

*На правах рукописи*

ЮНЕС Жад Ахмад



**ОБОСНОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ СОЗДАНИЯ  
СПУТНИКОВОЙ ГЕОДЕЗИЧЕСКОЙ СЕТИ  
ДЛЯ УСЛОВИЙ НИЗКИХ ШИРОТ**

*Специальность 25.00.32 - Геодезия*

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

**Санкт-Петербург – 2018**

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, ФГБОУ ВО «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», кафедра «Космическая и физическая геодезия», профессор

*Меньшиков Игорь Владимирович*  
кандидат технических наук, ФГБУ «Федеральный научно-технический центр геодезии, картографии и инфраструктуры пространственных данных», начальник отдела съемки шельфа

*Ведущая организация – ФГБОУ ВО «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I»*

Защита диссертации состоится 25 сентября 2018 г. в 11 ч. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.224.08 при Санкт-Петербургском горном университете по адресу: 199106, Санкт-Петербург, 21-я линия, д. 2, ауд. 1171а.

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

Автореферат разослан 25 июля 2018 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ  
диссертационного совета



СКАЧКОВА  
Мария Евгеньевна

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы.** Традиционные методы создания геодезических сетей продолжают использоваться, но уже не как основные. Бурное развитие новых технологий измерений и результатов их обработки в геодезии позволяет на принципиально новой основе создавать геодезические сети. Речь идет об использовании технологии ГНСС (глобальной навигационной спутниковой системы), которая является наиболее эффективным средством позиционирования. Вместе с тем при ее конкретной реализации возникает ряд вопросов, требующих проведения специальных исследований. Научно-практический интерес представляет решение вопроса о технологии спутниковых определений, включая выявление параметров сеансов и приемов при наблюдении спутников для целей обеспечения требуемой точности с минимальным количеством приемников. Весьма актуальной представляется задача о выборе проекции плоских прямоугольных координат, а также обосновании высотной основы. Особенно остро эти вопросы стоят в странах, расположенных в низких широтах и где не создана иерархическая структура геодезического координатного обеспечения. Но потребность в геодезической основе высока. В связи с этим тема диссертации является чрезвычайно актуальной для стран Ближнего Востока и, в частности, для Саудовской Аравии.

Страны Ближнего Востока и Персидского залива в связи с интенсивным освоением новых территорий и строительным бумом в городах испытывают потребность в современных геодезических сетях. К настоящему времени в Ливанской Республике, Арабской Республике Египет, Йеменской Республике, Республике Бенин осуществлены работы по созданию и реконструкции геодезических сетей.

В Саудовской Аравии в западной ее части планируется развитие города Янбу-2 (Yanbu-2). Возникает необходимость создания геодезической основы и последующее ее сгущение для решения различных инженерно-технических задач. В последние годы в этой стране интенсивно используют спутниковые

технологии. В нормативных документах и инструкциях приводятся требования к точности проектируемых сетей. Однако вопросы проектирования и технологии их создания рассмотрены весьма поверхностно. В этой связи становится актуальной задача обоснования построения новой геодезической сети с применением ГНСС-технологии, которая полностью заменит прежнюю национальную геодезическую сеть, созданную еще в 1966 г, и обеспечит решение городских инженерных задач.

Таким образом, создание локальной геодезической сети в Саудовской Аравии представляет собой актуальную задачу, в которой при ее решении необходимо соблюдение специфических условий региона, включая требования по точности, выбор высотной основы и плоской проекции геодезических координат для условий низких широт.

**Степень разработанности проблемы.** В Российской Федерации накоплен большой практический опыт и подготовлена теоретическая основа для создания геодезических сетей различных классов точности. Проработкой вопросов по созданию геодезических сетей на основе спутниковых технологий занимались многие известные ученые, такие как Бойко Е.Г., Кленицкий Б.М., Антонович К.М., Герасимов А.П., Генике А.А., Побединский Г.Г., Афонин К.Ф., Харисов В.Н., Перов А.И., Болдин В.А., Серапинас Б.Б., Баландин В.Н., Брынъ М.Я., Меньшиков И.В., Хабаров В.Ф., Юськевич А.В., Маркузе Ю. И., Загретдинов Р.В., Евстафьев О. В. и др. Благодаря результатам работ этих исследователей созданы спутниковые геодезические сети 1 класса (СГС-1) в разных районах РФ.

**Цель работы.** Теоретическое обоснование и создание геодезической сети в специфических условиях низких широт, обеспечивающей производство инженерно-геодезических работ на территории города Янбу-2 в Саудовской Аравии.

**Идея работы** заключается в использовании: на стадии проектировании сети алгоритма оценки точности спутниковых определений подобно, как это выполняется в методе трилатерации; разработанной технологии спутниковых наблюдений,

предусматривающей применение трех-четырёх приемников; проекции Меркатора при производстве инженерно геодезических работ; высотной основы по уровню Красного моря и определение нормальных высот методом геометрического нивелирования, а для целей проектирования в недоступных местах с учетом модели квазигеоида.

**Задачи исследования:**

1. Анализ существующих разработок по созданию геодезических сетей с целью детализации методики исследования.
2. Проведение математического моделирования для оценки точности проектируемой плановой геодезической сети.
3. Разработка методики создания спутниковой геодезической сети.
4. Практическое использование разработанной технологии наблюдений спутников.

**Методы исследований.** Анализ и обобщение теоретических и практических результатов исследований при обосновании актуальности темы работы и решаемых задач; натурные исследования, включающие экспериментальные геодезические наблюдения спутников; методы математической статистики и теории вероятностей, в том числе метод наименьших квадратов при обработке спутниковых определений; математическое моделирование геодезических сетей.

