



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА

На тему **Исследование точности определения влагосодержания
атмосферы по данным дистанционного ГНСС-зондирования**

Исполнитель Коваленко Дарья Владимировна

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

«02» июня 2017 г.

Санкт-Петербург — 2017



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

**федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования**

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Кафедра экспериментальной физики атмосферы

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
БАКАЛАВРА**

На тему **Исследование точности определения влагосодержания
атмосферы по данным дистанционного ГНСС-зондирования**

Исполнитель Коваленко Дарья Владимировна

Руководитель кандидат физико-математических наук, доцент

Чукин Владимир Владимирович

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

(подпись)

доктор физико-математических наук, профессор

Кузнецов Анатолий Дмитриевич

« ____ » _____ 20 ____ г.

Санкт-Петербург — 2017

Содержание

	Сокращения	4
	Введение	5
1	Методы дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере	6
1.1	Датчики влажности воздуха автоматических метеорологических станций	6
1.1.1	Датчик влажности и температуры HMP155	6
1.1.2	Датчик влажности и температуры HMP110	10
1.1.3	Передачики влажности и температуры HMD60/70	11
1.2	Аэрологическое зондирование содержания водяного пара в атмосфере	14
1.2.1	Психрометрический метод	14
1.2.2	Сорбционный метод	14
1.2.3	Метод точки росы	15
1.3	Лидарное зондирование водяного пара	15
1.4	Спутниковое зондирование водяного пара	18
1.4.1	Спутниковый метод измерения в ИК-области спектра	18
1.4.2	Спутниковый метод микроволнового зондирования атмосферы	19
1.5	ГНСС зондирование водяного пара	19
2	Глобальные навигационные спутниковые системы	21
2.1	Основные спутниковые навигационные системы	22
2.2	Принцип работы спутниковых навигационных систем	23
3	Методика определения влагосодержания атмосферы по данным радиозондирования атмосферы	24
3.1	Формат аэрологических данных	24
3.2	Программное обеспечение для обработки аэрологических данных	24
3.3	Результаты определения влагосодержания атмосферы	24
4	Определение влагосодержания атмосферы по ГНСС-данным	26

4.1	Тропосферная задержка радиосигнала	26
4.2	Гидростатическая задержка радиосигнала	28
4.3	Расчет влагосодержания атмосферы	30
4.4	Результаты определения влагосодержания атмосферы	30
4.5	Сопоставление аэрологических и ГНСС-данных	32
	Заключение	36
	Список использованных источников	37
	Приложение А	39
	Приложение Б	42
	Приложение В	45

Сокращения

ДЗ — дистанционное зондирование

ЭМИ — электромагнитное излучение

АМС — автоматические метеорологические станции

КА — космический аппарат

НАСА — национальное управление по авиации и исследованию
космического пространства

ИСЗ — искусственный спутник Земли

ГНСС — глобальной навигационной спутниковой системы

НАП — навигационная аппаратура потребителей

НКА — навигационная космическая аппаратура

НИСЗ — навигационные искусственные спутники Земли

Введение

Исследование состояния атмосферы имеет своей целью установление объективных закономерностей, отражающих физические явления, происходящие в атмосфере Земли. Для достижения этой цели выделяют два научных направления: физика свободной атмосферы и методы ее исследования.

В последнее время развитие науки и техники позволило получать обширные объемы информации о содержании водяного пара в атмосфере на основе использования разнообразных методов зондирования и атмосферы других планет, использовать в природных условиях новые приборы и методы измерений.

Исследования по верификации новых методов зондирования водяного пара, особенно в полярных условиях, являются актуальными в свете освоения территории Арктики.

Целью работы является оценка точности определения влагосодержания атмосферы методом ГНСС — радиозондирования атмосферы.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. осуществить обзор методов зондирования содержания водяного пара в атмосфере;
2. провести сбор аэрологических и ГНСС-данных за сентябрь 2016 года в пунктах: Норильск, Тикси, Москва, Новосибирск;
3. обработать полученные данные;
4. выполнить сравнительный анализ данных измерений содержания водяного пара;
5. сделать выводы по полученным результатам.

Работа состоит из введения, заключения, четырех глав и приложений.

1. Методы дистанционного зондирования водяного пара в атмосфере

1.1 Датчики влажности воздуха автоматических метеорологических станций

Автоматические метеорологические станции (АМС) выполняют круглосуточные автоматические измерения метеорологических параметров атмосферы в заданной точке местности и производят передачу результатов измерений для обработки.

Станция включает измерители метеорологических параметров таких как скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, давление, радиационный гамма-фон, общая солнечная активность, уровень осадков и др.

В настоящее время используются множество различных датчиков влажности в АМС. Рассмотрим некоторые из них.

1.1.1 Датчик влажности и температуры HMP155

Датчик Vaisala HUMICAP® HMP155 предназначен для измерения влажности и температуры.



Рисунок 1.1 — Датчик Vaisala HUMICAP® 155

HMP155 оборудован датчиком Vaisala HUMICAP. Датчик имеет прочную конструкцию и защищен фильтром с тефлоновым покрытием, обеспечивающим максимальную защиту от воды, пыли и загрязнений. Размеры прибора приведены на рисунке 1.2.

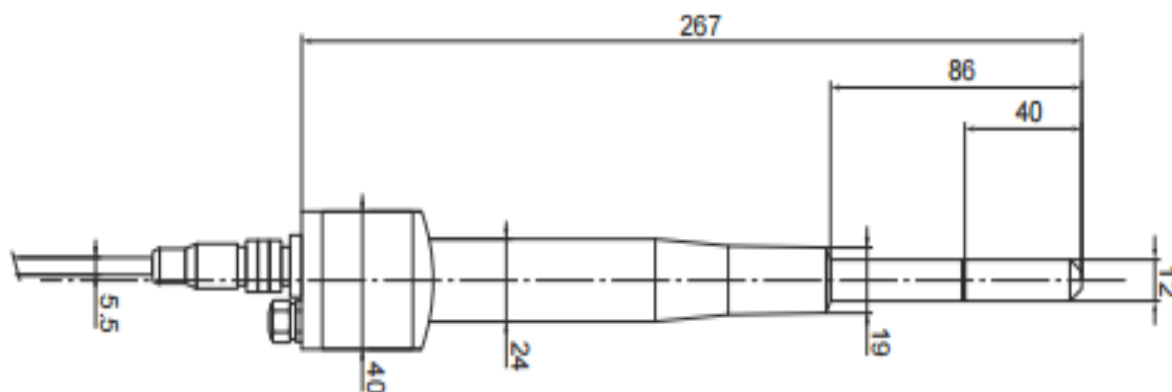


Рисунок 1.2 — Размеры датчика HMP155

Надежное измерение влажности – непростая задача в условиях, когда влажность близка к насыщению. Измерения могут искажаться туманом, водяной пылью, дождем и обильной росой. Влажный прибор может давать неточные показания параметров окружающего воздуха.

Именно для подобных условий окружающей среды фирма Vaisala разработала и запатентовала конструкцию датчика со встроенным обогревом. Поскольку измерительная (сенсорная) головка датчика постоянно обогревается, уровень влажности внутри прибора всегда ниже уровня влажности наружного воздуха. Это, в свою очередь, снижает риск конденсации влаги на приборе.

