариационную матрицу  $M'$  в локальной топоцентрической системе в следующем виде:

$$M' = R^T M R, \quad (4)$$

где  $M$  – ковариационная матрица в геоцентрической прямоугольной системе.

$$M = \begin{bmatrix} V(X_i X_j) & COV(X_i Y_j) & COV(X_i Z_j) \\ COV(Y_i X_j) & V(Y_i Y_j) & COV(Y_i Z_j) \\ COV(Z_i X_j) & COV(Z_i Y_j) & V(Z_i Z_j) \end{bmatrix} \quad (5)$$

Далее необходимо уравниваем определить ошибки замыкания.

В локальной топоцентрической системе уравнивание ГНСС-сетей выполняется следующим образом:

составим уравнения ошибок.

$$\begin{aligned} v_{\Delta X_{ij}} &= -dx_i + dx_j + (x_j^0 - x_i^0 - \Delta x_{ij}) \\ v_{\Delta Y_{ij}} &= -dy_i + dy_j + (y_j^0 - y_i^0 - \Delta y_{ij}), \\ v_{\Delta Z_{ij}} &= -dz_i + dz_j + (z_j^0 - z_i^0 - \Delta z_{ij}) \end{aligned} \quad (6)$$

где:  $v_{\Delta X}$ ,  $v_{\Delta Y}$ ,  $v_{\Delta Z}$  – поправки параметров координат;  $dx$ ,  $dy$ ,  $dz$  – поправки определённых координат;  $x^0$ ,  $y^0$ ,  $z^0$  – приближённые значения координат.

Таким образом, имеется  $3n$  уравнений типа (6) ( $n$  – количество базовых линий), содержащих  $3m$  неизвестных ( $m$  – количество определенных точек).

Уравнивание ГНСС-сетей выполняется с точки, совпадающей с началом локальной топоцентрической системы.

Систему уравнений (6) представим в матричной форме:

$$V = A X + L. \quad (7)$$

Перейдем по методу наименьших квадратов к нормальному виду уравнений:

$$N X + b = 0 \quad (8)$$

$$N = A^T P A \quad (9)$$

$$b = A^T P L \quad (10)$$

$$P = \begin{bmatrix} P_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & P_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & P_n \end{bmatrix} \quad (11)$$

где  $P$  – блочная матрица по диагонали;  $P_i$  – обратная матрица ковариационной матрицы  $M_i'(3 \times 3)$ :

$$P_i = M_i'^{-1} \quad (12)$$

Решая системы нормальных уравнений, получаем:

$$X = -N^{-1}b \quad (13)$$

*Оценки точности:*

Средняя квадратичная ошибка единицы веса:

$$\mu = \sqrt{\frac{V^T PV}{3n - 3m}} \quad (14)$$

Средняя квадратичная ошибка положения пункта

$$m_{Pi} = \mu \sqrt{Q_{XX}^i + Q_{YY}^i + Q_{ZZ}^i} \quad (15)$$

(где  $Q_{xx}^i$ ,  $Q_{yy}^i$ ,  $Q_{zz}^i$  - диагональные элементы матрицы  $Q = N^{-1}$  в соответствующей точке  $i$ )

Средняя квадратичная ошибка функции весов:

$$m_F = \mu \sqrt{Q_{FF}}; Q_{FF} = F^T Q F \quad (16)$$

Приведенные выкладки позволяют выполнить построение плоскости в топоцентрической системе координат и выбрать размеры плоскости, используя которую будут соблюдены требованиям по точности измерений для строительства.

В приложении приведены схема геодезической сети (см. рисунок П1) и таблицы с координатами точек, полученными по ГНСС технологии. При использовании вышеописанного алгоритма показано отличие использования топоцентрических координат и традиционной проекции Гаусса-Крюгера (табл. П1). Сравнение длин линий показывает, что применение топоцентрических координат существенно более приближено к истинным (измеренным) величинам.

При строительстве различных непротяженных объектов весьма перспективно использовать вместе с технологией спутниковых определений топоцентрическую систему координат, плоскость которой перпендикулярна нормали референц-эллипсоида. При этом плоскость строительной площадки можно ориентировать перпендикулярно направлению отвесной линии.