**Научная новизна работы:**

1. Разработан способ наблюдений спутников при создании геодезической сети, заключающийся в проведении статических одновременных наблюдений на трёх пунктах сети, переносе приемника на пункт смежного треугольника с оставлением двух приемников на смежной стороне, обеспечивающий точность спутниковых определений в пределах сантиметра.
2. Определены зависимости точности измерений с использованием ГНСС-технологии от продолжительности статических наблюдений и длин базовых линий.
3. Обоснован выбор проекции Меркатора для условий низких широт с автоматизацией алгоритма преобразования координат.

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

1. Предварительную оценку точности спутниковой геодезической сети при ее проектировании можно выполнять по алгоритму, включающему математическое моделирование с использованием метода наименьших квадратов спутниковых определений, пересчет по ним длин сторон и их рассмотрении как измеренных величин.

2. В условиях низких широт эффективно применение плоской проекции Меркатора, позволяющей уменьшить искажения длин по сравнению с проекцией Гаусса-Крюгера и за счет автоматизации модифицированного алгоритма оперативно переводить координаты для контроля и оценки точности из одной системы в другую.

3. Обеспечение проектной точности определения плановых координат в пределах сантиметра и менее достигается путем применения разработанной технологии наблюдения спутников, предусматривающей одновременное позиционирование на трех пунктах сети, продолжительностью не менее двух часов с последующим переходом на смежный треугольник и оставлением оборудования на пунктах смежной стороны.

**Практическая значимость работы** состоит в научном обосновании и выявлении количественных зависимостей точности измерений по предлагаемой технологии спутниковых наблюдений. Практическая значимость заключается в разработке и реализации методики создания геодезической сети для условий низких широт.

**Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций** подтверждается большим объемом фактических измерений по разработанной технологии спутниковых наблюдений, обоснованностью теоретических расчетов, а также контрольными замерами заказчика работ.

**Личный вклад автора** Автор диссертационной работы принимал участие на всех этапах построения и обоснования геодезической сети в городе Янбу-2, Саудовской Аравии, как на стадии проектирования, так и в процессе проведения полевых спутниковых измерений, участвовал при их обработке и

уравнивании плановой и высотной геодезической сети, составлении окончательного отчета проекта и сдачи Муниципалитету города.

За активное участие в создании высокоточной геодезической сети и проявление при этом исключительных усилий, преданность делу и вклада в развитии геодезии и градостроительства в муниципалитете города Янбу, Саудовская Аравия, автор диссертации Юнес Жад Ахмад награжден почетным знаком «Щит».

**Реализация результатов работы.** Результаты и выводы работы могут быть использованы геодезическими предприятиями при создании геодезических сетей, а также учебными организациями при изучении спутниковых измерений. По результатам исследований автора и с его активным участием в полевых работах на территории Саудовской Аравии создана геодезическая сеть, которая используется геодезическими и инженерными службами.

**Апробация работы.** Результаты исследований и основные положения диссертации докладывались на международных и всероссийских конференциях, в том числе: на Всероссийской конференции молодых ученых России (Санкт-Петербургский государственный горный институт, 2003г.); на XII международной научно-практической конференции «Развитие науки в XXI веке» (Харьков, апрель 2016г.); на XII Всероссийской научно-практической конференции «Новые технологии при недропользовании» (Санкт-Петербург, 2016); на XII научно-практической конференции «Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации» (Санкт-Петербургский горный университет, декабрь 2016г.); на Международной научно-технической конференции «Транспортная геотехника и геоэкология» (TGG-2017) (Петербургский государственный университет путей сообщения, май 2017г.).

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, 4 из них в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России, 2 в изданиях, индексируемых международной базой данных SCOPUS и Web of Science.

**Объем и структура работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы и приложений, изложенных на 149 страницах машинописного текста. Диссертация содержит 50 рисунков, 21 таблицу, список литературы из 148 российских и зарубежных наименований.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы. Поставлены цели и задачи исследования, описаны научная новизна работы, а также практическая ценность результатов исследований и показаны объекты их внедрения.

**В первой главе** проведен обзор традиционных и современных методов построения геодезических сетей, который показывает тенденцию их развития, направленную на широкое применение спутниковых технологий создания геодезической координатной основы. Проанализирован опыт использования ГНСС-технологий при построении геодезических сетей в Российской Федерации и в некоторых странах низких широт. Обоснована целесообразность использования российского опыта при построения СГС-1 с уменьшенным количеством приемников до трех, при соблюдении требований по точности.

**Во второй главе.** Проведено математическое моделирование геодезических сетей. Проведен предрасчет их точности, что важно для оценки проектных решений и позволяет строить оптимальную сеть с хорошей геометрией по точности и удобную для дальнейшего сгущения. Выполнен сравнительный анализ между проекциями Гаусса-Крюгера и Меркатора для обоснования выбора системы плоских координат в низких широтах. Также, представлены методы и алгоритмы преобразования геодезические координат в плоские прямоугольные и обратно.

**В третьей главе** разработана технология спутниковых определений. На основе результатов экспериментальных исследований проведен анализ оценки среднеквадратической погрешности определяемых линий, а также определена минимальная продолжительность ГНСС наблюдений. Результаты

расчетов показали, что требуемая точность 15 мм достигается при продолжительности измерения не менее 2 часов с использованием двух базовых станций, и она практически не зависит от длин линий. Разработана оригинальная технология ГНСС определений. Результаты фактических измерений показали, что с применением этой технологии можно достигать точность определения плановых координат в пределах сантиметра. Для определения высотных отметок пунктов геодезической сети предложено применять метод геометрического нивелирования. Исходный уровень высотной системы принимается по отметке Красного моря.

**В четвёртой главе** выполнена практическая реализация результатов диссертационных исследований. Приведены все работы по созданию геодезической сети в условиях низких широт. Начиная от изучения местности, поиска существующих исходных пунктов плановой и высотной основы, рекогносцировки, выбора оптимального варианта проектирования сети, нужных типов пунктов, обеспечивающих долгое время их сохранности, до уравнивания сети и определения плановых и высотных координат с требуемой точностью на основе ГНСС-технологии.