HMP155 с дополнительным быстрореагирующим датчиком температуры является идеальным прибором для измерения окружающей среды с постоянными колебаниями температур. Новый мембранный фильтр увеличивает быстродействие при измерении относительной влажности.

Датчик можно откалибровать с использованием персонального компьютера и кабеля USB с помощью кнопок или индикатора MI70, что обеспечивает простоту обслуживания.

Таблица 1.1 — Основные технические характеристики датчика влажности и температуры НМР155

<i>Относительная влажность</i>	
Диапазон измерений	0...100%
Точность (включая нелинейность, гистерезис и сходимостъ) при +15...+25 °С +20...+40 °С -40...-20 °С +40...+60 °С -60...-40 °С	±1% (0...90%) ±1,7% (90...1000%) ±(1.0+0.008×показание)% ±(1.2+0.012×показание)% ±(1.2+0.012×показание)% ±(1.4+0.032×показание)%
Погрешность заводской калибровки (+20 °С)	±0.6% (0...40%) ±1.0% (40...97%)
Время срабатывания при +20 °С в безветренных условиях, с фильтром с тефлоновым покрытием 63% 90%	20 с 60 с
<i>Температура</i>	
Диапазон измерений	-80...+60 °С
Время реагирования с дополнительным датчиком температуры при потоке воздуха 3 м/с 63% 90%	<20 с <35 с
Вес датчика	86 г

1.1.2 Датчик влажности и температуры HMP110



Рисунок 1.3 — Датчик влажности и HMP110

HMP110 является простым и экономичным датчиком влажности с высокой точностью измерения влажности воздуха и хорошей стабильной работой. HMP110 подходит для аккумуляторов из-за его очень низкого энергопотребления. Это также влияет на быстрое время запуска.

Основные технические характеристики указаны в таблице 1.2.

Таблица 1.2 — Основные технические характеристики датчика влажности и температуры НМР110

<i>Относительная влажность</i>	
Диапазон измерений	0...100%
Точность (включая нелинейность, гистерезис и сходимостъ) при 0...+40 °С +40...+80 °С -40...0 °С	±1.5% (0...90%) ±2.5% (90...100%) ±3% (0...90%) ±4% (90...100%) ±3% (0...90%) ±4% (90...100%)
Погрешность заводской калибровки (+20 °С)	±1.1% (0...90%) ±1.8% (90...100%)
<i>Температура</i>	
Диапазон измерений	-40...+80 °С
Вес датчика	28 г

1.1.3 Передатчики влажности и температуры НМД60/70

Передатчики НМД60 и НМД70 предназначены для мониторинга относительной влажности и температуры. Прибор сочетает высокую точность, стабильность и надежность в эксплуатации. Также передатчик 60/70 устойчив к загрязнению химическими веществами и пылью. Замена электроники возможна без снятия блока .



Рисунок 1.4 — Передатчики влажности и температуры НМР60/70

Передатчики НМД60 и 70 доступны в трех модификациях:

- 1) U - для измерения влажности;
- 2) Y - для влажности и температуры;
- 3) T - для измерения температуры.

Быстрая калибровка на месте и точность передатчиков обеспечивают многолетнюю работу прибора. Калибровка датчика может быть выполнена в секунды. Размеры прибора приведены на рисунке 1.5. Основные технические характеристики приведены в таблице 1.3.

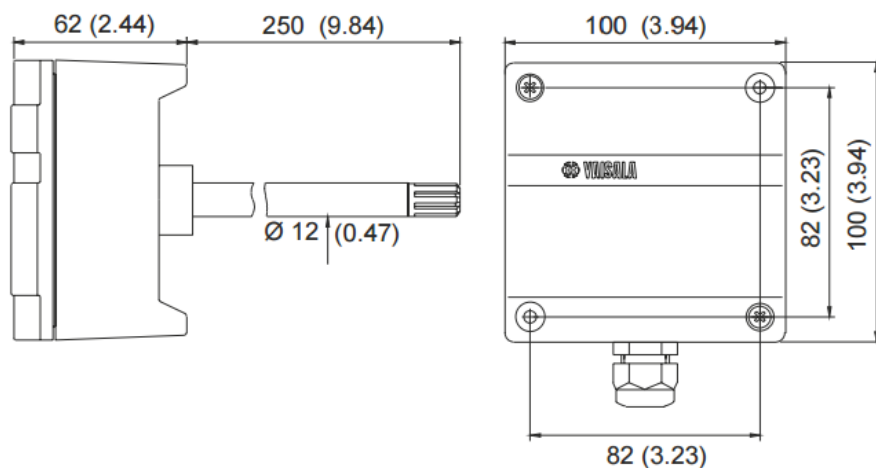


Рисунок 1.5— Размеры датчика HMP60/70

Таблица 1.3 — Основные технические характеристики передатчика
влажности и температуры HMD60/70

Относительная влажность	
Диапазон измерений	Диапазон
Погрешность заводской (+20 °C): влажности температуры	The graph shows the measurement error $\Delta \%RH$ on the y-axis (ranging from -3 to 3) against relative humidity $\%RH$ on the x-axis (ranging from 0 to 100). The error is constant at $\pm 1.5\%$ for $\%RH$ values between 10 and 90. The graph shows the measurement error $\Delta \%RH$ on the y-axis (ranging from -2.0 to 2.0) against temperature $^{\circ}C$ on the x-axis (ranging from -20 to 80). The error is $\pm 1.5\%$ for temperatures between -20 and 40 $^{\circ}C$, and $\pm 1.3\%$ for temperatures between 40 and 80 $^{\circ}C$.
Время срабатывания при +20 °C, 90 %	15 с

1.2 Аэрологическое зондирование содержания водяного пара в атмосфере

Во время аэрологического зондирования атмосферы измерения проводят не в одном месте, как полагается при наземных метеорологических измерениях, а еще осуществляется движение измерительного зонда по вертикальной и горизонтальной оси. Существуют три основных метода измерения влажности: психрометрический, сорбционный и метод точки росы.

1.2.1 Психрометрический метод

Суть психрометрического метода заключается в том, что влажность воздуха определяют по показаниям двух термометров: сухого и смоченного. С поверхности материи смоченного термометра происходит испарение воды со скоростью, которая зависит от дефицита влажности в атмосфере. Из-за затрат тепла на испарение показания смоченного термометра будут ниже показаний сухого.

Недостатком этого метода являются погрешности измерений влажности при положительной температуре. Это видно из данных таблицы 1.4:

Таблица 1.4 — Погрешность измерения влажности при различных температурах

t, °C	30	20	10	0	-10	-20	-30
Ошибка, %	0.6	0.8	1.1	1.7	3	6	13

1.2.2 Сорбционный метод

Сущность сорбционного метода заключается в том, что используются свойства поглощения влаги некоторыми телами из окружающей среды, и из-за этого изменяют свои размеры и электропроводность в зависимости от степени насыщения окружающего воздуха водяным паром. Сенсоры сорбционного типа в зависимости от механизма сорбции можно разделить на четыре типа :

1. деформационные (волосные и пленочные);
2. электролитические;
3. оксидно-алюминиевые;
4. керамические.

1.2.3 Метод точки росы

Суть метода заключается в определении температуры поверхности, покрытой водой или льдом при условии динамического равновесия системы пар-вода или пар-лед. В основе метода лежит зависимость давления насыщения водяного пара над плоской поверхностью воды или льда от температуры воздуха. По измерениям температуры поверхности определяется парциальное давление водяного пара.

