

На правах рукописи

Собхи Абдель Монем Абдель Гавад Юнес

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ
МЕТОДОВ УЧЕТА ВЛИЯНИЯ АТМОСФЕРЫ ЕГИПТА
НА РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ РАССТОЯНИЙ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫМИ СИСТЕМАМИ**

Специальность 25.00.32. – Геодезия

автореферат

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Москва - 2010

Работа выполнена на кафедре высшей геодезии и фотограмметрии в
Ростовском государственном строительном университете

Научный руководитель: Заслуженный деятель науки РФ,
доктор технических наук, профессор
Куштин Иван Федорович

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор
Яшкин Станислав Николаевич

кандидат технических наук,
Тихонов Александр Дмитриевич

Ведущая организация: **Южное аэрогеодезическое предприятие**

Защита состоится 15 апреля 2010г. в 10 Часов на заседании
диссертационного совета Д212.143.03 в Московском государственном
университете геодезии и картографии МИИГАиК по адресу: 105064, Москва,
Гороховский переулок, д.4. (зал заседаний ученого совета).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
государственного университета геодезии и картографии.

Автореферат разослан « » марта 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Юрий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Египет расположен на северо-востоке Африки, на стыке с Азиатским континентом. Территория страны занимает положение между 22° и 32° северной широты. Северная часть Египта омывается Средиземным морем. В этой части климат субтропический. На основной территории страны климат тропический континентальный. Сухость воздуха и температура повышаются от побережья к югу страны, вглубь пустыни, упругость водяного пара Египта увеличивается к Средиземному морю.

С учетом климатических условий страны решаются научно-технические и производственные задачи, связанные с необходимостью совершенствования опорной геодезической сети Египта. Широкое применение в решении научно-технических и производственных задач имеют измерения расстояния с помощью электромагнитных волн (ЭМВ). Наибольшее применение эти измерения находят при определении расстояний от пунктов на земной поверхности или вблизи нее до созвездия спутников (системы ГЛОНАСС, GPS) для получения координат пунктов, а также при создании и совершенствовании опорной геодезической сети Египта.

В 1907г. началось создание новой геодезической сети Египта методом триангуляции с целью установить наиболее точно геодезические пункты для широкого кадастрового обзора и формирования национальной картографии страны.

Плановая геодезическая сеть Египта 1 класса содержит Сеть 1 и Сеть 2.

Сеть 1 начали создавать в 1907г. и закончили в 1945г. Она состоит из десяти секций, каждая секция начинается с базовой линии и соединяется с другой базовой линией. Сеть содержит 195 станций и имеет общую форму Т (Т-форма), с начальным пунктом на холме Мукаттом (Mokattem hill) на востоке Каира. Горизонтальная часть Т-формы содержит пять секций, покрывающих северную область от Эль-Ариш (Al-arish) на Востоке до Эль-Салум (Al-salom) на Западе и проходящих через область Каира. Вертикальная часть Т-формы содержит другие пять секций, покрывающих плодородную область долины Нила от Каира до Адиндан (Adindan) вблизи суданской границы. Станция Z5 (Adindan) на юге является базовой станцией суданской геодезической сети.

В 1952г. египетский Центр обзора (ESA) изложил план наблюдения второй геодезической сети (Сеть 2), которая покрывает южный Синай, область Красного моря, а также часть западной пустыни, чтобы развивать и населять эти области. Сеть 2 была построена и наблюдалась с 1955г. до 1968г. Эта сеть состоит из 207 станций, формирующих три базисных блока, которые разделены на 13 секций. Сеть 1 и Сеть 2 были связаны 19 станциями в различных областях.

Для повышения точности геодезической сети в последнее двадцатилетие использовалась система GPS для определения координат пунктов в геодезической системе WGS-84.

Система GPS использовалась для определения координат геодезических пунктов египетским Центром обзора (ESA). В 1995г. были установлены две национальные геодезические сети GPS. Первая сеть – высокоточная спутниковая геодезическая сеть (HARN), которая покрывает всю египетскую территорию и состоит из 30 станций с расстоянием между ними около 200 км. Сеть определялась дифференциальным методом космической геодезии со средней квадратической ошибкой не более $5 \text{ мм} + 1.10^{-7}D$ для плановых координат и $5 \text{ мм} + 2.10^{-7}D$ по геодезической высоте, где D – расстояние между пунктами в км.

Вторая сеть – национальная сельскохозяйственная кадастровая сеть (NACN), которая покрывает долину и Дельту Нила. NACN состоит из 112 станций с расстоянием между ними приблизительно 50 км, определяется дифференциальным методом космической геодезии со средней квадратической ошибкой не более $8 \text{ мм} + 1.10^{-6}D$ по плановому положению и $5 \text{ мм} + 2.10^{-6}D$ по высоте. Система GPS применялась также для создания специальной геодезической сети по финскому проекту в восточной пустыне, по американскому проекту - в Дельте и вдоль реки Нила с некоторыми расширениями в восточной пустыне и по немецкому проекту - в Асуанской области.

В работах египетских ученых (Awad E.M., Dawod G.M., El-Sayed M.S., Saad A.A., Shaker A.A.) выполнены сравнения координат 32 пунктов геодезической триангуляции сети 1 и сети 2 с полученными с помощью GPS в WGS-84. Анализ результатов показал, что разности колеблются от 5,76 до 25,36 м по оси абсцисс и от 174,64 до 181,89 м по оси ординат. Трансформирование координат пунктов, определенных в WGS-84, к специальной (местной) системе координат приводит к искажениям оси абсцисс 4,85 м и ординат 7,50 м.

Для повышения точности локальной сети была создана модель, которая повысила точность координат сети до **20** см в абсциссах и **27** см в ординатах.

При определении расстояний в процессе измерений возникают различного рода погрешности. Так, при измерении расстояния между спутником и приемником возникают погрешности, связанные с нестабильностью эталона времени, прогнозированием эфемерид, задержкой сигнала в ионосфере и тропосфере, а также многопутностью траектории ЭМВ и другими показателями. Учет влияния каждого из отмеченных факторов является актуальной проблемой, решение которой приводит к повышению точности конечного результата.

Влияние ионосферы на величину измеряемого до спутника расстояния можно исключить путем измерения на двух несущих частотах, особенно при двухчастотных дифференциальных фазовых измерениях, позволяющих измерять расстояния различной протяженности на сантиметровом и даже на миллиметровом уровне точности.