**В заключении** представлены основные результаты исследований на актуальную тему создания геодезических сетей с применением спутниковых технологий для условий низких широт. Созданная геодезическая сеть в настоящее время используются в Саудовской Аравии.

Основные результаты исследований отражены в следующих защищаемых положениях:

**1. Предварительную оценку точности спутниковой геодезической сети при ее проектировании можно выполнять по алгоритму, включающему математическое моделирование с использованием метода наименьших квадратов спутниковых определений, пересчет по ним длин сторон и их рассмотрении как измеренных величин.**

Геодезические сети можно создать как традиционными, так и современными методами с использованием спутниковых технологий. При ее построении в Саудовской Аравии в соответствии

с нормативными документами необходимо соблюдать последовательное выполнение работ по ее проектированию, рекогносцировке, закреплению геодезических пунктов, выполнению измерений и окончательной математической обработке результатов измерений.

Автором диссертационной работы выполнена оценка точности проектируемой геодезической сети. Для сравнения были рассмотрены три варианта сети: пункты опираются на один, два и три опорных пунктов (рисунок 1). Сразу отметим, что схема, представленная на рисунке 1а некорректна для метода триангуляции, однако она намеренно показана с целью сравнения результатов оценки точности сетей, построенных традиционным и спутниковым методами.

Анализ оценки точности выполнялся на основе двух разных методов: по традиционному методу (триангуляция и трилатерация) и по алгоритму, включающему математическое моделирование с использованием метода наименьших квадратов. Спутниковые определения рассматриваются в пересчете на длины сторон геодезической сети (рисунок 2).

Основным отличием предложенного алгоритма является коэффициенты матрицы  $A$ . По методу триангуляции они вычисляются по формулам:

Для угловых измерений:

$$Ax_i = \rho \cdot \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}}; Ay_i = -\rho \cdot \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}}; Ax_j = -\rho \cdot \frac{\sin \alpha_{ij}}{S_{ij}}; Ay_j = \rho \cdot \frac{\cos \alpha_{ij}}{S_{ij}}, \quad (1)$$

для линейных измерений:

$$Ax_i = -\cos \alpha_{ij}; Ay_i = -\sin \alpha_{ij}; Ax_j = \cos \alpha_{ij}; Ay_j = \sin \alpha_{ij}, \quad (2)$$

где,  $i, j$  – индексы, соответствующие номерам пунктов;  $\alpha_{i,j}$  и  $S_{i,j}$  – дирекционный угол и длина линии;  $\rho$  – количество секунд в радиане равно 206265.

При уравнивании спутниковых определений матрица  $A$  является конфигурационной матрицей коэффициентов параметрических уравнений и формируется по коэффициентам

измеренных векторов (длин сторон), которые принимают значения 0, 1 или -1 в зависимости от направления вектора.

На основе моделирования трех разных схем геодезических сетей (рисунок 1) проведен предрасчет оценки точности трех определяемых пунктов (рисунок 2). Настоящая разработка представляется важной, так как обеспечивает выполнение нормативной стадии проектирования, предусматривающей предварительный анализ сети для построения оптимальной: с хорошей геометрией и удобной для дальнейшего сгущения. Анализ показал, что применение ГНСС-технологии может обеспечить точность, требуемую для построения геодезической сети в Саудовской Аравии.

По результатам анализа точности трех вариантов геодезических сетей, опирающихся на один, два и три исходных пункта, построены графики зависимости СКО определяемых пунктов (рисунок 3).

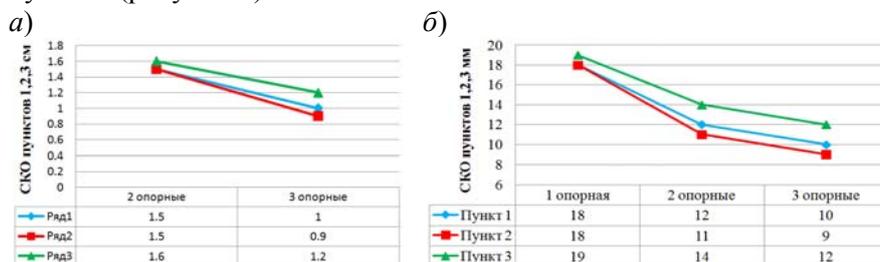


Рисунок 3 – Графики зависимости СКО пунктов: *а)* – метод триангуляции, *б)* – ГНСС-технология

Графики показывают численную взаимосвязь закономерности повышения точности определяемых пунктов от количества опорных точек. Показано, что точность определения положения пунктов спутниковой сети существенно выше, чем в сети, построенной по способу триангуляции. Зависимость повышения точности от количества опорных точек в них не так выражена, как в традиционных сетях. Результаты приведенных расчетов позволяют ориентироваться при выборе количества опорных точек (базовых

станций) в геодезических сетях, а также по методу их создания (наземный или по ГНСС-технологии).

**2. В условиях низких широт эффективно применение плоской проекции Меркатора, позволяющей уменьшить искажения длин по сравнению с проекцией Гаусса-Крюгера и за счет автоматизации модифицированного алгоритма оперативно переводить координаты для контроля и оценки точности из одной системы в другую.**

В связи с бурным внедрением в практику геодезических работ спутниковых определений, которые связаны с компьютерными технологиями, становится весьма важным вопрос о принятии проекции плоских прямоугольных координат. Особенно это важно для условий низких широт. Следует заметить, что в России используется геоцентрическая система координат ГСК-2011 и плоская прямоугольная проекция Гаусса-Крюгера. В странах низких широт используют систему координат WGS-84 с переводом координат в проекцию Меркатора. Каждая из этих двух проекций имеет преимущества и недостатки. Основными критериями при использовании картографических проекций являются величина искажений и абсолютной линейной деформации.