Следовательно, можно сделать вывод о том, что метод точки росы обладает высокой чувствительностью при положительных и при отрицательных температурах, что и показано в таблице 1.5.

Таблица 1.5 — Чувствительность (К/%) метода точки росы при различных температурах и относительной влажности

r, %	t, °C			
	-80	-40	0	40
100	0.06	0.09	0.12	0.18
10	0.6	0.9	1.2	1.8

Метод точки росы на сегодняшний день является единственным надежным методом измерения влажности низких при низких температурах, так как все остальные методы при таких условиях не обеспечивают большой точности измерений.

1.3 Лидарное зондирование водяного пара

Лидарные измерения профиля влажности на основе метода

дифференциального поглощения развиваются в нескольких направлениях. К первому относится создание лидаров с лазером на рубине и термической перестройкой длины волны излучения в диапазоне 694.2-694.5 нм. Передатчик лидара позволил в отдельных случаях при наземном зондировании определить профиль водяного пара до высоты 17 км. Передатчик имеет следующие основные параметры:

- 1) энергия излучения 0.1 Дж;
- 2) длительность импульса 30 нс;
- 3) воспроизводимость длины волны излучения $5 \cdot 10^{-4}$ нм;
- 4) полуширина линии излучения 10^{-3} нм.

За рубежом развивается метод дифференциального поглощения для определения паров воды в инфракрасной области спектра. Вертикальные измерения концентрации водяного пара в атмосфере до высоты 9 км с погрешностью примерно 15% при пространственном разрешении 300 м и времени измерений 50 мин были проведены с использованием лидара, основные параметры которого приведены в таблице 1.6.

Таблица 1.6 — Основные параметры лидара для измерений паров воды

Параметр	Значение
<i>Передатчики</i>	
Энергия излучения	70 мДж
Длительность импульса	12 нс
Спектральная ширина линии излучения (при $\lambda=724$ нм)	1.5 нм
Частота импульсов	10 Гц
Расходимость луча	0.5 мрад
<i>Приемник</i>	
Диаметр телескопа	0.6 м
Угол поля зрения	3 мрад
Спектральная ширина интерференционного фильтра	2.4 нм
Число каналов	256

Поперечные сечение поглощения парами воды составляют $1.9 \cdot 10^{-23}$ см² на длине волны 723.2 нм и $9 \cdot 10^{-23}$ см² на 723.3 нм.

Пары воды интенсивно поглощают излучения в области спектра 9.2-11.9 мкм, где лежит излучение СО₂-лазеров на изотопах ¹²С¹⁶О₂, ¹³С¹⁶О₂, ¹⁴С¹⁶О₂. В указанной области спектра разработан передатчик, используемый в лидаре с гетеродинным приемом. В отличие от прямого фотодетектирования метод гетеродинирования позволяет увеличить дальность действия системы в 5 раз при снижении энергии импульсов лазера примерно на порядок. Лазер-передатчик и лазер-гетеродин излучают на линиях R (20) и R (18), которые совпадают с полосами поглощения воды.

Среди перечисленных методов дифференциального поглощения для определения концентрации паров воды в атмосфере наибольшее признание получил метод с применением лазера, излучающего в области 724 нм.

В качестве первого этапа технической реализации спутниковых лидарных систем и отработки при этом многих методических вопросов можно рассматривать самолётные лидары.

В лидарную систему входят два двухчастотных Nd-лазера, служащих для оптической накачки двух независимо регулируемых лазеров на красителе. Длина волны излучения лазеров регулируется в области 710-960 нм. Один лазер настраивается на линию поглощения H_2O около 720 нм, длина волны излучения другого лазера лежит вне линии поглощения. Временной интервал между импульсами обоих лазеров 100 мкс. Приемная система лидара содержит: телескоп Кассегрена диаметром 35 см, светофильтр, фотоумножитель и блок обработки данных. С помощью описанной лидарной системы можно измерять концентрацию водяного пара в пограничном слое атмосферы, в средней и верхней тропосфере и в районе тропопаузы.

1.4 Спутниковое зондирование водяного пара

1.4.1 Спутниковый метод измерения в ИК-области спектра

Данный метод разработан для измерения водяного пара в средней тропосфере и выше и основан на излучении электромагнитных волн молекулами на длине волны 6.7 мкм. Большинство метеорологических спутников оборудованы инфракрасными радиометрами водяного пара. Но в большинстве случаев измерения влагосодержания по ИК-радиации невозможны при наличии облаков. На борту геостационарных спутников METEOSAT установлен радиометр SEVIRI с двумя каналами на длинах волн 6.2 и 7.3 мкм. Спутники NOAA и Meteor также имеют прибор HIRS, регистрирующий излучение на длинах волн 6.7–8.2 мкм. Геостационарные спутники GOES и GMS-5 располагают прибором VAS, который осуществляет измерения на длинах волн 6.7 и 7.3 мкм.

1.4.2 Спутниковый метод микроволнового зондирования атмосферы

Оценка влагосодержания атмосферы может быть осуществлена по данным микроволновых сенсоров, с помощью которых можем получать информацию при любой погоде. Данный метод основан на эффекте поглощения водяным паром электромагнитных волн в диапазоне частот от 20 до 200 ГГц, который связан вращательным переходом молекулы воды на 22.235 ГГц и более сильным переходом на 183.31 ГГц. Также в этой области спектра наблюдается поглощение в «крыльях» полос поглощения водяным паром в ИК области спектра. Существует большое количество типов микроволновых приборов, устанавливаемых на спутниках, таких как SSM/I на спутниках DMSP, AMSR-E на спутнике Aqua и AMSU-A, AMSU-B на NOAA [4].

1.5 ГНСС зондирование водяного пара

Метод радиопросвечивания атмосферы предполагает определение параметров атмосферы по результатам измерений пространственных задержек радиосигналов, которые распространяются через слой атмосферы от спутника к наземному приемнику из-за уменьшения фазовой скорости радиоволн за счет эффектов поляризации молекул азота, кислорода, углекислого газа и водяного пара [5]. Источников радиосигналов служат навигационные сигналы космических аппаратов глобальной навигационной спутниковой системы (ГНСС). ГНСС на сегодняшний день состоит из двух радионавигационных систем: ГЛОНАСС (Россия) и GPS (США). Также в стадии разработки находятся такие системы, как: Galileo (евросоюз), Compas (Китай), QZSS (Япония).

Использование информации с сети наземных приемных ГНСС-станций позволяет определять задержки радиосигналов с более высокой точностью за счет использования групповой обработки результатов фазовых измерений

псевдодальности до спутников[5].

Более подробно данный метод рассматривается в четвертой главе.

2. Глобальные навигационные спутниковые системы

Основное назначение ГНСС - глобальная навигация приземных подвижных объектов.

В ГНСС применяются навигационные космические аппараты (НКА) на круговых геоцентрических орбитах с высотой около 20000 км над поверхностью Земли.