При строительстве высотных зданий передача осей сооружения с исходного горизонта на монтажные, как правило, выполняется методом сегментационного вертикального проектирования с

использованием ГНСС-технологии (см. рисунок П2).

Сравнение точности передачи отметки на монтажные горизонты при помощи традиционного метода и предлагаемого способа с использованием ГНСС-технологии измерений. Из диаграммы (рисунок П3) видно, что до высот 200 м геометрический (наземный) метод позволяет точнее передавать отметки на монтажные горизонты. В то же время применение ГНСС-технологии дает примерно одну точность. На численных примерах показано, что точность определения отметок по ГНСС-технологии практически не зависит от высоты здания. Это особенно важно при строительстве высотных сооружений.

## **2. Ориентирование топоцентрической плоскости целесообразно выполнять по нормали к отвесной линии, определение которой с требуемой точностью можно вычислять с учетом аномалий высот и вращением эллипсоида.**

Сотношение между геодезической  $H$  и нормальной  $h$  высотой определяют по аномалии высоты  $\zeta$  в точке измерения:

$$h = H - \zeta. \quad (17)$$

Если известна  $\zeta$ , то  $h$  можно найти с помощью технологии ГНСС. Автор предлагает методику решения, основанную на основе учёта уклонов отвесных линий и вращения эллипсоида. При этом аномалию высоты определяют в два этапа: вычисляют разность высот геодезической и нормальной для точки на земной поверхности; находят поправку за уклонение отвесной линии в целях приведения результатов к нормали к геоиду. Данную поправку определяют посредством смещения эллипсоида до совмещения с отвесной линией. В предлагаемом способе используют координаты точек, полученные по технологии ГНСС, не менее трёх из этих точек имеют нормальные высоты, найденные с помощью геометрического нивелирования.

Нормальная высота выбранной произвольной точки  $P_0$  в районе предполагаемого строительства может быть выражена с использованием поверхности проекции на вспомогательный эллипсоид  $\Delta h$ . Тогда нормальную высоту точки  $P_0$  можно определить как разность высоты  $h_0$  точки  $P_0$  и поверхности этой проекции, т. е.  $h_0 - \Delta h$ ; геодезические координаты  $P_0$  ( $B_0, L_0, H_0$ ). Преобразование высоты

$H_0$  в  $h_0 - \Delta h$  гарантирует постоянство направления нормали к эллипсоиду (см. рисунок 2).

Параметры вспомогательного эллипсоида вычисляем следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} a_1 &= a + \frac{2 - e^2 \sin^2 B_0}{2\sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_0}} (H_0 - h_0 + \Delta h) \\ e_1^2 &= e^2 - \frac{e^2 \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_0}}{a} (H_0 - h_0 + \Delta h) \end{aligned} \right\}, \quad (18)$$

где  $a_1$  и  $e_1^2$  – соответственно большая полуось и первый эксцентриситет вспомогательного эллипсоида;  $a$  и  $e^2$  – соответственно большая полуось и первый эксцентриситет эллипсоида (WGS-84).

Определение уклонения отвесных линий ( $\varepsilon_\eta$ ,  $\varepsilon_\xi$ ) вычисляются из выражения:

$$\begin{aligned} dH_J &= \left[ e_1^2 \cos B_J \sin B_0 \sin(L_J - L_0) (N_0 \sin B_0 - N_J \sin B_J) - (N_0 + H_0) \cos B_J \sin(L_J - L_0) \right] \varepsilon_\eta \\ &+ \left[ e_1^2 \cos B_J \sin(L_J - L_0) (N_0 \sin B_0 - N_J \sin B_J) \right. \\ &\left. + (N_0 + H_0) (\sin B_J \cos B_0 - \sin B_0 \cos B_J \cos(L_J - L_0)) \right] \varepsilon_\xi = F_\eta \varepsilon_\eta + F_\xi \varepsilon_\xi \end{aligned} \quad (19)$$