Влияние тропосферы, точнее нейтросферы, в атмосфере Египта учитывается с невысокой точностью, поэтому является актуальным решение

проблемы высокоточного учета влияния нейтросферы при минимальной информации об атмосфере только в конечных точках трассы ЭМВ.

Решение этой проблемы связано с комплексом теоретических разработок и экспериментальных исследований. Экспериментальные исследования разработанных теорий целесообразно выполнять путем создания моделей атмосфер, отражающих как средние, так и экстремальные метеорологические характеристики, встречающиеся в Египте. Методом численного интегрирования дифференциальных уравнений поправок определяют их точные значения для созданных моделей. Из сравнения этих поправок с поправками, полученными теоретически, определяют точность и границы использования выполненных разработок.

Исследованием распространения ЭМВ в атмосфере, в основном рефракции световых волн, занимались многие российские ученые и ученые других стран: А.И. Аузан, Н.А. Арманд, А.А. Генике, А.Н. Голубев, В.М. Джуман, Ф.Д. Заблоцкий, А.А. Изотов, Е.Б. Ключин, Н.И. Кравцов, Ф.Н. Красовский, И.Ф. Куштин, В.И. Куштин, Д.Ш. Михелев, А.Л. Островский, Л.П. Пеллинен, М.Т. Прилепин, А.В. Прокопов, Л.С. Юношев, Н.В. Яковлев, H.D. Black, P. Collins, J.I. Davis, T.R. Emardson, H. S. Hopfield, I.M. Ifadis, J.W. Marini, V.V. Mendes, A.E. Niell, J. Saastamoinen и многие другие.

На территории Египта метеорологические условия являются разнообразными, поэтому важной и актуальной задачей в диссертации является детальное исследование влияния атмосферы Египта на результаты измерения расстояний радиосистемами при наблюдении объектов в атмосфере Египта и за ее пределами. Следует отметить, что данная проблема в условиях атмосферы Египта не была раньше исследована.

Цель работы. Комплексное решение научно-технических задач: повышение точности результатов измерений радиоэлектронными системами на территории Египта путем учета влияния атмосферы и определение поправок в расстояния за задержку сигнала в атмосфере страны только по информации об атмосфере в начальной и конечной точках траектории радиоволн и только у приемника излучения, если наблюдаемый объект расположен за пределами атмосферы (на высотах более 70-100 км). Решение этой проблемы важно не только для геодезической науки и практики, но и для других областей знаний.

Методология исследований. Работа выполнялась с использованием теории распространения радиоволн, радиогеодезии, физики атмосферы, высшей и космической геодезии, теории математической обработки геодезических измерений. Путем создания математических моделей атмосферы со средними и экстремальными параметрами и методов численного интегрирования дифференциальных уравнений определялись практически безошибочные поправки в расстояния для различных высот и зенитных расстояний для атмосферы Египта. С полученными величинами поправок сравнивали их значения по разработанным в диссертации

теоретическим положениям и формулам, требующим информации об атмосфере только в конечных точках траектории ЭМВ.

Научная новизна. Выполнение теоретических и экспериментальных исследований для разработки методов определения поправок в расстояния за влияние атмосферы Египта при информации об атмосфере только в начальных и конечных точках траектории ЭМВ.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Дан анализ целесообразности использования существующих формул и моделей вычисления атмосферной задержки в условиях атмосферы Египта.
2. Разработана методика высокоточного учета величины упругости водяного пара на различных высотах в атмосфере Египта точнее, чем по известным формулам.
3. Получены формулы и созданы модели для определения сухой и влажной составляющих поправок в расстояния при любых условиях атмосферы Египта, включая и экстремальные.

Данные положения являются составными частями в решении научно-технической проблемы повышения точности измерений расстояний радиоэлектронными системами на территории Египта.

Практическая ценность работы. Повышение точности измерения расстояний и определения координат пунктов на территории Египта с помощью радиоволн путем учета влияния атмосферы на скорость распространения ЭМВ при информации об атмосфере страны только в конечных точках трассы электромагнитного излучения.

Апробация работы. Основные положения диссертации опубликованы в научных статьях (4 ст. из них – 2 в изданиях, рекомендованных **ВАК**) и тезисах (2 т.), изложены в докладах на Международной научно-практической конференции «Строительство - 2009» (Ростовский государственный строительный университет) и на Международной научно-технической конференции «Геодезия, Картография и Кадастр – XX1 век» МИИГАиК.

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 96 наименований и приложения. Работа изложена на 172 страницах машинописного текста, содержит 52 таблиц, 18 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, указываются цель и задачи, раскрываются научная новизна работы, практическая значимость полученных результатов и степень апробации.

В первой главе «Краткие сведения о физических параметрах атмосферы Египта» описано физико-географическое положение территории Египта, расположенного между 22° и 32° с. ш. в субтропическом сухом поясе с повышением влажности на побережье Средиземного моря. В табл. 1 приведены максимальные, минимальные и среднегодовые значения упругости водяного пара e в гПа, относительной влажности воздуха f в процентах и температуры T в $^\circ\text{C}$ в различных пунктах страны.

Таблица 1

Значение метеорологических параметров в различных пунктах страны.

Город	Асуан	Ель-Харга	Хургада	Хелуан	Эль-Ариш	Марси-Матрух
	$23^\circ 58' \text{ с. ш.}$ $32^\circ 47' \text{ в. д.}$	$25^\circ 40' \text{ с. ш.}$ $28^\circ 45' \text{ в. д.}$	$27^\circ 14' \text{ с. ш.}$ $33^\circ 51' \text{ в. д.}$	$29^\circ 52' \text{ с. ш.}$ $31^\circ 20' \text{ в. д.}$	$31^\circ 05' \text{ с. ш.}$ $33^\circ 50' \text{ в. д.}$	$31^\circ 52' \text{ с. ш.}$ $27^\circ 17' \text{ в. д.}$
$T_{\text{макс.}}, ^\circ\text{C}$	41,3	39,6	36,4	36,0	32,1	29,8
$T_{\text{ср.}}, ^\circ\text{C}$	26,2	24,25	24,3	22,4	20,15	19,54
$T_{\text{мин.}}, ^\circ\text{C}$	8,8	5,9	11,0	7,7	7,6	8,8
$f, \%$	25,25	35,8	41,33	48,83	70,41	68,08
$e_{\text{макс.}}$ гПа	15,75	21,71	22,26	29,94	34,94	30,64
$e_{\text{ср.}}$, гПа	8,02	10,84	11,77	13,22	16,61	15,38
$e_{\text{мин.}}$, гПа	3,67	4,36	5,96	5,73	7,51	7,58