ГНСС состоит из космического сегмента, сегмента управления и сегмента потребителей. На рисунке 2.1 изображены три сегмента ГНСС GPS:

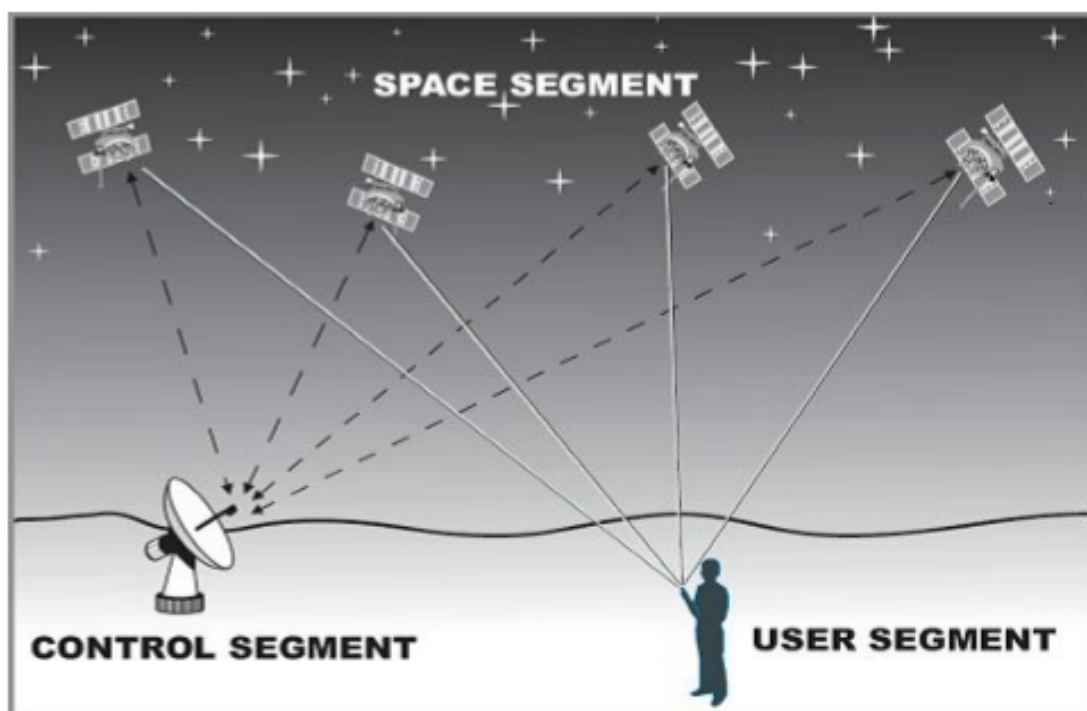


Рисунок 2.1 — сегменты ГНСС GPS

2.1 Основные спутниковые навигационные системы

Полная орбитальная группировка (ОГ) ГЛОНАСС содержит 24 НКА на круговых орбитах 64.8° в трех орбитальных плоскостях по восемь НКА в каждой. Период обращения НКА равен $T = 11 \text{ ч } 15 \text{ мин } 44 \text{ с}$, и, соответственно, номинальная высота круговой орбиты составляет 19100 км над поверхностью Земли.

Космический сегмент ГНСС GPS образован орбитальной группировкой, состоящей из 31 основных НКА и 3-х резервных НКА. НКА находятся на 6 круговых орбитах высотой примерно 20000 км, наклонением 55° и равномерно разнесенных по долготе через 60° .

Орбитальная группировка НКА с несинхронными круговыми орбитами в системе ГЛОНАСС более стабильна по сравнению с ОГ НКА с синхронными круговыми орбитами в системе GPS. Орбитальное построение ГЛОНАСС и GPS можно представить как на рисунке 2.2.

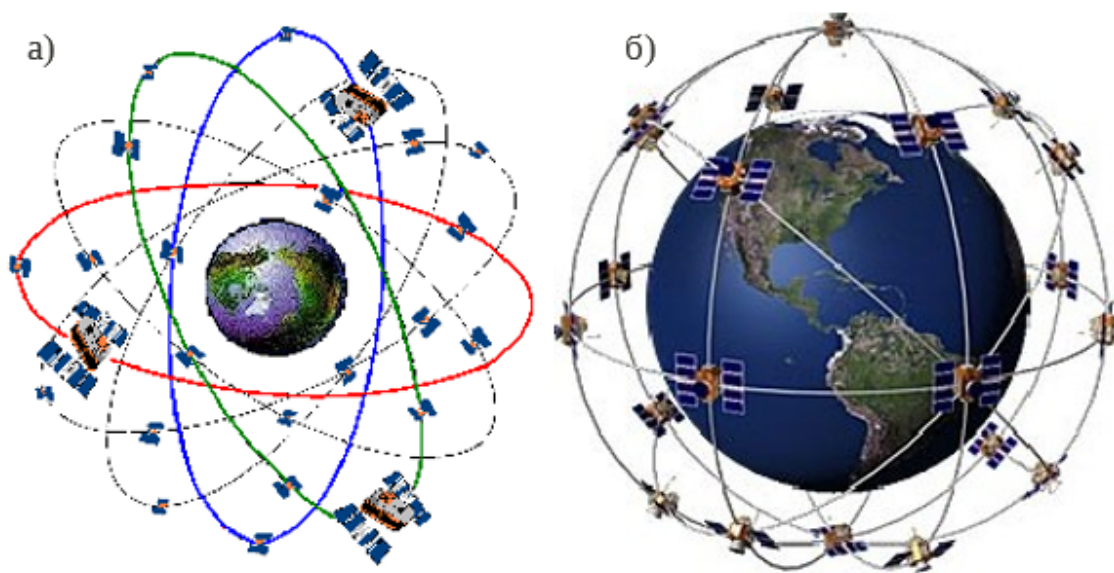


Рисунок 2.2 — Основные спутниковые навигационные системы:

а) — система GPS;

б) — система ГЛОНАСС.

2.2 Принцип работы спутниковых навигационных систем

В системе ГЛОНАСС каждый штатный НКА в ОГ постоянно излучает шумоподобные непрерывные навигационные радиосигналы в двух диапазонах частот 1600 МГц (L1) и 1250 МГц (L2). В НАП навигационные измерения в двух диапазонах частот позволяют исключить ионосферные погрешности измерений.

Передачики НКА GPS излучают два непрерывных сигнала на частотах L1 и L2. Несущая частота L1 состоит из двух компонентов, которые находятся по фазе в квадратуре друг к другу для удобства их разделения.

Несущая частота L2 имеет один компонент и модулируется двумя двоичными последовательностями. Во всех случаях скорость передачи данных информационных последовательностей 50 бит/с. Основным навигационным дальномерным псевдослучайным кодом является точный P-код.

Таким образом, сигналы GPS занимают в L-диапазоне две полосы шириной по 20.46 МГц, в центре которых находятся частоты L1 и L2.

Навигационное сообщение GPS в отличие от ГЛОНАСС эфемеридная информация навигационных искусственных спутников Земли (НИСЗ) GPS даётся в виде модифицированных кеплеровых элементов.

3. Методика определения влагосодержания атмосферы по данным радиозондирования атмосферы

3.1 Формат аэрологических данных

В Университете Вайоминга берут за основу код КН-04 и выкладывают на общедоступный сайт, каскодируя его. Общий вид аэрологических данных можно увидеть на рисунке 4.2.

3.2 Программное обеспечение для обработки аэрологических данных

Влагосодержание атмосферы рассчитывается по профилям температуры воздуха и парциального давления водяного пара:

$$PWV = \int_0^{\infty} \frac{e}{RT} dz \quad (3.1)$$

Обработка аэрологических данных проводилась в автоматическом режиме, используя написанный скрипт программы (приложение А).

3.3 Результаты определения влагосодержания атмосферы

На основе данных с аэрологических станций в городах Норильск, Тикси, Москва и Новосибирск были построены графики влагосодержания атмосферы.