где  $dH_J$  – приращение геодезической высоты между  $P_j$  и  $P_0$  (дифференциал  $H$ );  $B_0$ ,  $L_0$ ,  $H_0$  – геодезические координаты пункта  $P_0$  (центральная точка строительства);  $B_J$ ,  $L_J$ ,  $H_J$  – геодезические координаты пункта  $P_j$ ;  $N_0 = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_0}$ ;  $N_J = a / \sqrt{1 - e^2 \sin^2 B_J}$ ;

$$F_\eta = e_1^2 \cos B_J \sin B_0 \sin(L_J - L_0) (N_0 \sin B_0 - N_J \sin B_J) - (N_0 + H_0) \cos B_J \sin(L_J - L_0);$$

$$F_\xi = e_1^2 \cos B_J \sin(L_J - L_0) (N_0 \sin B_0 - N_J \sin B_J) + (N_0 + H_0) (\sin B_J \cos B_0 - \sin B_0 \cos B_J \cos(L_J - L_0));$$

В точке  $P$ , где  $B_J = B_0$ , по формуле (19)  $dh = 0$ , соответственно  $dB = 0$ ,  $dL = 0$ . Подчеркнем, после вращения эллипсоида, координаты точки  $P$  не изменяются.

После выполнения расчетов нормальная точка  $P_0$  совпала с  $P$ , но центр эллипса сместился. Образовался угол между плоскостью проекции (нормали) и плоскостью смещенного эллипсоида. Фактически этот угол соответствует углу уклонения отвесной линии. Определение уклонения отвеса можно выполнить, например, по данным геометрического нивелирования, ГНСС измерений совместно с геометрическим нивелированием, гравиметрическими способами. Эти подходы могут быть весьма затратными.

В диссертации предлагается использовать лишь небольшое количество точек геометрического нивелирования, которые входят в сеть точек, координаты которых определены по ГНСС-технологии. Далее по (19) определяются отклонения отвеса  $\varepsilon_\eta, \varepsilon_\xi$ .

Если предположить, что точка  $P_j$  принадлежит плоскости  $h_j$  (значит  $h_j$  нормальная высота точки  $P_j$ ), то можно определить отклонение вспомогательной плоскости эллипсоида от плоскости проекции по формуле:

$$l_j = H_j - h_j - \Delta h . \quad (20)$$

После совмещения плоскостей, геодезическая высота изменится на  $dH$ , а поправку можно вычислить из выражения:

$$v_j = dH_j + H_j - h_j - \Delta h . \quad (21)$$

Подставляя выражение (19) в (21) получаем:

$$v_j = a_j \cdot \Delta . \quad (22)$$

где  $a_j = (F_\eta, F_\xi)$ ,  $\Delta = (\varepsilon_\eta, \varepsilon_\xi)^T$

По методу наименьших квадратов вычисляем уклонение отвесной линии ( $\Delta$ ):

$$\Delta = A^T A^{-1} A^T L . \quad (23)$$

**3. Использование топоцентрических координат позволяет уменьшить погрешности проецирования длин линий геодезических сетей на участках до 20 км более чем двукратно относительно проекции Гаусса-Крюгера.**

Одним из основных требований при создании опорной геодезической сети для строительства и в целом при измерениях является обеспечение единства измерений. Применительно к созданию опорной геодезической сети (геодезической разбивочной основы – ГРО), она должна обеспечивать минимальные искажения длин линий относительно вычисленных по ГНСС технологии, т.е. необходимо выбрать соответствующее решение для преобразования координат из геоцентрической системы в местную систему координат.

В настоящее время во Вьетнаме выполняется довольно много работ по строительству протяженных объектов в сотни километров, например шоссе Ниньбинь–Тхань-хоа, Ханой – Лаокай. Представляет

интерес тестирования метода преобразования координат WGS-84 в местную локальную систему координат, представляющую собой топоцентрическую систему координат.

Как показано в положении 2, предлагается методика создания топоцентрической поверхности с учётом уклонения отвесной линии при вращении и перемещении эллипсоида. При использовании традиционного подхода пространственные координаты  $(X_i', Y_i', Z_i')$  переводим в геодезические  $(B_i', L_i', H_i')$ , а затем в местную систему координат на плоскости  $(x_i, y_i)$  с использованием соответствующей зоны, осевого меридиана и проекции UTM – VN2000 (Вьетнам). Применение показанных алгоритмов обеспечит принцип единства измерений и соответственно их совместимость и позволит определить степень искажений длин линий в ГРО и выбрать наиболее приемлемый вариант ее создания.