Данные таблицы показывают повышение температуры от побережья к югу страны, в глубь пустыни. В пустыне дневные температуры могут достигать 48°C , но могут падать до 0°C ночью. Температуры могут также достигать 48°C вдоль Красного моря, но редко падают ниже 14°C ночью. В области Каира среднесуточные температуры самого холодного месяца, января, - от $9^\circ \dots 10^\circ\text{C}$, а самого жаркого, июля, - $30^\circ \dots 34^\circ\text{C}$. Отмечено также увеличение упругости водяного пара Египта к Средиземному морю и уменьшение по мере удаления от моря, особенно в пустыне Египта. На берегу Средиземного моря значения e поднимаются до $34,94$ гПа, а в поясе пустынь значения e существенно убывают до $3,67$ гПа и ниже. В среднем за год парциальное давление в Египте составляет $12,64$ гПа, а годовая амплитуда – $31,27$ гПа.

Влажность воздуха Египта растет у берегов и достигает 73% , но убывает над пустынями, уменьшаясь до 16% и ниже. Влажность воздуха уменьшается в зимнее время от 73% до 30% и увеличивается летом в пределах от 16% до 73% .

Рис. 1. Изменение упругости водяного пара с высотой в атмосфере Египта.

Анализ результатов, приведенных на рис. 1, показывает, что:

- большая часть водяного пара находится в нижней части атмосферы;
- самые высокие значения упругости водяного пара Египта отмечаются в августе, а самые низкие – в феврале;
- упругость водяного пара существенно убывает с высотой летом, а зимой это изменение незначительно.

Даны краткие характеристики атмосферы Египта, необходимые для создания моделей атмосфер.

Во второй главе «Влияние атмосферы на результаты измерения расстояния с помощью ЭМВ» показано, что результаты спутниковых измерений подвержены влиянию случайных и систематических ошибок. Наибольшие неточности в измеряемые расстояния вносят ошибки, вызываемые многопутностью, ионосферой и тропосферой.

Влияние многопутности ослабляется, главным образом, аппаратным путем. Влияние ионосферы практически полностью исключается при использовании двухчастотных приемников.

Рассмотрены вопросы определения точности индекса преломления радиоволн в атмосфере. Показано, что индекс преломления $N = (n - 1) \cdot 10^6$, где n – коэффициент преломления, в оптическом (при $\lambda \leq 20$ мкм) и радиодиапазоне для сухого воздуха практически одинаков. При $\lambda \geq 20$ мкм индекс преломления практически остается неизменным, т.е. не зависит от длины волны. Для подтверждения этого положения использованы формулы Коши, Эдлена и Лоренц-Лорентца.

Для радиоволн индекс преломления воздуха

$$N = k_1 \frac{P_c}{T} + k_2 \frac{e}{T} + k_3 \frac{e}{T^2} + k_4 \frac{P_{CO_2}}{T}, \quad (3)$$

где k_1, k_2, k_3, k_4 – коэффициенты, определяемые экспериментально.

Исследования этой формулы, выполненные Бином, Смитом и Вейнтраубом, показали, что ее точность составляет 0,5%, а коэффициенты в радиодиапазоне не зависят от длины волны

$k_1 = (77,607 \pm 0,13)$ К/гПа, $k_2 = (71,6 \pm 8,5)$ К/гПа, $k_3 = (374700 \pm 3100)$ К/гПа, $k_4 = (129,34 \pm 0,02)$ К/гПа.

Наиболее часто в радиодиапазоне индекс преломления определяют по формуле Фрума-Эссена:

$$N = 77,624 \frac{P_c}{T} - 64,700 \frac{e}{T} + 371896 \frac{e}{T^2}, \quad (4)$$

где давление (p_c) и упругость водяного пара (e) – в гПа.

Дан краткий обзор и анализ существующих методов определения поправок в расстояния, измеренные с помощью электромагнитных волн. Используемая в большинстве случаев при свето- и радиодальномерных измерениях на земной поверхности формула

$$\Delta S = -\frac{10^{-6}}{2}(N_g + N_a)S, \quad (5)$$

где N_g , N_a – индексы преломления в начальной и конечной точках траектории ЭМВ, - может быть использована для небольших расстояний.

При измерении наклонных расстояний большой длины необходимо иметь значение N или температуру T , давление p и влажность e в точках траектории электромагнитного излучения. Использование для этой цели материалов самолетного зондирования позволяет определять среднеинтегральный индекс преломления с довольно высокой точностью, но связано с большими затратами и довольно сложно в организационном отношении.

Приведены, в качестве примеров, некоторые известные модели вычисления атмосферной задержки (АЗ) (модели Ю. Саастамойнена, Х. Хопфильда, Г. Блэка и функций отображений, особенно функция отображения А. Найлла) и определена их возможность применения в условиях атмосферы Египта.

В табл. 2 приведены разности (δ_C и δ_B) между значениями сухой и влажной составляющими поправок (ΔS_C и ΔS_B), вычисленными по разным моделям атмосферы при зенитных расстояниях z_g от $0,0^\circ$ до $80,0^\circ$ для условий атмосферы Египта на станции Хелуана и значениями $\Delta S_{СИ}$ и $\Delta S_{ВИ}$, определенными методом численного интегрирования, что показано на рис. 2.

Анализ результатов (табл. 2 и рис. 2) показывает, что использование данной модели возможно в условиях атмосферы Египта при небольших зенитных расстояниях z_g до 60° , а выше разности быстро увеличиваются с увеличением зенитных расстояний z_g . Модели Ю. Саастамойнена и Ф.О. Найлла дают меньшую ошибку и почти совпадают в результатах, наибольшие же ошибки отмечены в результатах по модели Блэка, особенно для влажной составляющей поправки.

Так как наименьшая ошибка составляет 22,0 мм при $z_g = 0,0^\circ$ и достигает 56,0 мм и 469,0 мм при $z_g = 60,0^\circ$ и $80,0^\circ$ соответственно, возникла необходимость получить формулы, позволяющие определять поправки в дальность при условиях атмосферы Египта с ошибкой менее 1 мм.

В третьей главе «Определение поправки в расстояние за замедление скорости радиоволн в атмосфере Египта» выполнены исследования методов высокоточного определения поправок в расстояния отдельно для сухой и влажной составляющих индекса преломления.