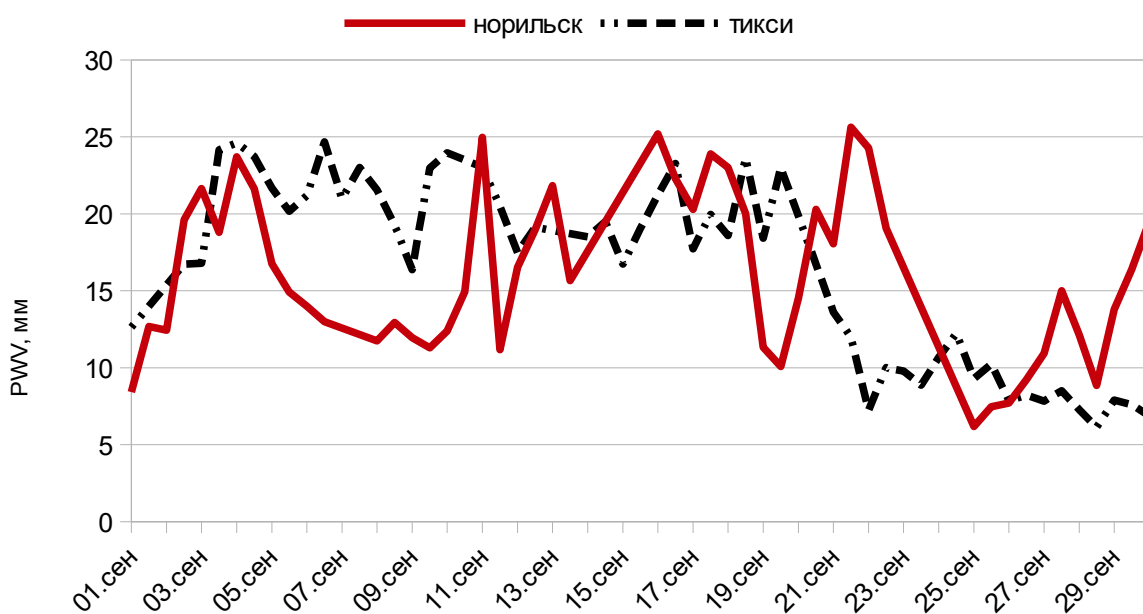


Рисунок 3.1 — Результаты аэрологического зондирования за сентябрь 2016 года в городах Норильск и Тикси.

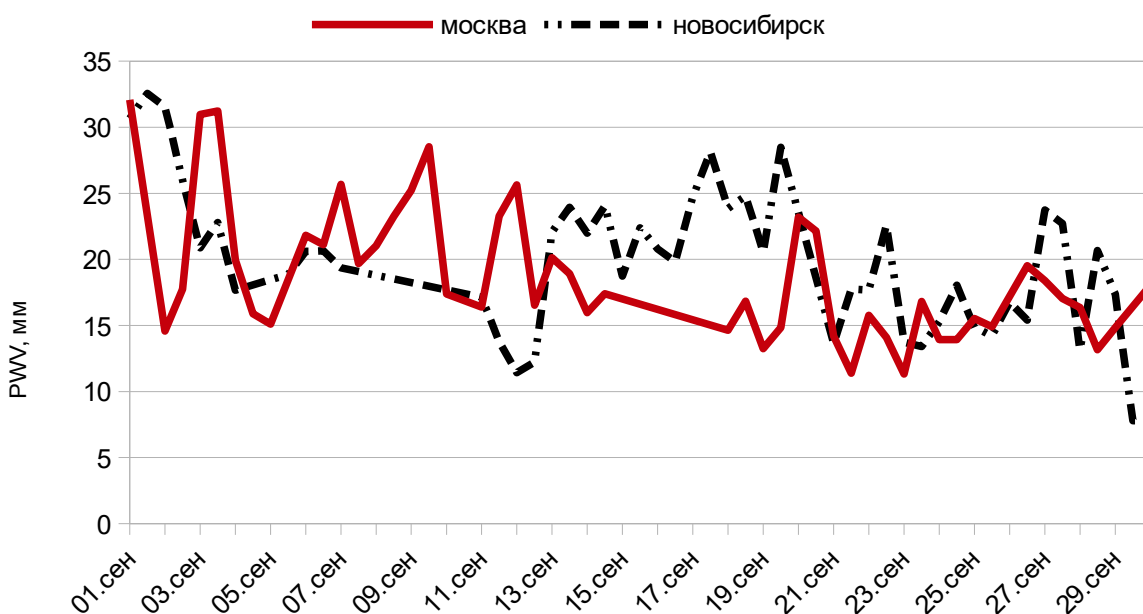


Рисунок 3.2 — Результаты аэрологического зондирования за сентябрь 2016 года в городах Москва и Новосибирск.

Далее для сравнения результатов рассчитаем влагосодержание атмосферы по ГНСС- данным.

4. Определение влагосодержания атмосферы по ГНСС-данным

4.1 Тропосферная задержка радиосигнала

Тропосферная задержка – это изменение скорости (задержка) распространения электромагнитного излучения, распространяющегося от спутника к приемнику при прохождении тропосферы (неионизированной части атмосферы).

Измеряемая приемником GPS фазовая задержка является интегралом фазового показателя преломления и содержит в себе информацию о влиянии различных атмосферных составляющих [12]:

	$\Phi = \int_L n_{ph} dl$	(4.1)
--	---------------------------	-------

где n_{ph} — фазовый показатель преломления, описывающий вклад как ионосферы, так и нейтральной атмосферы.

Тропосферная задержка создается как сухой атмосферой, так и вкладом искомого влагосодержания, создаваемого паром [14]. Для расчета влагосодержания требуется сначала получить значения тропосферной задержки.

Полученные данные измерений тропосферной задержки навигационных радиосигналов даны в миллиметрах. Ниже фрагмент файла данных ГНСС:

```

+SITE/ID
*CODE PT DOMES___ T _STATION DESCRIPTION___ APPROX_LON_ APPROX_LAT_ _APP_H_
NRIL A 12364M001 P Norilsk, Russian Feder 88 21 35.2 69 21 42.6 47.9
-SITE/ID

+SITE/RECEIVER
*SITE PT SOLN T DATA_START__ DATA_END___ DESCRIPTION_____ S/N__ FIRMWARE___
NRIL A 0001 P 16:261:75600 16:262:86100 ASHTECH UZ-12 -----
-SITE/RECEIVER

+SITE/ANTENNA
*SITE PT SOLN T DATA_START__ DATA_END___ DESCRIPTION_____ S/N__
NRIL A 0001 P 16:261:75600 16:262:86100 ASH701945B_M SCIT -----
-SITE/ANTENNA

+SITE/GPS_PHASE_CENTER
*
UP___ NORTH_ EAST__ UP___ NORTH_ EAST__
*DESCRIPTION_____ S/N__ L1->ARP(m)_____ L2->ARP(m)_____ AZ_EL___
-SITE/GPS_PHASE_CENTER

+SITE/ECCENTRICITY
*
UP___ NORTH___ EAST___
*SITE PT SOLN T DATA_START__ DATA_END___ AXE ARP->BENCHMARK(m)_____
NRIL A 0001 P 16:261:75600 16:262:86100 UNE 0.0795 0.0000 0.0000
-SITE/ECCENTRICITY

+TROP/DESCRIPTION
*KEYWORD_____ VALUE(S)_____
SAMPLING INTERVAL 300
SAMPLING TROP 300
ELEVATION CUTOFF ANGLE 7.0
TROP MAPPING FUNCTION WET GMF
SOLUTION_FIELDS_1 TROTOT STDEV TGNTOT STDEV TGETOT STDEV
-TROP/DESCRIPTION

+TROP/STA_COORDINATES
*SITE PT SOLN T STA_X_____ STA_Y_____ STA_Z_____ SYSTEM REMARK
NRIL A 1 P 64536.939 2253782.903 5946363.516 ITRF08 USN
-TROP/STA_COORDINATES

+TROP/SOLUTION
*SITE EPOCH_____ TROTOT STDEV TGNTOT STDEV TGETOT STDEV
NRIL 16:262:00000 2466.7 2.2 0.395 0.286 0.374 0.307
NRIL 16:262:00300 2466.8 2.0 0.385 0.275 0.380 0.295
NRIL 16:262:00600 2466.9 2.0 0.375 0.271 0.386 0.291
NRIL 16:262:00900 2466.8 1.9 0.366 0.260 0.389 0.279
NRIL 16:262:01200 2466.2 1.8 0.357 0.256 0.392 0.274
NRIL 16:262:01500 2465.5 1.8 0.375 0.244 0.399 0.262
NRIL 16:262:01800 2465.0 1.7 0.393 0.241 0.405 0.259