Для проверки точности метода расчета координат ГНСС-точек по предлагаемому алгоритму преобразования был проведен расчет ГНСС-сети для строительства промышленной зоны Йен-фонг (Бакнинь - Вьетнам). Длина промзоны около 7 км. Мы использовали 9 ГНСС-точек от *УРЗ* до *IVYP-1* (см. рисунок 3).

ГНСС определения пунктов выполнено приемником *Trimble-R3*. При обработке результатов измерений использовалась система координат *VN-2000* с осевым меридианом на долготу  $105^{\circ} 30'$ .

Выполнены расчеты по преобразованию координат двумя способами перевода на топоцентрическую систему координат: простой перевод на топоцентрическую поверхность и перевод с учетом уклонения отвеса. Точку *IV-16* выбрали в качестве исходной ( $P_0$ ).

Результаты измерений линий геодезического хода по данным спутниковых определений и переводе на плоские поверхности, включая перевод в систему координат *VN-2000*, ( $L_0 = 105^{\circ} 30'$ , UTM-зона 3°,  $m_0 = 0,9999$ ) сравнивались с результатами измерений электронным тахеометром *TC303* (Leica). Результаты преобразования координат по двум направлениям (на проекцию UTM и топоцентрическую плоскость) приведены в таблице 1.

Вычисленное отклонение отвеса:  $\varepsilon_{\eta} = -3,401''$ ;  $\varepsilon_{\xi} = 2,685''$ .

Таблица 1 – Результаты расчетов длин линий

Наименование линий	Длины линий по результатам измерений электронным тахеометром ТС303, м	Длины линий по данным спутниковых определений, м					
		VN-2000 ( $L_0 = 105^{\circ}30'$ , UTM-зона 3°, $m_0 = 0,9999$ )		В топоцентрической системе координат		Преобразование на основе учёта уклонений отвесной линий	
		$S1$ , м	$\Delta S1$ , мм	$S2$ , м	$\Delta S2$ , мм	$S3$ , м	$\Delta S3$ , мм
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
УР3-УР4	371.597	371.580	17	371.601	-4	371.606	-9
УР4-УР5	167.266	167.260	6	167.267	-1	167.269	-3
УР5-УР6	529.745	529.711	34	529.738	7	529.749	-4
УР6-IV16	504.890	504.860	30	504.881	9	504.895	-5

Примечания:  $\Delta S2$  в графе (6) определяется из выражения  $\Delta S2(6) = (2)-(5)$ , где (2) – горизонтальные расстояния, измеренные тахеометром, (5) – расстояния в топоцентрической системе координат;  $\Delta S3(8) = (2)-(7)$ .

По результатам экспериментальных исследований с использованием так называемого ГНСС-хода при строительстве промышленной зоны Йен-Фонг можно сделать следующие выводы:

- длина линии, определённая путём перевода спутниковых определений на проекцию UTM (т. е. без преобразования на специальные поверхности (графа (3) табл. 1)) имеет наибольшие отклонения от линии, измеренной непосредственно электронным тахеометром ТС303 (тахеометр используется для проверки длины линии сети (графа (2) табл. 1);

- длины линий, полученные в результате перевода координат на топоцентрическую поверхность и преобразованные с учётом уклонений отвесной линии (графы (5), (7) табл. 1), схожи между собой и существенно ближе к эталонному значению (графа (2) табл. 1).

Таким образом, показано, что для линейных объектов использование топоцентрических координат весьма эффективно. Процесс преобразования координат имеет ясную логику и уменьшается количество промежуточных этапов. Метод

преобразования, основанный на учёте уклонений отвесной линии и вращения эллипсоида также имеет высокую точность, но все же расчет уклонения отвесной линии довольно сложен (необходимо иметь не менее трёх точек, на которых определены нормальные высоты способом геометрического нивелирования). При изысканиях и строительстве на объектах, для которых не требуется высокой точности нормальных высот, основной проблемой являются плановые координаты. Выше было показано, что когда высоты требуется определять по схеме нивелирования IV класса или технической точности, можно использовать метод расчета, приведенный выше.