Таблица 2

Анализ существующих моделей атмосферы в условиях атмосферы Египта

z_g	модель Саастамойнена		Модель Хопфильда		Модель Блэка		Ф.О. Найелла	
	δ_C , мм	δ_B , мм	δ_C , мм	δ_B , мм	δ_C , мм	δ_B , мм	δ_C , мм	δ_B , мм
0,0°	-5,3	-16,5	-9,6	-21,2	-2,6	-35,3	-5,3	-16,5
15,0°	-5,7	-17,0	-10,3	-22,0	-2,8	-36,7	-5,6	-17,2
30,0°	-6,8	-19,2	-11,9	-24,6	-3,7	-41,0	-6,7	-19,1
45,0°	-10,8	-23,8	-16,3	-30,1	-6,7	-50,6	-10,3	-23,5
60,0°	-21,7	-34,5	-28,4	-42,8	-17,5	-72,5	-22,6	-33,6
66,0°	-36,3	-43,4	-41,6	-52,8	-31,2	-90,0	-37,7	-41,7
70,0°	-55,4	-53,3	-59,0	-63,0	-50,8	-108,1	-58,8	-50,1
73,0°	-84,0	-64,6	-82,9	-74,1	-79,1	-127,8	-89,1	-59,5
75,0°	-115,4	-75,7	-109,5	-84,3	-111,4	-145,9	-123,4	-68,3
76,0°	-138,2	-82,9	-128,4	-90,4	-134,6	-156,9	-147,9	-73,7
77,0°	-168,0	-91,4	-153,0	-97,7	-165,0	-170,0	-180,0	-80,2
78,0°	-207,9	-102,0	-185,6	-106,5	-205,4	-185,5	-222,5	-88,1
79,0°	-262,0	-115,5	-230,0	-116,8	-260,1	-204,1	-280,2	-97,6
80,0°	-336,4	-132,5	-292,2	-129,5	-336,3	-227,0	-360,4	-109,7

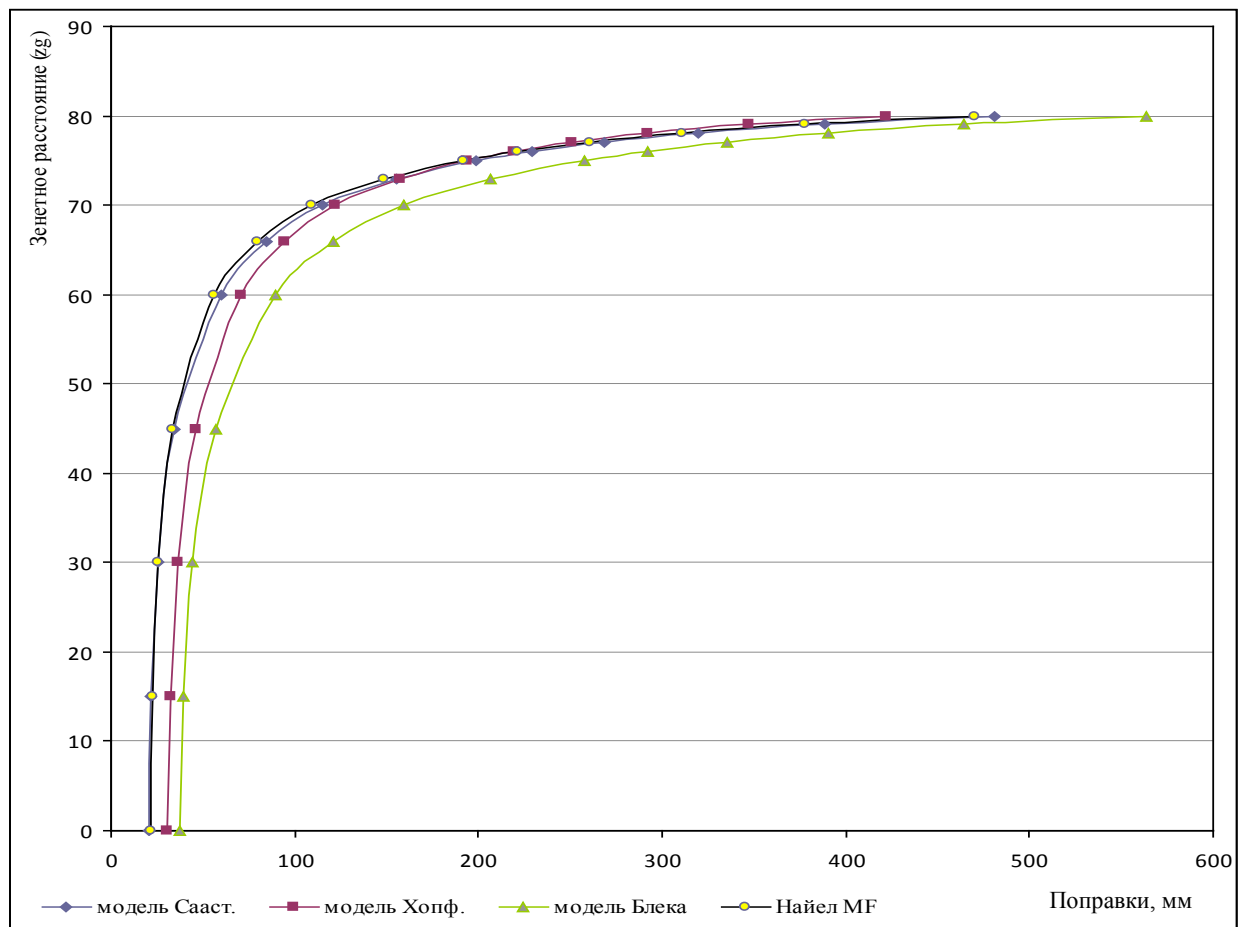


Рис. 2. Разности между ΔS_H , определенными методом численного интегрирования, и ΔS , вычисленными по разным моделям атмосферы при разных z_g в атмосфере Египта.

Рассмотренные методы определения поправок в расстояния в основном разработаны для светового диапазона электромагнитных волн (ЭМВ), большинство из этих методов для их реализации требуют характеристики атмосферной среды в текущих точках траектории ЭМВ, получить которую в момент наблюдения с высокой точностью практически невозможно.