```

Рисунок 4.1 Фрагмент ГНСС - данных за 1 сентября 2016 года

Обозначим тропосферную задержку как ZTD. ZTD обычно измеряется в метрах, следовательно наши значения необходимо перевести из миллиметров в метры.

4.2 Гидростатическая задержка радиосигнала

Зенитная тропосферная задержка является суммой двух различных компонент: вклада сухого воздуха и вклада влажного воздуха (т. е. влагосодержания). Это можно представить в виде формулы:

$$ZTD = ZHD + ZWD \quad (4.2)$$

где ZHD — зенитная сухая (гидростатическая) задержка, которая зависит от парциального давления сухого воздуха и температуры.

Ведем следующие положения:

1. расстояние от аэрологической станции до места установки приемника не очень большое
2. давление на уровне моря не изменяется.

Искомое давление на уровне антенны P_1 может быть рассчитано по барометрической формуле:

$$P_1 = P_0 \exp\left(\frac{-g}{R_d T} h_1\right) \quad (4.3)$$

Из него можно оценить давление на уровне моря:

$$P_0 = P_1 \exp\left(\frac{g}{R_d T} h_1\right) \quad (4.4)$$

Аналогично для давления на уровне аэрологической станции P_2 :

$$P_2 = P_0 \exp\left(\frac{-g}{R_d T} h_2\right) \quad (4.5)$$

тоже можно выразить давление на уровне моря:

$$P_0 = P_2 \exp\left(\frac{g}{R_d T} h_2\right) \quad (4.6)$$

Приравняем давления на ур. моря, так как считаем, что давление меняется по пространству незначительно и расстояние между ними малое, получим:

$$P_1 \exp\left(\frac{g}{R_d T} h_1\right) = P_2 \exp\left(\frac{g}{R_d T} h_2\right) \quad (4.7)$$

Выразим искомое давление P_1 :

$$P_1 = P_2 \exp\left(\frac{g}{R_d T} h_2\right) \exp\left(-\frac{g}{R_d T} h_1\right) \quad (4.8)$$

объединим экспоненты:

$$P_1 = P_2 \exp\left(\frac{g}{R_d T} h_2 - \frac{g}{R_d T} h_1\right) \quad (4.9)$$

вынесем общий множитель:

$$P_1 = P_2 \exp\left[\frac{g}{R_d T} (h_2 - h_1)\right] \quad (4.10)$$

где h_1 - высота антенны над ур. моря, м; h_2 - высота станции над ур. моря, м; P_0 - приземное атмосферное давление на уровне моря, м; P_1 - приземное атмосферное давление на уровне антенны приемника, м; P_2 - приземное атмосферное давление на уровне станции, м; T - температура воздуха на уровне станции, К; g – ускорение свободного падения, м/с²; R_d – удельная газовая постоянная для сухого воздуха, Дж/(кг·К).

P_2 , T , h_2 – берутся из первой строки таблицы аэрологических данных:

21824 Tiksi Observations at 12Z 11 Sep 2016

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SKNT knot	THTA K	THTE K	THTV K
1027.0	7	9.8	6.0	77	5.74	240	6	280.8	296.8	281.8
1012.0	130	9.6	5.6	76	5.67	310	12	281.8	297.6	282.7
1000.0	229	9.4	5.3	76	5.61	310	14	282.6	298.3	283.5
985.0	410	8.8	3.8	71	5.30	320	14	285.7	300.8	286.6

Рисунок 4.2 — Фрагмент аэрологических данных на станции Тикси за
12:00 11 сентября 2016 года

Для этого случая получается:

$$P_1 = 102700 * \exp[9.81/(287*282.95) * (7 - h_1)]$$

Из формулы (4.2) можем получить гидростатическую задержку:

$$ZHD = 2.2768E-5 \cdot P \quad (4.11)$$

4.3 Расчет влагосодержания атмосферы

Программное обеспечение для обработки ГНСС-данных показано в приложении Б.

Зная ZTD и ZHD, можно рассчитать отклонение ZTD от ZHD:

$$ZWD = ZTD - ZHD \quad (4.12)$$

Под интегральным влагосодержанием понимают массу водяного пара в вертикальном столбе атмосферы, отнесенную к единице площади. Влагосодержание атмосферы измеряется в кг/м² или в мм, и определяется по формуле:

$$PVW = 155 \cdot ZWD . \quad (4.13)$$

4.4 Результаты определения влагосодержания атмосферы

По полученным тропосферным задержкам, было рассчитано влагосодержание атмосферы за сентябрь 2016 года в четырех пунктах: Норильск, Тикси, Москва, Новосибирск.