Согласно результатам исследований во Вьетнаме, уклонение отвесной линии на территории Вьетнама может составлять 12,58" (при высоте местности 1200 м и более). При таких условиях строительства необходимо учитывать уклонение отвесной линии. Большая масса строительных работ во Вьетнаме распространена на высотах местности < 300 м (по сравнению с уровнем моря). Величина уклонений отвеса составляет 3"– 4". В пределах требуемого диапазона точности это значение часто игнорируется (не учитывается).

Для дальнейшей проверки возможности использования топоцентрической системы координат для линейных объектов (больших длин) выполнены расчеты на других объектах.

Геодезическая сеть создана в 2017 году в горной местности Тханьхоа (Вьетнам), высота местности около 200 м. Сеть является геодезической основой для строительства дороги общей протяженностью около 22 км. Дорога проходит вдоль реки «Ма» и представляет особую важность для социально-экономического развития горного региона.

Для проверки искажений длин линий геодезической сети использованы измерения некоторых линий электронным тахеометром, которые сравнивались с расчетными значениями, полученные в результате преобразования ГНСС-измерений, в том числе в топоцентрическую систему координат. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

В результате проведенных измерений и вычислений получается, что для строительства протяженных объектов плановые координаты и длины линий при использовании топоцентрической системы координат получают минимальные расхождения при переводе ГНСС измерений на плоские проекции.

Важно отметить, что при выборе начала системы координат можно использовать практически любые координаты, принадлежащие геодезической основе. В случае, если линии слишком длинные ( $> 22$  км, см. первую главу), некоторые линии сети должны быть проверены измерениями электронным тахеометром.

На конкретных примерах показано, что создании опорной геодезической сети при строительстве различных объектов, в том числе линейных большой протяженности (таких как автомобильные дороги, подземные тоннели, газопроводные работы и т.д.) по данным ГНСС-измерений, эффективно применение алгоритма преобразования геоцентрических координат в топоцентрические путем перемещения эллипсоида с учётом уклонений отвесной линий с последующим их уравниванием.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В диссертационной работе представлены результаты исследований на актуальную тему создания опорных геодезических сетей с использованием спутниковых технологий определения топоцентрических координат. Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Проведен анализ и сделан выбор в пользу использования топоцентрических координат в строительстве. Использование цилиндрических проекций (UTM или Гаусса-Крюгера) дает значительные ошибки при строительстве протяженных и крупных объектов (в особенности распространяющихся в широтном направлении).

2. Расстояния между точками при уравнивании ГНСС-сетей в локальной топоцентрической прямоугольной горизонтальной системе, можно сказать, не искажаются относительно поверхности эллипсоида (локальная плоскость с условным радиусом  $L$ , который составляет 11 км). Контрольные точки следует принимать такие, которые располагаются ближе к центру топоцентрической поверхности, где искажения весьма чувствительно отражаются на ее периферийные области.

3. Уравнивание ГНСС-сетей в локальной топоцентрической системе подобно тому, как это производится в плоской прямоугольной системе координат. Алгоритм уравнивания ГНСС-сетей легко программируется и может быть эффективно реализован

для разбивочных сетей с небольшими длинами сторон, которые используются при строительстве различных объектов. В частности, показаны алгоритмы использования интерполяционных формул, требующие определенного сочетания точек с известными нормальными высотами и промежуточных с геодезическими высотами; приведены выкладки для построения модели высот по локальному квазигеоиду, а также на основе учёта уклонений отвесных линий путем вращения эллипсоида.

4. При исследовании интерполяционных способов обосновано, что все четыре метода интерполяции дают приемлемые результаты. Так, около 80% тестовых линий имеют допустимую точность для нивелирования III класса, в том числе для горных местностей. Естественно, обеспечивается 100% точность для технического нивелирования. Показано, что на практике целесообразно использовать интерполяционный метод, основанный на среднем весе измерений.