В связи с изложенным возникает проблема высокоточного определения поправок в расстояния, измеренные в радиодиапазоне электромагнитного излучения по информации о состоянии атмосферы только в начальной и конечной точках траектории ЭМВ или только в точке приема сигнала при наблюдении объектов, расположенных за пределами атмосферы.

Для решения этой проблемы выполнен комплекс теоретических и экспериментальных (по моделям) разработок и исследований, позволяющих в итоге рекомендовать методику, легко реализуемую при ее практическом использовании.

Учет влияния атмосферы при измерении вертикальных расстояний и при спутниковом нивелировании для сухой составляющей поправки выполняется по формуле

$$\Delta S = -10^{-6} \int_{H_g}^{H_a} N dh. \quad (6)$$

Путем использования инварианта $NP/T = const$, уравнения Менделеева-Клапейрона, основного уравнения статики атмосферы и гидросферы по методике, изложенной в работах В.И. Куштина, получена формула

$$\Delta S_C = -10^{-6} \frac{N_{0C} T_0 R_C}{p_0} \int_{p_g}^{p_a} \frac{dp}{g} = -10^{-6} \frac{N_{0C} T_0 R_C}{p_0 g_C} (p_{Cg} - p_{Ca}) \sec z_C, \quad (7)$$

где N_{0C} – индекс преломления сухого воздуха при абсолютной температуре T_0 и давлении p_0 ; $R_C = 287,05287 \text{ м}^2/\text{с}^2\text{К}$ – удельная газовая постоянная смеси газов; p_{Cg} , p_{Ca} – давления в начальной и конечной точках траектории ЭМВ; g_C – среднеинтегральное значение ускорения силы тяжести. Принято $g_C = Q \cdot g_g$, где g_g – ускорение силы тяжести в пункте приема сигнала. Значение Q зависит от высоты. Для его определения выполнено специальное исследование с использованием метеорологических параметров на станции Хелуана и по методу наименьших квадратов. В результате получена формула

$$Q = 1 - \frac{0,01 H}{0,0263 H^2 - 0,03398 H + 46,5653}. \quad (8)$$

Эту формулу целесообразно использовать до высот 44 км, для высот более 44 км можно считать $Q = 0,995416$.

Погрешность определения Q приводит к ошибке вычисления ΔS_C на станции Хелуан не более 0,70 мм. Данные полученных формул использованы

при любых условиях атмосферы Египта на юге, на севере и в разное время года. Ошибки определения ΔS_C не превышают 1 мм.

Использование Q для экстремальных моделей атмосфер (для абсолютного минимума и абсолютного максимума температур) приводит к ошибке определения ΔS_C , равной -0,51 мм для абсолютного минимума и + 0,95 мм для абсолютного максимума. Следовательно, данные формулы верны для всех условий атмосферы Египта.

Подставляя в формулу (7) $N_{0C} = 77,624 \frac{P_0}{T_0}$, и $R_C = 287,05287 \text{ м}^2/\text{с}^2\text{К}$, при $z_g = 0^\circ$ получаем

$$\Delta S_C = -22,2822 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{g_g Q}. \quad (9)$$

При наблюдении объектов, расположенных на высотах более 70 км,

$$\Delta S_C = -22,3848 \frac{P_{Cg}}{g_g}. \quad (10)$$

Для определения g_g можно использовать формулу нормальной силы тяжести ($\text{м}/\text{с}^2$)

$$g_g = 9.7803266 (1 + 0.00530248 \sin^2 B - 0.00000585 \sin^2 2B), \quad (11)$$

где B – геодезическая широта. Если пункт приема сигнала расположен на высоте H , можно определять g по формуле

$$g = g_g \left(\frac{a}{a + H} \right)^2, \quad (12)$$

где a – радиус Земли.

Исследования показали, что формулы (9), (10) позволяют определять поправки в вертикальное расстояние ΔS_C с ошибкой менее 1 мм при любых метеорологических условиях, встречающихся в атмосфере Египта.

Для повышения точности определения поправок в расстояния выполнены теоретические разработки по определению сухой составляющей поправки по параметрам атмосферы Египта в начальной и конечной точках траектории ЭМВ. Использование теоремы о среднем значении при интегрировании позволило получить выражение

$$\Delta S_C = -22,2822 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{g_g Q} (\sec z)_C. \quad (13)$$

Для наклонных расстояний возникает необходимость определить среднеинтегральные значения $(\sec z)_C$, для чего использована модель однородных атмосфер. В результате получена формула высоты H_{Π} границы однородных атмосфер с учетом изменения ускорения силы тяжести с высотой

$$H_{II} = \frac{22,2822 \frac{P_g - P_a}{g_g Q} - N_a (H_a - H_g)}{N_g - N_a}. \quad (14)$$

Для определения $(\sec z)_C \approx \sec z_{II}$ с учетом известного инварианта для сферической атмосферы $a n \sin z = \text{константа}$ получено выражение

$$\sin z_{II} = \frac{a_g n_g \sin z_g}{a_{II} n_{II}}, \quad (15)$$

где a_g, n_g, z_g – радиус кривизны Земли, коэффициент преломления воздуха и зенитное расстояние в точке G приема сигнала. Радиус кривизны на высоте H_{II} можно определить по формуле

$$a_{II} = a_g + (H_{II} - H_g) = a_0 + H_{II}. \quad (16)$$

Для определения ΔS_C в наклонное расстояние за сухую составляющую индекса преломления с учетом $R_C = 287,05287 \text{ м}^2/\text{с}^2\text{К}$ получена формула

$$\Delta S_C = -22,2822 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{g_g Q} \sec z_{II}. \quad (17)$$

Для условий атмосферы Египта на станции Хелуана города Каира и зенитных расстояний z_g от 0° до 85° вычислены значения ΔS_C по формулам (14) - (17), и для этих же условий получены $\Delta S_{СИ}$ методом численного интегрирования по формуле Симпсона выражения

$$\Delta S_{СИ} = -10^{-6} \int_{H_g}^{H_a} N \sec z dH. \quad (18)$$

Анализ полученных результатов показал, что разности $\delta = \Delta S_C - \Delta S_{СИ}$ при зенитных расстояниях до 30° включительно не превышают 0,91 мм. При $z_g = 45^\circ$ эти разности достигают 2,35 мм, при $z_g = 60^\circ$ – 9,74 мм, при $z_g = 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ$ – 37,00; 90,13; 301,51 мм соответственно. Следовательно, при зенитных расстояниях $z_g \leq 30^\circ$ полученная формула (17) при условиях, близких к условиям атмосферы Египта, позволяет определять поправки в расстояние с ошибкой менее 1 мм.