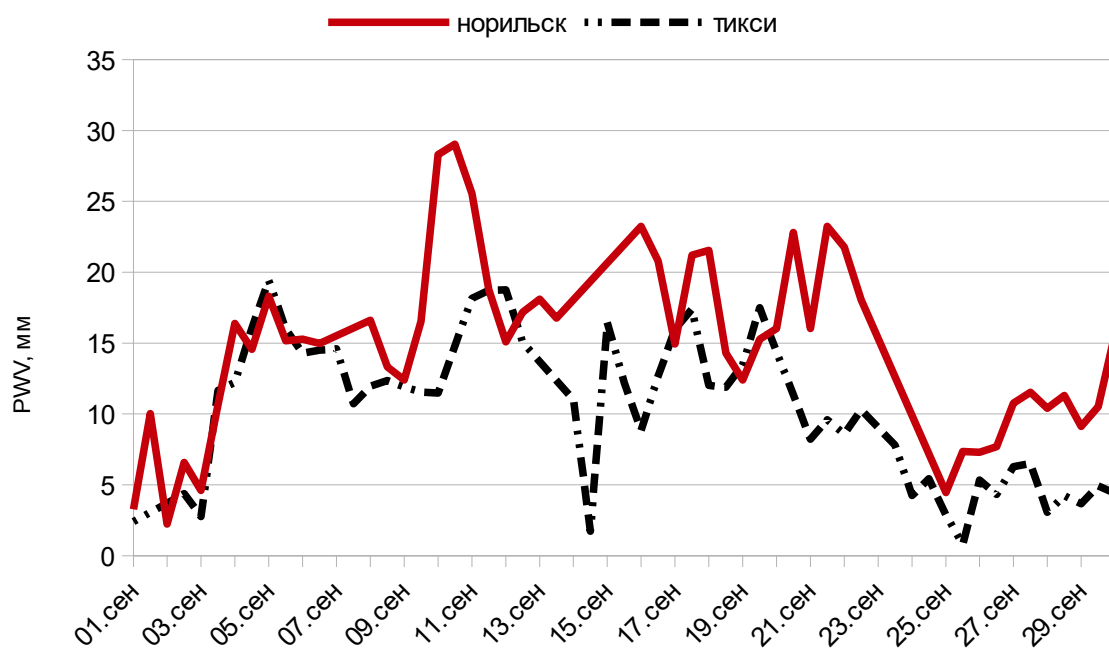


Рисунок 4.3 — Результаты ГНСС - зондирования за сентябрь 2016 года в городах Норильск и Тикси

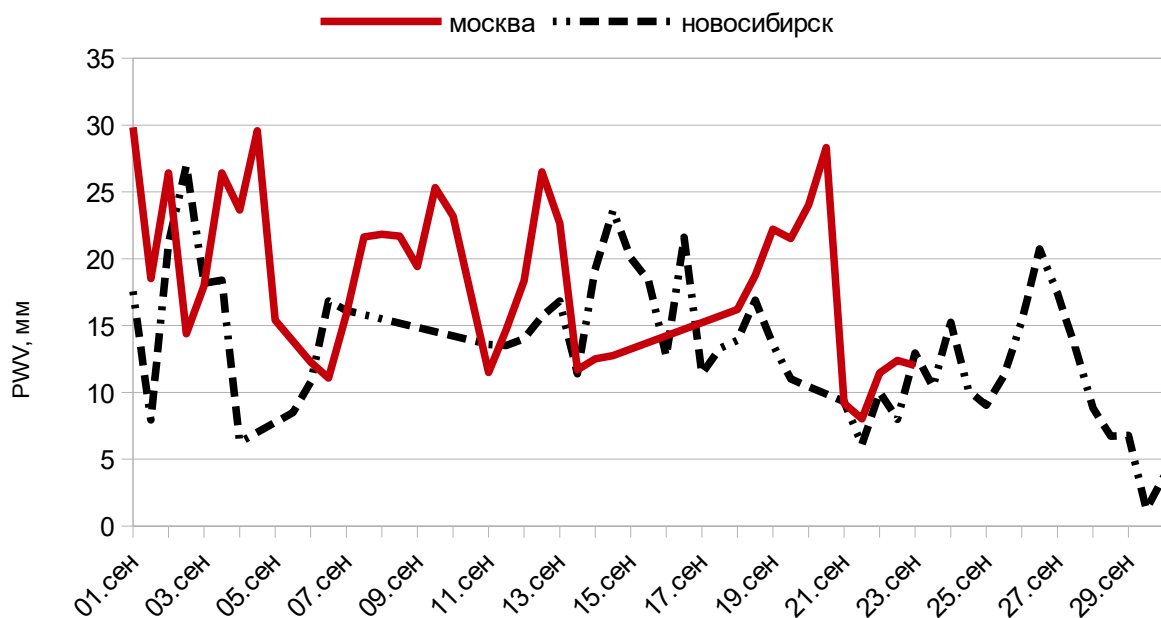


Рисунок 4.4 — Результаты ГНСС - зондирования за сентябрь 2016 года в городах Москва и Новосибирск

Таким образом, при зондировании атмосферы ГНСС-сигналами для определения интегрального содержания водяного пара в вертикальном столбе атмосферы PWV необходимы результаты измерения ГНСС-приемником значений тропосферной задержки радиосигнала, для расчета которой необходима информация о приземных значениях температуры воздуха T_0 и атмосферного давления P_0 в точке размещения ГНСС-приемника.

4.5 Сопоставление аэрологических и ГНСС-данных

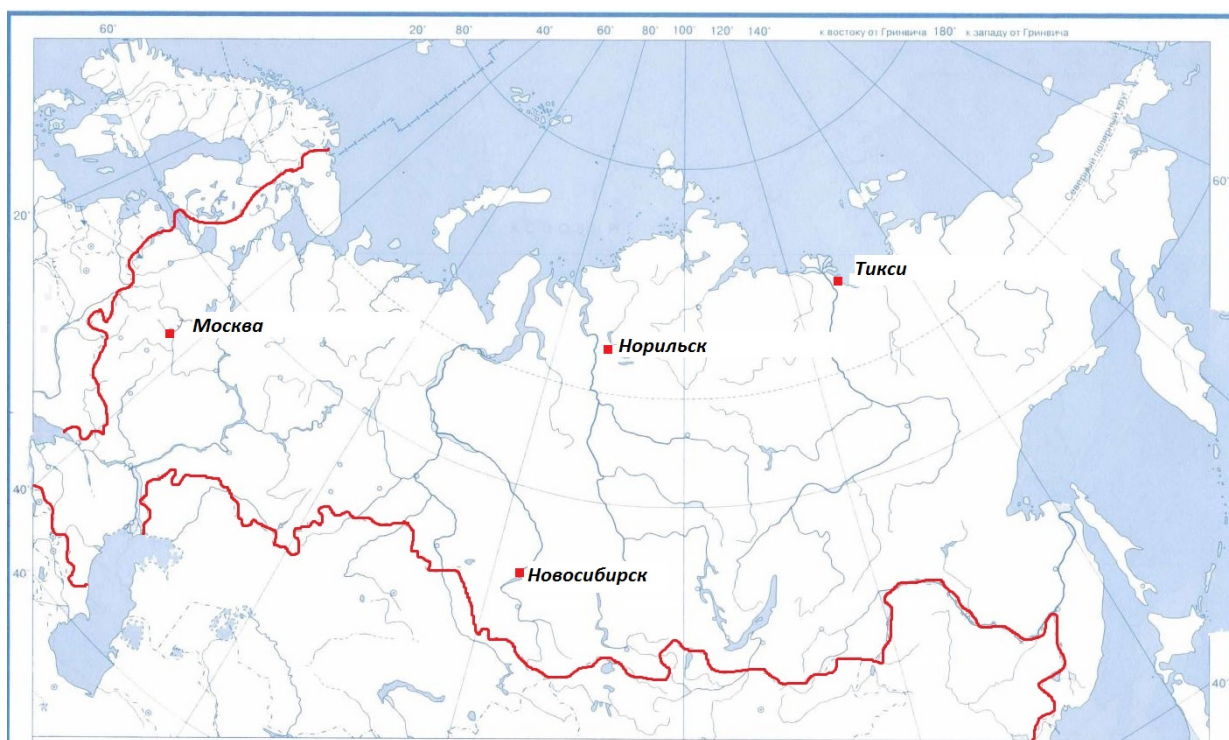


Рисунок 4.5 — Расположение пунктов измерения влагосодержания атмосферы

Для определения точности измерения ГНСС- данных сравним их с данными аэрологического зондирования в четырех городах. Данные ГНСС зондирования осуществляются лучше всего в тропическом и умеренном поясе, хуже - в полярном. Следовательно, в Норильске и Тикси точность измерений ниже, чем в городах Москва и Новосибирск.