5. Получены важные результаты, свидетельствующие не столько о возможности, сколько о целесообразности применения ГНСС технологии для вычисления и нормальных высот, а главное плановых координат. Использование топоцентрических координат позволяет уменьшить погрешности проецирования длин линий геодезических сетей на участках до 20 км более чем двукратно относительно проекции Гаусса-Крюгера.

6. Результаты исследований прошли проверку на конкретных объектах Вьетнама и показали высокую эффективность их использования.

7. Результаты диссертации обозначили перспективы дальнейших исследований, которые состоят в поиске решений по уточнению определения нормальных высот по данным спутниковых определений за счет разработок локальных моделей квазигеоида, а также и в целом применении лишь геоцентрических координат для непосредственной работы в трехмерных координатах.

### **Наиболее значимые публикации по теме диссертации:**

#### **В изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:**

1. *Мустафин, М. Г.* Методика определения нормальных высот по данным спутниковых определений с учётом уклонений отвесной

линии / М. Г. Мустафин, **Тхань Шон Чан** // Геодезия и картография. – 2018. – Т. 79. – № 7. – С. 2–10.

2. *Мустафин, М.Г.* Использование топоцентрической прямоугольной системы координат при решении инженерно-геодезических задач / М. Г. Мустафин, **Тхань Шон Чан** // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2018. – Т. 23. – № 3. – С. 61–73.

3. *Чан Тхань Шон* Анализ влияния кривизны Земли на результаты спутниковых и традиционных измерений в топоцентрической системе координат/ **Тхань Шон Чан**, А.А. Кузин //Маркшейдерский вестник. 2018. – № 6. – С. 38 – 43.

4. *Чан Тхань Шон* Алгоритм преобразования координат из геоцентрической системы в топоцентрическую и его применение в строительстве во Вьетнаме / **Тхань Шон Чан**, А.А. Кузин // Вестник Сибирского государственного университета геосистем и технологий. – 2019. – Т. 24. – № 1. – С. 59–71.

5. *Мустафин, М. Г.* Методика передачи отметок на монтажные горизонты с применением спутниковой технологии измерений/ М. Г. Мустафин, **Тхань Шон Чан** // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 4. – С.2–8.

6. *Мустафин, М.Г.* Совершенствование геодезического обеспечения в строительстве с учётом зон тектонических нарушений и применения топоцентрических координат/ М. Г. Мустафин, **Тхань Шон Чан**, Мань Хунг Чан // Геодезия и картография. – 2019. – Т. 80. – № 11. – С.2–14.

#### **Публикации в изданиях, входящих в базу цитирования Scopus:**

7. *Tran Thanh Son.* Development of a local quasigeoid model for Vietnam land area using the global EGM2008 model/ **Thanh Son Tran**, А.А. Kuzin, М.Г. Mustafin // Journal of Physics: Conference Series (International Conference “Complex equipment of quality control laboratories”). – 2019. Volume 1384:012056. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012056.

8. *Tran Thanh Son.* Validation of the method of height transmission by laser tape measure in construction / **Thanh Son Tran**, А.А Kuzin, М.Г. Mustafin // Journal of Physics: Conference Series (International Conference “Complex equipment of quality control laboratories”). – 2019. Volume 1384:012057. DOI: 10.1088/1742-6596/1384/1/012057.