Автором определены искажения длин  $\mu$  и вычислена абсолютная линейная деформация  $D$  в двух проекциях Гаусса-Крюгера и Меркатора. Искажения длин  $\mu$  вычислены по формулам:

$$\mu_{UTM} = K_0 \cdot \mu_{ГК}; \quad \mu_{ГК} = 1 + 0,5 \cdot l^2 \cdot (\cos B)^2 \cdot (1 + e_{ГК}^2 \cdot (\cos B)^2), \quad (3)$$

где  $e_{ГК}$  – эксцентриситет проекции Гаусса-Крюгера,  $B$  – широта,  $l$  – разность долгот осевого меридиана и границы каждой зоны.

Абсолютная линейная деформация  $D$  вычислена по формулам:

$$D_{ГК} = \frac{L^2}{2 \cdot R^2} + \frac{L^4}{24 \cdot R^4} \cdot [км/км]; \quad D_{UTM} = K_0 \cdot (D_{ГК} + 1) - 1, [км/км], \quad (4)$$

где,  $L$  – расстояние между определяемой точкой и осевым меридианом,  $R$  – средняя величина радиуса Земли,  $K_0$  – масштабный коэффициент на осевом меридиане.

По результатам вычислений была построена диаграмма, отражающая отличия между проекциями Гаусса-Крюгера и Меркатора (рисунок 4).

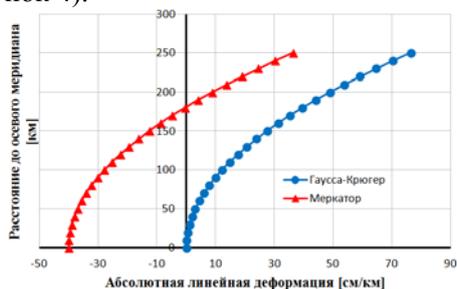


Рисунок 4 – Графики абсолютной линейной деформации в проекциях Гаусса-Крюгера и Меркатора

В результате сделан вывод, что проекция Меркатора имеет меньшие искажения в низких широтах и они более равномерно распределены по зоне. В этой связи преобразование геодезических координат, полученных по спутниковой технологии, в плоские прямоугольные в низких широтах лучше выполнять на проекцию Меркатора.

Для удобства преобразования большого количества геодезических эллипсоидальных координат (B, L) в плоские прямоугольные координаты (x, y) и обратно, автором диссертационной работы разработана программа для Microsoft Excel. Пример программы показан на (рисунок 5).

<i>Преобразование геодезические координаты в плоские прямоугольные</i>		<i>Преобразование плоские прямоугольные координаты в геодезические</i>	
<i>Проекция поперечного Меркатора (Эллипсоид WGS-84)</i>		<i>Проекция поперечного Меркатора (Эллипсоид WGS-84)</i>	
Геодезические координаты		Плоские прямоугольные координаты	
№ зона	B = 24° 00' 20,86710"	№ зона	x = 433482,419 м
37	L = 38° 20' 45,58069"	37	y = 2655022,733 м
Плоские прямоугольные координаты		Геодезические координаты	
x =	433482,419 м	B =	24° 00' 20,86710"
y =	2655022,733 м	L =	38° 20' 45,58069"

Рисунок 5 – Пример программы преобразования координат

Рассмотрен важный вопрос об алгоритме преобразования геодезических координат в систему плоских прямоугольных. Для перевода координат на проекцию Меркатора (эллипсоид WGS-84) автор применил известный алгоритм пересчета на проекцию Гаусса-Крюгера в авторской модификации для условий низких широт (рисунок 6).

$$\begin{aligned}
 x &= Fe + \frac{k_0 \cdot N}{\sqrt{V}} \cdot \operatorname{arth}(\sqrt{V} \cdot \cos B \cdot \sin l) & R\vartheta &= \frac{3}{4}(a+b) - \frac{1}{2}\sqrt{a \cdot b} \\
 y &= Y + \Delta y & N &= \frac{a}{\sqrt{1-e^2}(\sin B)^2} \\
 Y &= \frac{R\vartheta \cdot k_0}{\rho} \operatorname{arctg} \left[ \frac{R\vartheta \cdot \sqrt{1-e^2}}{a} \cos \left( \frac{\cos B}{6} \right) \operatorname{tg} B \right] & t &= 1 + 0,0006 \cdot (\cos B)^4 \\
 \Delta y &= \frac{N}{\rho} \cdot \left[ \operatorname{arctg} \left( \frac{\operatorname{tg} B}{\cos l} \right) - B \right] / t & V &= \sqrt{1 + \left( \frac{e^2}{1-e^2} \right) \cdot (\cos B)^2}
 \end{aligned}$$

Рисунок 6 – Выращения модифицированного алгоритма преобразования геодезических координат (B, L) в плоские прямоугольные координаты (x, y) в проекции Меркатора (эллипсоид WGS-84)

**3. Обеспечение проектной точности определения плановых координат в пределах сантиметра и менее достигается путем применения разработанной технологии наблюдения спутников, предусматривающей одновременное позиционирование на трех пунктах сети, продолжительностью не менее двух часов с последующим переходом на смежный треугольник и оставлением оборудования на пунктах смежной стороны.**

В соответствии с техническим заданием Министерства муниципальных и сельских дел Саудовской Аравии создаваемая геодезическая сеть должна быть построена по ГНСС-технологии с точностью взаимного положения между пунктами не должна превышать 15 мм.

Автором на основе экспериментальных исследований в Саудовской Аравии проведена оценка среднеквадратической погрешности определяемых линий геодезической сети и определена минимальная продолжительность ГНСС наблюдений. При этом рассмотрены разные варианты наблюдений спутников. Доказано, что требуемая точность достигается при продолжительности измерения не менее 2 часов, с использованием двух базовых станции (рисунок 7).

ГНСС-технология выполнялась для определения плановых положений пунктов геодезической сети первого класса (21 пункт), и затем при ее сгущении до геодезической сети второго класса (274 пунктов) с обеспечением точности в пределах сантиметра. Добивались соответствия точности при минимальном количестве сеансов наблюдений.