Для уменьшения этих разностей δ при $z_g \geq 30^\circ$ целесообразно величину z_{II} в формуле (17) умножить на коэффициент K , т.е. значения ΔS_C определять по формуле

$$\Delta S_C = -22,2822 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{g_g Q} \sec K z_{II}. \quad (19)$$

Величину K можно определять по формулам

$$K = \frac{\arccos K z_{II}}{\arcsin z_{II}}, \quad (20)$$

где

$$\cos K z_{II} = \frac{\Delta S_C}{\Delta S_{СИ}} \cos z_{II}, \quad \sin z_{II} = \frac{a_g n_g \sin z_g}{a_{II} n_a}, \quad a_{II} = a_g + H_{II} \quad (21)$$

ΔS_C из формулы (21) определено по формуле (17), а $\Delta S_{СИ}$ – методом численного интегрирования.

В диссертации выполнены расчеты, результаты которых представлены в таблицах для $z_g = 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 81^\circ, 82^\circ, 83^\circ, 84^\circ, 85^\circ$ для высот от 1 до 32 км через 1 км, от 32 до 40 км – через 2 км, от 40 до 60 км – через 4 км и для высот от 60 до 100 км – через 10 км.

При наблюдении объектов, находящихся за пределами атмосферы, учитывая $Q = 0,995416, p_{Ca} = 0^\circ$, вместо формулы (17) имеем

$$\Delta S_C = -22,3848 \frac{p_{Cg}}{g_g} \sec K z_{II} = -22,3848 \frac{p_{Cg}}{g_g} \sec (1 + K' \cdot 10^{-5}) z_{II}. \quad (22)$$

Для определения K' путем аппроксимации их табличных значений по методу наименьших квадратов найдено выражение

$$K' = -0,6097 \sec^2 z_g + 53,399 \sec z_g + 13,306. \quad (23)$$

Сравнение значений ΔS_C , вычисленных по формуле (22) с учетом коэффициента K' по формуле (23), со значениями $\Delta S_{СИ}$, определенными методом численного интегрирование по формуле (18) при высоте 70 км для зенитных расстояний от 30° до 85° (табл. 3) показало, что разности $\delta = \Delta S_C - \Delta S_{СИ}$ не превышают 1,0 мм.

Таблица 3

Погрешность определения ΔS_C по формулам (22) и (23).

z_g	Значения K' , вычисленные		3 - 2	Значения ΔS_C , мм, вычисленные		$\delta, мм$ 5 - 6
	при $H =$ 70 км	по ф-ле (23)		по ф-ле (22)	числ. интегр.	
1	2	3	4	5	6	7
30°	15,8999			2675,97	2675,90	0,07
45°	77,3305			3276,44	3276,29	0,15
60°	116,7197	117,6652	0,9455	4629,86	4629,62	0,24
70°	165,0582	164,2221	-0,8361	6756,72	6756,40	0,32
75°	211,1723	210,5222	-0,6501	8908,86	8908,47	0,39
80°	300,5304	300,5988	0,0684	13190,68	13190,27	0,41
81°	329,5554	329,7422	0,1867	14601,97	14601,35	0,62
82°	365,2721	365,5157	0,2436	16351,27	16350,61	0,66
83°	410,218	410,4206	0,2026	18572,00	18571,27	0,73
84°	468,3233	468,3604	0,0371	21476,88	21476,05	0,83
85°	545,9336	545,7262	-0,2074	25425,59	25424,52	1,07

Следовательно, при условиях атмосферы Египта, при наблюдении объектов, находящихся на высотах 70 км и более, при z_g до 85° полученные формулы (22) и (23) позволяют определять поправки в расстояния за сухую составляющую с высокой точностью. При этом достаточно знать давление сухого воздуха и ускорение силы тяжести только в пункте приема электромагнитных волн.

Для более полного суждения о точности определения поправок ΔS_C в дальность по формулам (17), с учетом коэффициента K было выполнено сравнение значений ΔS_C , вычисленных для экстремальных моделей атмосферы, для абсолютного минимума и абсолютного максимума температур, по этим формулам и методом численного интегрирования строгой формулы (18).

В результаты выполненных исследований получены формулы для вертикальных расстояний:

Для абсолютного минимума температур

$$\Delta S_C = -2,275838 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{Q_{мин.}}, \quad (24)$$

где $Q_{мин.} = 1 - \frac{H}{3,56 H^2 - 54,866 H + 5830,78}$,

и для абсолютного максимума температур

$$\Delta S_C = -2,275838 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{Q_{макс.}}, \quad (25)$$

где $Q_{макс.} = 1 - \frac{H}{20,49 H^2 + 16,49 H + 4111,48}$.

При зенитных расстояниях z_g , отличных от нуля, значения ΔS_C при экстремальных условиях атмосфер Египта определяют по формулам:

для абсолютного минимума температур

$$\Delta S_C = -2,275838 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{Q_{мин.}} \sec K_{мин.} z_{П} \quad (26)$$

и для абсолютного максимума температур

$$\Delta S_C = -2,275838 \frac{P_{Cg} - P_{Ca}}{Q_{макс.}} \sec K_{макс.} z_{П}. \quad (27)$$

Для определения значения $K_{мин.}$ и $K_{макс.}$ использованы формулы (20) и (21) при экстремальных условиях атмосферы и выполнены расчеты, результаты которых представлены в таблицах в диссертации для $z_g = 45^\circ, 60^\circ, 70^\circ, 75^\circ, 80^\circ, 81^\circ, 82^\circ, 83^\circ, 84^\circ, 85^\circ$ для высот от 1 до 26 км через 1 км, от 26 до 40 км – через 2 км, от 40 до 60 км – через 4 км и для высот от 60 до 100 км – через 10 км.

При наблюдении объектов, находящихся за пределами атмосферы, при экстремальных условиях атмосферы Египта получены формулы:

для абсолютного минимума температур

$$\Delta S_{C_{\min.}} = -22,376419 \frac{P_{Cg}}{g_g} \sec K_{\min.} z_{II}, \quad (28)$$

где $K'_{\min.} = -0,4838 \text{ sec}^2 z_g + 45,515 \text{ sec } z_g + 7,9818$ и $K_{\min.} = 1 + K'_{\min.} \cdot 10^{-5}$,

и для абсолютного максимума температур

$$\Delta S_{C_{\max.}} = -22,393893 \frac{P_{Cg}}{g_g} \sec K_{\max.} z_{II}, \quad (29)$$

где $K'_{\max.} = -0,6862 \text{ sec}^2 z_g + 57,852 \text{ sec } z_g + 15,747$ и $K_{\max.} = 1 + K'_{\max.} \cdot 10^{-5}$.