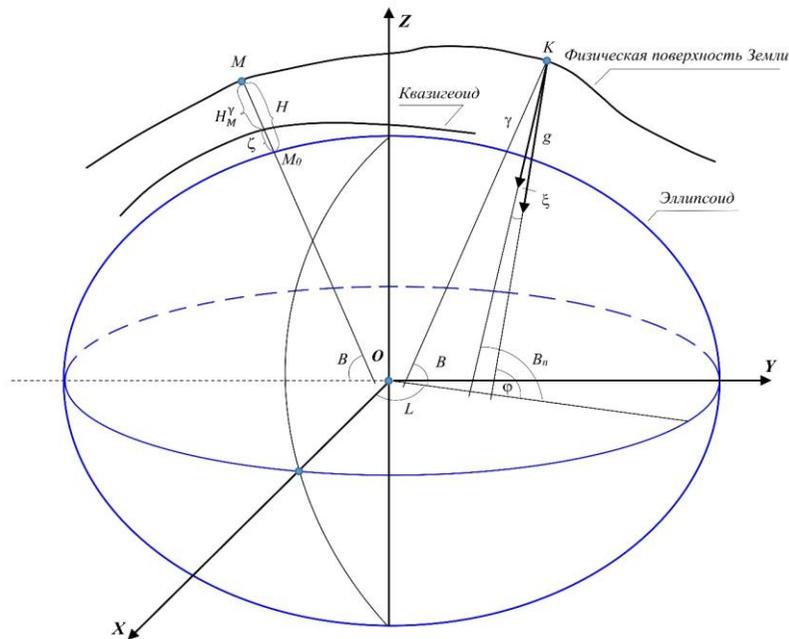


Рисунок 2 – Схема земного эллипсоида с указанием высот:

$B_n$  – геодезическая широта;  $\bar{g}$  – направление силы тяжести в точке  $K$  на поверхности Земли;  $\bar{\gamma}$  – направление касательной к силовой линии нормального поля в точке  $K$ ;  $\xi$  – составляющая уклонения отвесной линии в плоскости меридиана;  $H$  – геодезическая высота в точке  $M$ ;  $H_M^Y$  – нормальная высота в точке  $M$ ;  $\zeta$  – высота квазигеоида (аномалия высоты) в точке  $M$ ;  $\phi$  – астрономическая широта;  $B$  – геодезическая широта;  $L$  – геодезическая долгота

Таблица 2 – Длины линий

Линия		Длина линии на проекции UTM (VN – 2000 $L_0 = 105^\circ$ ), м	Длина линии в топоцентрических координатах, м	Длина линии, измеренная – тахеометром, м	Разности $d$ (мм)	
					UTM и тахеометр	Топоцентрические координаты – тахеометр
GPS-01	GPS-27	222.268	222.247	222.254	14	-7
GPS-09	GPS-10	560.875	560.880	560.884	-9	-4
GPS-10	GPS-11	335.251	335.253	335.256	-5	-3
GPS-23	GPS-24	224.443	224.424	224.429	14	-5
GPS-24	GPS-25	156.930	156.915	156.921	9	-6
GPS-25	GPS-26	256.048	256.044	256.042	6	2
GPS-27	GPS-28	221.211	221.191	221.195	16	-4
GPS-28	GPS-29	171.909	171.902	171.897	12	5
GPS-29	GPS-30	201.902	201.883	201.887	15	-4

Примечание: В первой графе приведены наименования линий (первая линия GPS-01 – GPS-27, вторая GPS-09 – GPS-10 и т. д.).



Рисунок 3 – Схема геодезических пунктов в промышленной зоне Йен-фонг (Вьетнам)

Приложение

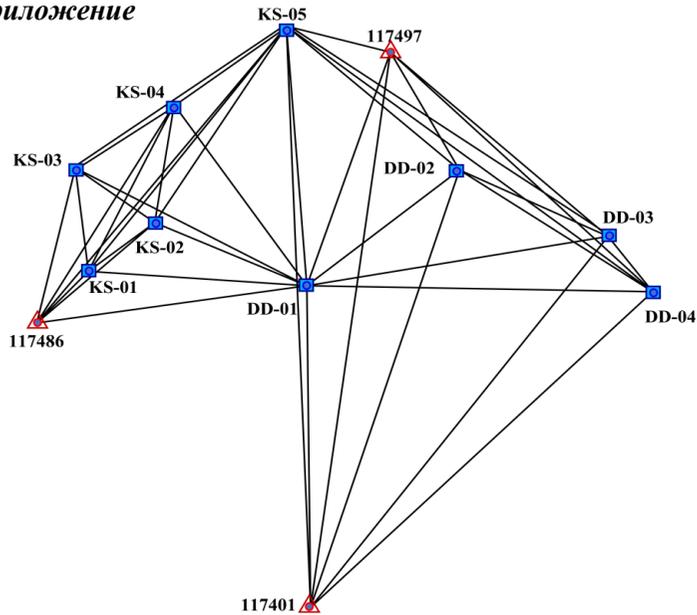


Рисунок П1 – Схема геодезической сети (Кишон, Хоабинь, Вьетнам)