В итоге автором разработана технология ГНСС определений координат геодезических сетей, названная «скачок лягушки», заключающаяся в рационализации перехода спутникового приемника с одного пункта на другой (рисунок 8).

Для определения высотных отметок пунктов геодезической сети автор предложил метод геометрического нивелирования. Исходный уровень высотной системы принимается по отметке Красного моря путем проведения хода геометрического нивелирования от мареографа Красного моря, который находится в морском порту Янбу-эль-Бахр (в пределах 15 км).

На территории нового города (Янбу-2) существуют труднодоступные места (солончаки, барханы, утесы и т.д.). Возник вопрос: можно ли вычислить нормальные высоты с использованием гравитационной модели Земли EGM-2008. В программе Trimble Business Centre было выполнено интерполирование разности высот и вычислен коэффициент, отражающий разность высот для перехода от геодезических и EGM-2008 к нормальным высотам.

Результаты вычисления нормальных высот по данным модели Земли EGM-2008 отличаются в пределах  $\pm 10$  см от нормальных высот, полученных по геометрическому нивелированию I класса, а от геодезических высот в пределах  $\pm 20$  см (рисунок 9). Исходя из

полученных результатов, можно делать вывод о возможности вычисления нормальных высот от EGM2008 для стадии проектирования и для недоступных мест (солончаки, пески, утесы и т.п.).

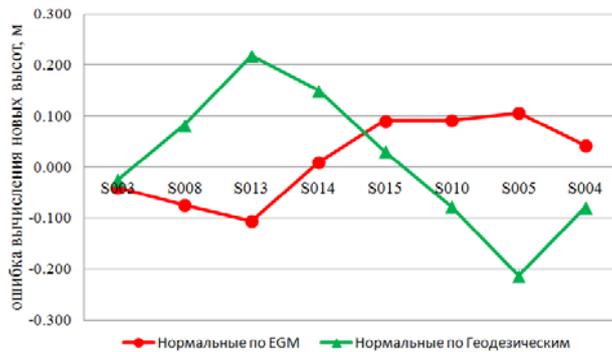


Рисунок 9 – Графики нормальных высот (вычисленные по данным модели Земли EGM-2008 и по геодезическим высотам)

Автор диссертационной работы участвовал на всех стадиях работ в построении геодезической сети в городе Янбу-2 в Саудовской Аравии. Выдавал инструкции бригадам по рекогносцировку и закладки пунктов. Поскольку территория построения геодезической сети включает значительную площадь, покрытую песками, необходимо было решение вопроса о глубине закладке пунктов для обеспечения их устойчивости.

Муниципальными службами города геодезический центр № 15, также и другие: ТИП 187, 190, 191 и 192, предназначенные примерно для таких грунтов, не были одобрены, и в этой связи, автором предложены два типа пунктов. Один для мест, где толщина песчаного грунта меньше или равно 1 м. Второй – для участков, где мощность песчаной толщи более 1 м. Для мест, где песчаный грунт более одного метра, пункты закладывались с использованием буронабивных свай до 8 метров глубиной, в зависимости от мощности песков. Схемы новых типов пунктов представлены на рисунке 10.

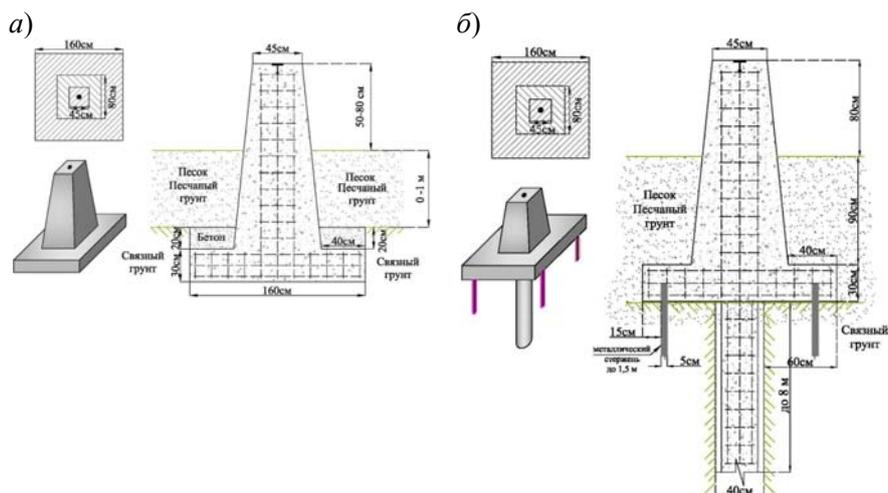


Рисунок 10 – Геодезические пункты с центрами: а) – тип пункта для мощности песчаного грунта до или равной 100 см, б) – тип пункта для мест с песчаным грунтом более 100 см.

Типы геодезических пунктов, разработанные автором диссертационной работы, были одобрены муниципалитетом города и министерством муниципальных и сельских дел.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. На основе теоретических и экспериментальных исследований с непосредственным участием автора диссертации разработана технология создания спутниковой геодезической сети для условий низких широт.
2. Для обеспечения нормативных требований проектирования разработана методика оценки точности спутниковой геодезической сети на основе рассмотрения длин сторон с использованием метода наименьших квадратов.
3. Обоснован выбор системы плоских координат в низких широтах. Выполнен сравнительный анализ между проекциями Гаусса-

Крюгера и Меркатора. Вычислены величины искажений и абсолютные линейные деформации в каждой из этих проекции, модифицирован алгоритм преобразования геодезических координат в плоские прямоугольные и обратно.