Исследования показали, что погрешности определения ΔS_C по формулам (28) и (29) не превышают 1,28 мм для абсолютного минимума температур и 0,93 мм для абсолютного максимума температур при z_g до 85° и при наблюдении объектов за пределами атмосферы Египта, что свидетельствует о достаточной точности этих формул.

В четвертой главе рассмотрено определение влажной составляющей поправки в расстояние за замедление скорости радиоволн в атмосфере Египта.

Б. Бин и Е. Даттон для учета влияния атмосферы предлагают для радиоволн использовать би-экспоненциальную модель индекса преломления в тропосфере:

$$N = N_C + N_B = N_{Cg} \exp\left(-\frac{H}{H_C}\right) + N_{Bg} \left(-\frac{H}{H_B}\right), \quad (30)$$

где N_{Cg} , N_{Bg} – значения сухой и влажной составляющей компонент на земной поверхности; H_C , H_B – масштабы высот для данных компонент соответственно.

После анализа средних значений N_{Bg} с помощью методов наименьших квадратов, Бин и Даттон предложили, что значение H_B составляет 2,5 км.

Данная модель использована для определения влажной составляющей поправки в вертикальное расстояние при масштабе $H_B = 2,5$ км на материале данных Египта.

Результаты исследований показывают, что разности поправок в вертикальные расстояния, полученные методом численного интегрирования по значениям индексам преломления

$$N_B = \left(64,70 + \frac{371896}{T}\right) \frac{e}{T}$$

и

$$N'_B = N_{Bg} \exp\left(-\frac{H}{H_B}\right),$$

колеблются от 5,38 мм (4,9% от ΔS_B) для $H = 11,0$ км на станции Асуана, на юге страны, до 16,82 мм (6,7% от ΔS_B) для $H = 11,0$ км на станции Марси-Матрух, на севере страны. Отклонения, полученные на станции Хелуана при высоте до 11,0 км в августе, достигают 11,96 мм (5,33% от ΔS_B), а в феврале при $H = 12,0$ км достигают $-5,22$ мм (5,8% от ΔS_B). Следовательно, точность определения влажной поправки ΔS_B по данной модели при масштабе $H_B = 2,5$ км во многих случаях в условиях атмосфере Египта является недостаточно точной.

Рассмотрены формулы, позволяющие описывать распределение влажности с высотой. Данные формулы получены в 1889 г. Ганном по материалам наблюдений в Альпах, в 1900 г. - немецким ученым Зюрингом, в 1945 г. - советским ученым Хргианом.

Значения e , вычисленные при высотах до 15 км в условиях атмосферы Египта по формулам Ганна и Зюринга, имеют удовлетворительную сходимость (наибольшая разность 1,19 гПа на высоте 4 км).

В работе приведена таблица среднего распределения метеорологических параметров атмосферы Египта (давления, влажности и температуры) на станции Хелуана и значения e (гПа) при высотах до 15 км в разное время года. Выполнено сравнение значений e со значениями, вычисленными по формулам Ганна, Зюринга и по формуле Хргиана. Анализ результатов показал, что значения e , полученные по этим формулам, имеют примерно одинаковую точность. Формулы Зюринга и Хргиана во всех случаях дают результаты с ошибками, что свидетельствует о том, что коэффициенты A и B в этих формулах не согласуются со значениями e , полученными практически на метеостанциях Египта.

В связи с этим возникла необходимость получить формулы, которые позволяли бы определять значения e на разных высотах с более высокой точностью в условиях атмосферы Египта.

Специальные исследования показали, что наиболее хорошая аппроксимация может быть представлена выражением

$$e = e_0 \exp\left(-\frac{H^b}{A}\right) = e_0 \exp(-aH^b). \quad (31)$$

Коэффициенты a и b определены по методу наименьших квадратов по средним для различных сезонов значениям e на территории Египта. В результате исследований получены:

для зимы	$a = 0,5258,$	$b = 1,0597;$
для весны	$a = 0,5730,$	$b = 1,1030;$
для лета	$a = 0,6736,$	$b = 0,9885;$
для осени	$a = 0,5564,$	$b = 1,0624.$

Исследования также показали, что значения a и b в зависимости от времени t в месяцах (1 января принимается за ноль) можно аппроксимировать выражениями

$$a = 0,5081 + 0,1228 \sin [15(t - 0,5)]; \quad (32)$$

$$b = 1,0533 + 0,01082 \sin [30(t + 4)]. \quad (33)$$

Кроме того, исследования показали, что формулы (31) - (33) позволяют с высокой точностью определять упругость водяного пара при любых условиях атмосферы Египта.

Для определения влажной поправки в дальность ΔS_B методом численного интегрирования можно использовать формулу

$$\Delta S_B = - \int_{H_g}^{H_a} N_B (\sec z) dH = - \int_{H_g}^{H_a} \frac{e}{T} \left(64.700 + \frac{371896}{T} \right) (\sec z) dH, \quad (34)$$

где H – в км и ΔS_B - в мм.

Формулу (34) целесообразно использовать при наличии высокоточного высотного профиля влажности и температуры. Если информация о распределении e и T отсутствует, то наряду с использованием эмпирических формул e имеет смысл получить формулы для непосредственного определения влажной составляющей поправки в дальность.

В диссертации для вывода формулы влажной составляющей поправки в расстояние ΔS_B использована теория метода однородных атмосфер. Атмосферу разбивают на участки (слои), в каждом из которых индекс преломления N_B является величиной постоянной, равной его значению на нижней границе слоя. При разбиении атмосферы или ее части на два слоя имеем формулу

$$\Delta S_B = N_{Bg} S_g + N_{Ba} S_a, \quad (35)$$

где N_{Bg} , N_{Ba} – индекс преломления влажной составляющей в слоях g и a ; S_g , S_a – длина пути траектории ЭМВ в слоях g и a , соответственно.