Таблица П1 – Результаты сравнения длин линий

Линия	Длина линии S в проекции Гаусса $L_0 = 106^{\circ}20'$	Длина линии S в топоцентрической системе координат	Длина линии S, измеренная тахеометром	Разности d (мм)		Знаменатель относительной ошибки $T = \frac{S\sqrt{2}}{ d }$	
				Гаусса и тахеометр	Топоцентрическая - тахеометр	В проекции Гаусса $L_0 = 106^{\circ}20'$	В топоцентрической системе
DD-01   DD-02	1240.278	1240.286	1240.281	-3	5	584600	350800
DD-01   KS-02	1035.976	1035.983	1035.978	-2	5	732500	293000
DD-02   DD-03	1025.693	1025.699	1025.701	-8	-2	181300	725200
DD-03   DD-04	474.850	474.852	474.853	-3	-1	223800	671500
DD-05   KS-04	882.241	882.248	882.243	-2	5	623800	249500
KS-01   KS-03	729.235	729.239	729.242	-7	-3	147300	343700
KS-02   KS-03	620.877	620.882	620.880	-3	2	292600	439000
KS-02   KS-04	835.064	835.069	835.066	-2	3	590400	393600
KS-03   KS-04	751.068	751.072	751.073	-5	-1	212400	1062000

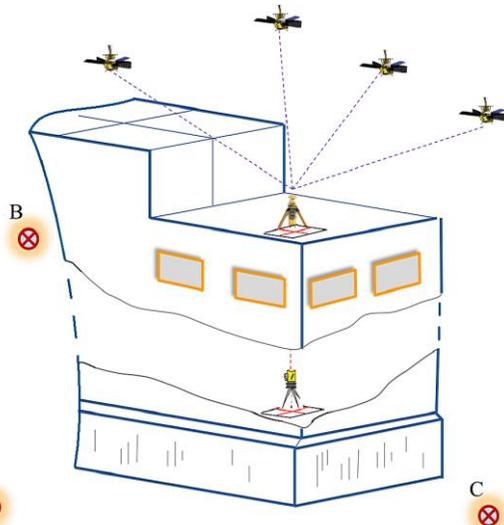


Рисунок П2 – Схема по методу вертикального проектирования с использованием GNSS измерений

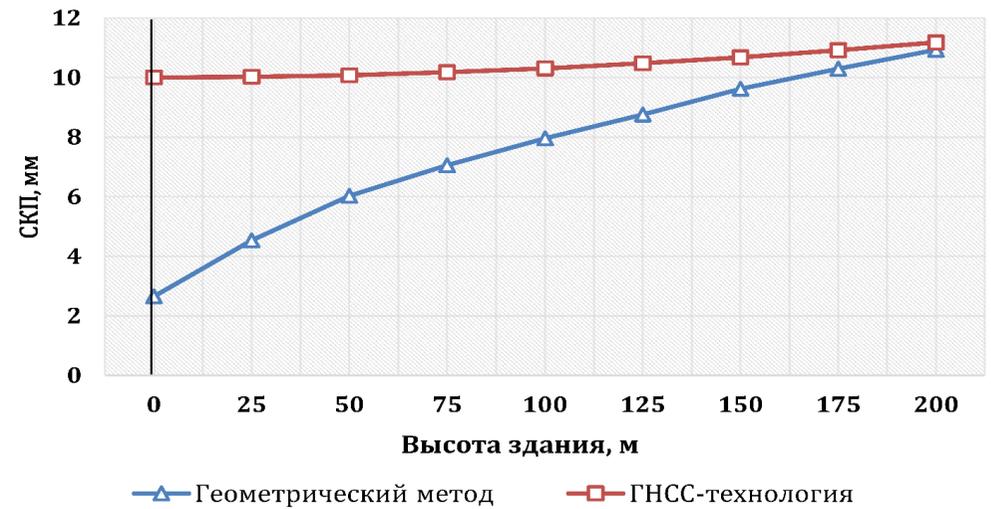


Рисунок П3 – Диаграмма погрешности определения отметок