4. Показано, что для условий низких широт эффективно применение проекции Меркатора, позволяющее уменьшить искажения по сравнению с системой Гаусса-Крюгера, а за счет автоматизации модифицированного алгоритма оперативно переводить координаты с одной системы в другую.
5. Определены зависимости точности спутниковых определений от продолжительности статических наблюдений и длин линий.
6. Разработана технология ГНСС наблюдений на пунктах геодезической сети, названная для сокращенного обозначения «скачок лягушки», которая предусматривает одновременное позиционирование на трех пунктах с последующим переходом на смежный треугольник и оставлением оборудования на пунктах смежной стороны. Результаты фактических измерений показали, что с применением этой технологии можно достичь точности определения плановых координат в пределах сантиметра.
7. Высоты пунктов геодезической сети предложено определять методом геометрического нивелирования. При этом исходный уровень высотной системы принимается по отметке Красного моря. Пункты геодезической сети получают отметки путем проведения хода геометрического нивелирования от мареографа Красного моря. Приведено обоснование определения нормальных высот на основе гравитационной модели Земли EGM2008. При этом возможно достижение точности в пределах 10 см, что достаточно для стадий проектирования.
8. Разработанные теоретические и практические рекомендации получили практическую реализацию в виде построения геодезической сети на территории строительства нового города в Саудовской Аравии. В настоящее время, координаты пунктов геодезической сети используются муниципалитетом города Янбу-2 для различных видов инженерных и строительных работ.

**По теме диссертации опубликовано 10 работ, из них:**

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

1. Мохамед А., Юнес Ж. Разработка методов геодезического обеспечения строительства гидротехнических сооружений на основе спутниковых технологий / Мохамед Аббуд, Юнес Жад // Записки Горного института. – СПб. – 2003. – Т.155. – №1. – С.118-121.

2. Юнес Ж.А., Мустафин М.Г. Особенности использования системы прямоугольных координат для разных широт / Ж.А. Юнес, М.Г. Мустафин // Естественные и технические науки. – Москва. – 2016. – №10 (100). – С.89-92.

3. Юнес Ж.А., Мустафин М.Г., Морозова В.Д. Создание опорной маркшейдерской сети с использованием технологии спутникового позиционирования / Ж.А. Юнес, М.Г. Мустафин, В.Д. Морозова // Маркшейдерский вестник. – Москва. – 2017. – № 2 (117). – С.25-28.

4. Мустафин М.Г., Юнес Ж.А. Оценка результатов спутниковых определений пунктов геодезической сети с различными сеансами наблюдений / М.Г. Мустафин, Ж.А. Юнес // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». – Москва. – 2018. – Т.62. – №1. – С.23-26.

**В изданиях, индексированных международной базой данных SCOPUS и Web of Science:**

5. Beregovoi D. V., **Younes J. A.**, Mustafin M. G. Monitoring of quarry slope deformations with the use of satellite positioning technology and unmanned aerial vehicles // Procedia engineering, 2017 (189). – pp. 737-743.

6. Мустафин М.Г., Грищенко Е.Н., Юнес Ж.А., Худяков Г.И. Современное маркшейдерско-геодезическое обеспечение эксплуатации горных предприятий / М.Г. Мустафин, Грищенко Е.Н., Ж.А. Юнес, Г.И. Худяков // Известия Тульского государственного университета. – Тула. – 2017. – С.190-203.

**В прочих изданиях:**

7. Юнес Ж.А. Развитие государственной геодезической сети Саудовской Аравии / Сборник статей научно-информационного центра «Знание» по материалам XII международной заочной

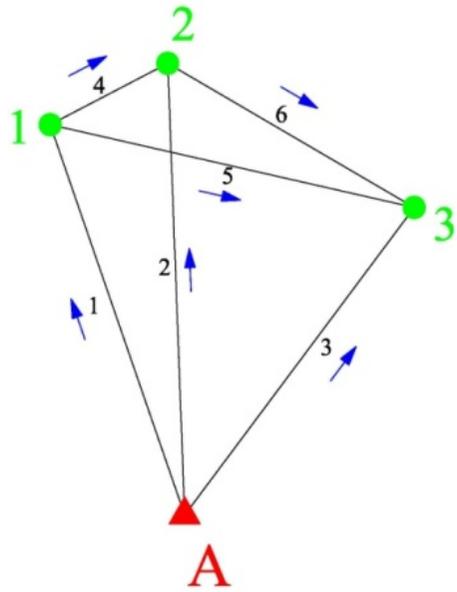
научно-практической конференции: «Развитие науки в XXI веке». – Харьков. – 2016. – С.119-122.

8. К вопросу повышения точности геодезических сетей спутниковыми наблюдениями / XII Всероссийская научно-практическая конференция «Новые технологии при недропользовании». Секция «Инновационные технологии в маркшейдерском деле, геодезии и кадастре»: Сборник научных трудов. Санкт-Петербургский горный университет. – СПб. – 2016. – С.73-74.

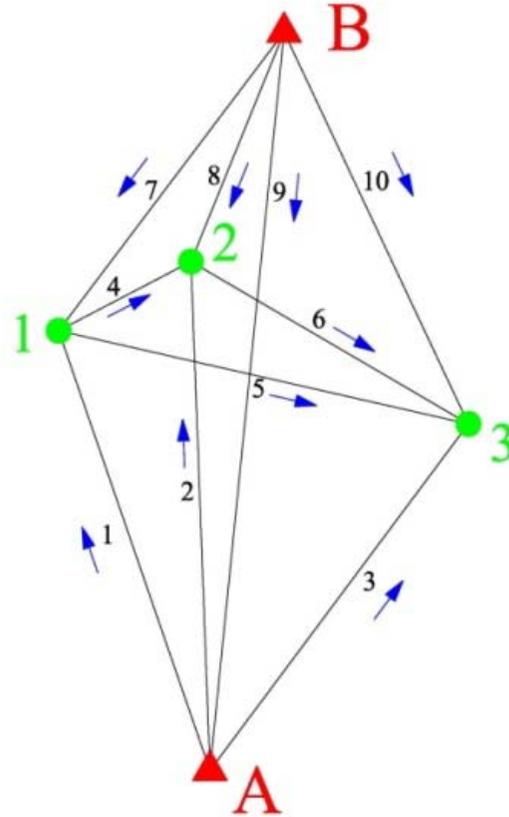
9. Юнес Ж.А. Применение спутниковой технологии позиционирования при инженерно-геодезических изысканиях / Инженерные изыскания в строительстве. Материалы XII общероссийской конференции изыскательных организаций. ООО «Геомаркетинг». – Москва. – 2016. – С.98-100.