Для вертикальных расстояний получим формулу

$$\Delta S_B = H_a \left[0,5(N_{Bg} + N_{Ba}) - q(N_{Bg} - N_{Ba}) \right]. \quad (36)$$

В этой формуле все аргументы, кроме q , имеют отношение к начальной и конечной точкам траектории ЭМВ. Величина $q = QH \cdot 10^{-3}$; Q зависит от высоты H и, как показали исследования, хорошо аппроксимируется выражением

$$Q = 20,060649 \left[1 + 0,11079 H_a (1 - 0,068885 H_a) \right]. \quad (37)$$

В итоге для вертикальных расстояний получена формула:

$$\Delta S_B = H_a \left[0,5(N_{Bg} + N_{Ba}) - 0,020061 H_a (N_{Bg} - N_{Ba}) \left\{ 1 + 0,11079 H_a (1 - 0,068885 H_a) \right\} \right], \quad (38)$$

а при $N_{Ba} = 0$, имеем формулу

$$\Delta S_B = H_a \left[\frac{N_{Bg}}{2} - 0,020061 H_a N_{Bg} \{1 + 0,11079 H_a (1 - 0,068885 H_a)\} \right]. \quad (39)$$

Выполнено сравнение значений ΔS_B , определенных по полученным формулам (37), (38) и методом численного интегрирования на разных станциях на территории Египта. Анализ результатов показал, что разности $\delta = \Delta S_B - \Delta S_{BH}$ на станции Асуана увеличиваются с высотой и достигают 0,98 мм при высотах до 8,0 км и уменьшаются до 0,42 мм при $H = 15,0$ км, а на станции Марси-Матрух эти разности достигают 0,79 мм при $H = 8,0$ км и уменьшаются до 0,14 мм при высотах до 15,0 км, т.е. являются небольшими. Эти формулы целесообразно использовать для определения поправки в вертикальную дальность при учете влажной составляющей в условиях атмосферы всей территории Египта.

Для определения поправок ΔS_B за влажную составляющую в наклонные расстояния в диссертации получена формула:

$$\Delta S_B = \Delta S_{B0} \sec z_{II}, \quad (40)$$

в которой

$$z_{II} = z_g \left[1 - \frac{1}{28,40 z_g - 10670 + \frac{744000}{z_g}} \right], \quad (41)$$

где зенитные расстояния z_g в пункте приема сигнала выражены в градусах дуги.

Сравнение значений ΔS_B , определенных по формулам (40), (41) и методом численного интегрирования при $H = 11,0$ км на станции Хелуана, город Каир, месяц июль за период с 1990 по 2005 гг. показало, что при z_g до 60° полученные значения ΔS_B совпадают и при z_g до 85° различаются на величину менее 1 мм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная диссертационная работа содержит исследования и разработки, направленные на решение важной для геодезической науки и практики и других областей знаний научно-технической проблемы повышения точности результатов измерения расстояний на территории Египта радиоэлектронными системами путем учета влияния атмосферы, определения поправок за задержку сигнала в атмосфере страны только по информации об атмосфере в начальной и конечной точках траектории радиоволн или у приемника излучения, если наблюдаемый объект расположен за пределами атмосферы на высотах более 70-100 км.

Основные результаты и выводы работы заключаются в следующем:

1. Выполнен анализ существующих методов учета влияния атмосферы на результаты измерений расстояний с помощью радиоволн для климатических

условий Египта. Показано, что использование известных формул и моделей Ю. Саастамойнена, Х. Хопфильда, Г. Блэка, А. Найлла и других авторов возможно только при небольших зенитных расстояниях до 60° .

2. Выполнены обширные исследования по распределению парциального давления пара в атмосфере Египта. Получены эмпирические формулы, обеспечивающие с высокой точностью определение величины упругости водяного пара на различных высотах.
3. Выполнены теоретические и экспериментальные исследования (на моделях) по высокоточному определению поправок в расстояния отдельно для сухой и влажной составляющих индекса преломления. Для определения вертикальных расстояний на территории Египта получены оригинальные формулы, позволяющие практически безошибочно определять сухую и влажную поправки при любых атмосферных условиях страны, включая и экстремальные.
4. Получены формулы поправок в наклонные расстояния (при зенитных расстояниях от 0° до 85°), позволяющие определять сухую и влажную составляющие поправки в расстояния, как при средних, так и при экстремальных метеорологических характеристиках, встречающихся на территории страны, с ошибкой не более 1,30 мм.

Результаты данной работы в дальнейшем могут быть использованы при определении расстояний от пунктов на земной поверхности Египта до созвездия спутников (системы GPS или ГЛОНАСС) для получения координат пунктов с более высокой точностью, а следовательно, при создании и совершенствовании геодезической сети Египта.

**Основные положения диссертационного исследования опубликованы
в следующих работах:**

1. Собхи А.А.Ю. Эмпирические формулы изменения упругости водяного пара с высотой в атмосфере Египта. Интернет-вестник ВолгГАСУ. Политематическая сер., 2008г., Вып. 2(7), 7с.
2. Собхи А.А.Ю. Определение поправки в дальность за замедление скорости радиоволн в атмосфере Египта. Международная научно-техническая конференция «Геодезия, Картография и Кадастр – XXI век». М.: Московский государственный университет геодезии и картографии. 2009г.
3. Собхи А.А.Ю. Исследование по распределению относительной влажности воздуха и парциального давления водяного пара в атмосфере Египта. Материалы юбилейной международной научно-практической конференций «Строительство-2009». Ростов-н/Д: РГСУ, 2009г., С. 110-111.
4. Собхи А.А.Ю. Определение поправок в расстояние вследствие замедления скорости радиоволн в атмосфере Египта. Известия вузов «Геодезия и

аэрофотосъемка». – М.: Московский государственный университет геодезии и картографии, 2009г., № 4, С. 10 – 14.

5. Собхи А.А.Ю. Учет влияния влажности атмосферы при определении координат пунктов наблюдения. Известия вузов «Северо-Кавказский регион». Естественные науки, 2009г., № 5, С. 62 - 65.

6. Собхи А.А.Ю. Определение сухой составляющей поправки в дальность за замедление скорости радиоволн в атмосфере Египта. Известия РГСУ. – Ростов-н/Д.: РГСУ, 2009г., № 13, С. 154 - 165.

Подписано в печать формат 60x84/16.

Бумага писчая. Ризограф. Уч. – изд. Л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ №

Редакционно-издательский центр

Ростовского государственного строительного университета

344022, г. Ростов-на-Дону, ул. Социалистический, 162