10. Beregovoi D. V., Younes J. A., Mustafin M. G. Monitoring of quarry slope deformations with the use of satellite positioning technology and unmanned aerial vehicles / D. V. Beregovoi, J. A. Younes, M. G. Mustafin // Transportation geotechnics and geoecology (TGG-2017). Abstracts of international scientific conference. – St. Petersburg, 2017. – p.106.

a)



б)



в)

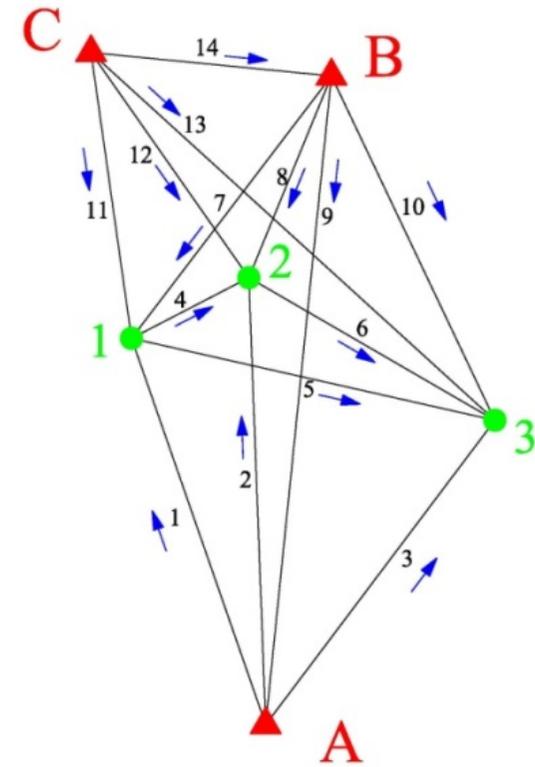
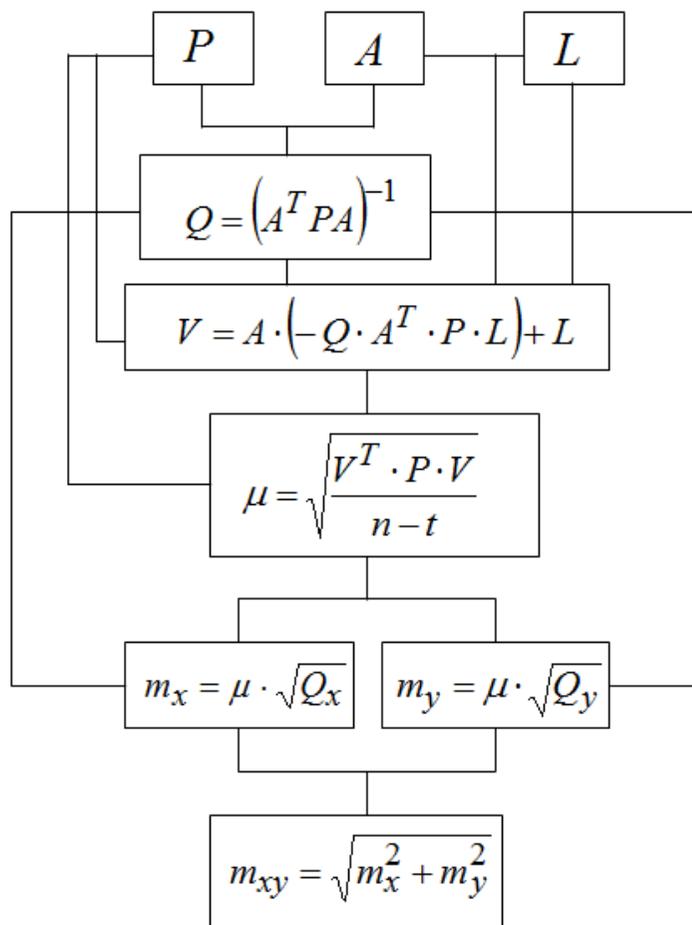
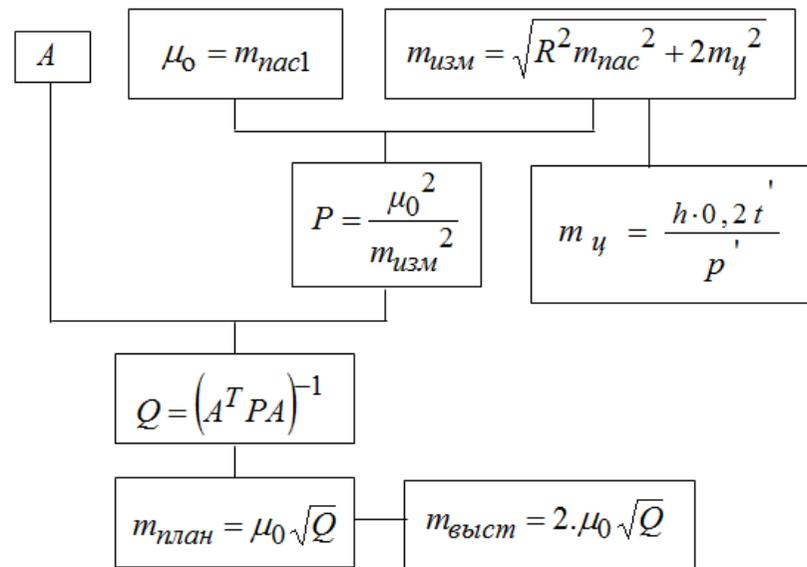


Рисунок 1 – Модели построения геодезических сетей. а) – сеть, опирающаяся на один опорный пункт, б) – на два опорных пункта, в) – на три пункта

а)



б)



где,  $Q$  – Матрица весовых коэффициентов,  $A$  – матрица параметрических уравнений поправок,  $P$  – матрица весов результатов измерений,  $L$  – Матрица-вектор свободных членов,  $V$  – матрица поправок,  $n$  – Число всего измерений,  $t$  – Число необходимых измерений.  $\mu$  – Апостериорная средне-квадратическая погрешность (СКО) единица веса,  $m_{x,y}$  – СКО положения произвольного пункта в сети относительно исходного пункта,  $\mu_0$  – (Ошибка единицы веса) ошибка измерения в плане вектора длиной 1 км,  $m_{nac}$  – Паспортная точность спутниковых измерений векторов в плане,  $m_{изм}$  – СКО измерения вектора в плане,  $m_{ц}$  – Ошибка центрирования антенны приемников,  $R$  – Коэффициент радиовидимости,  $h$  – Высота установки инструмента,  $\tau$  – Цена деления круглого уровня оптического центра.

Рисунок 2 – Схема проведения оценки точности пунктов. а) – по способу триангуляции, б) – по спутниковым измерениям

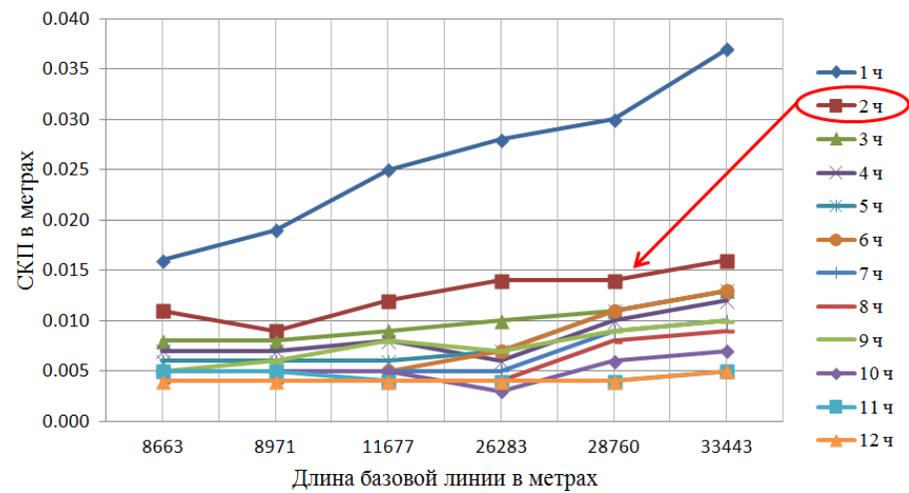
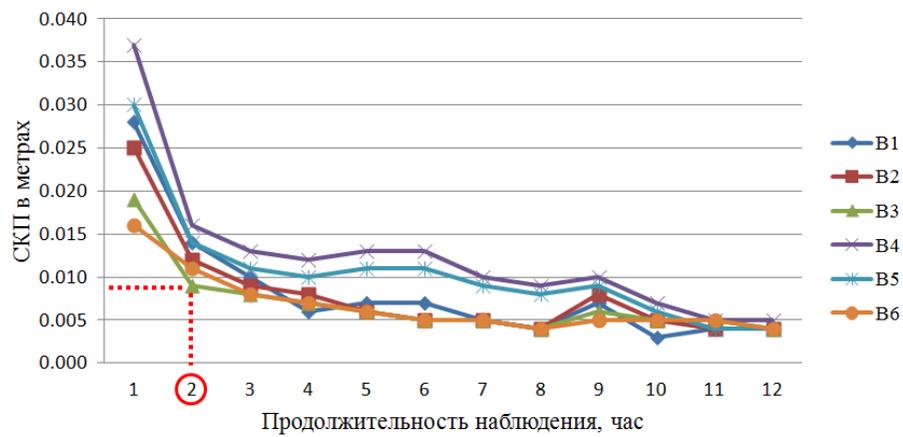
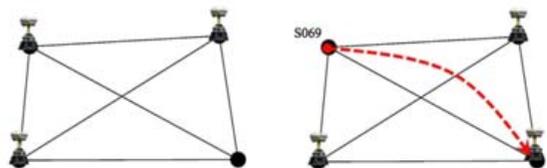


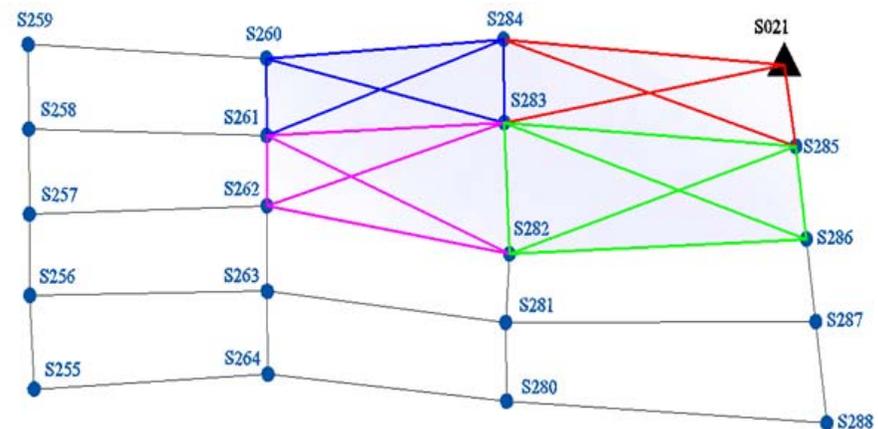
Рисунок 7 – График зависимости СКП определения линий их длин и от продолжительности наблюдений с использованием двух базовых станции



Метод спутниковой триангуляции  
(измерения по способу «скачок лягушки»)



Схема выполнения ГНСС наблюдений сети первого класса



Фрагмент схемы выполнения ГНСС наблюдения  
на пунктах сети второго класса

Рисунок 8 – Схема выполнения ГНСС наблюдений сети первого и второго класса  
с применением способа «скачок лягушки»