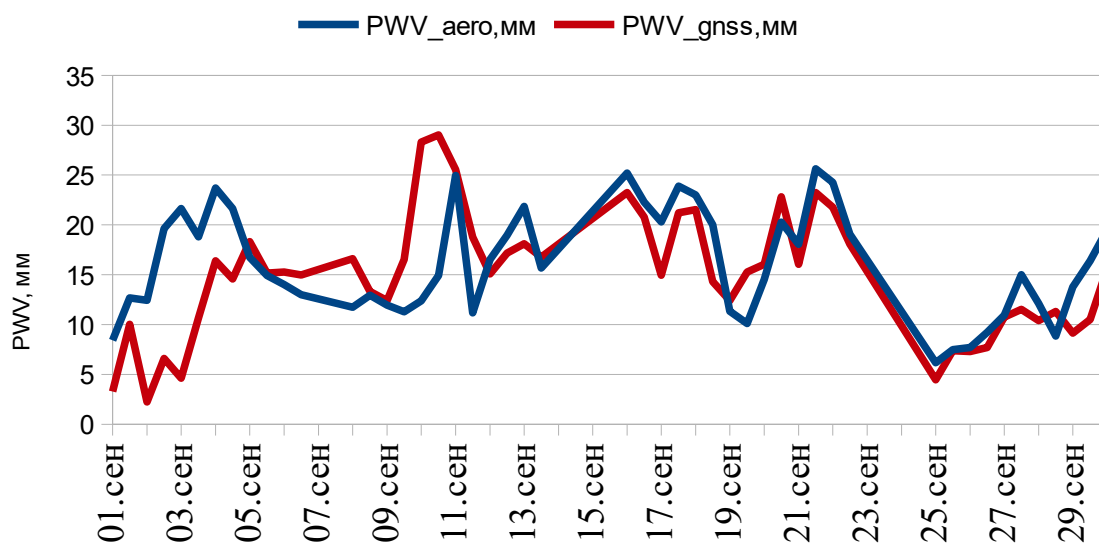


Рисунок 4.6 — Результаты сопоставления ГНСС и аэрологических данных за сентябрь 2016 года в городе Норильск

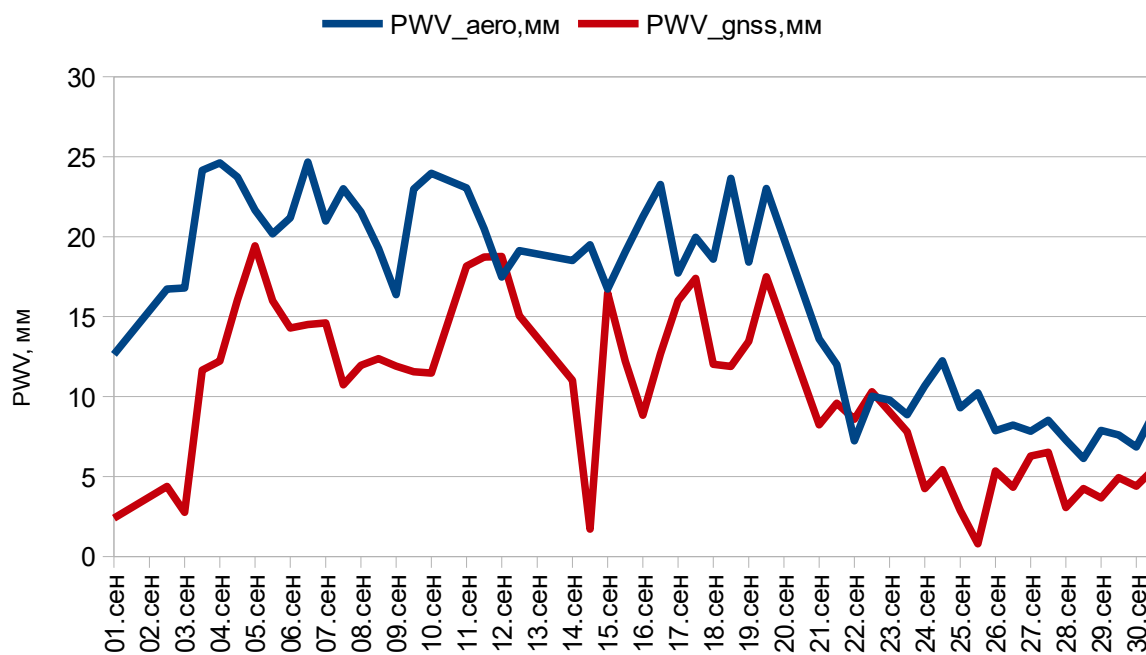


Рисунок 4.7 — Результаты сопоставления ГНСС и аэрологических данных за сентябрь 2016 года в городе Тикси

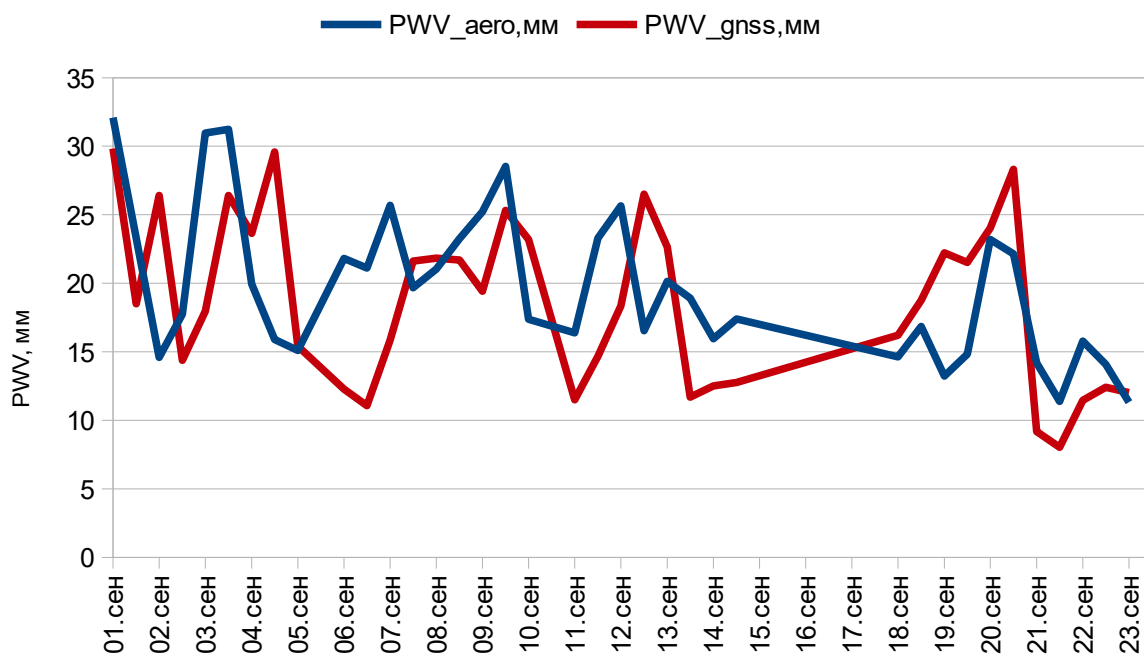


Рисунок 4.8 — Результаты сопоставления ГНСС и аэрологических данных за сентябрь 2016 года в городе Москва

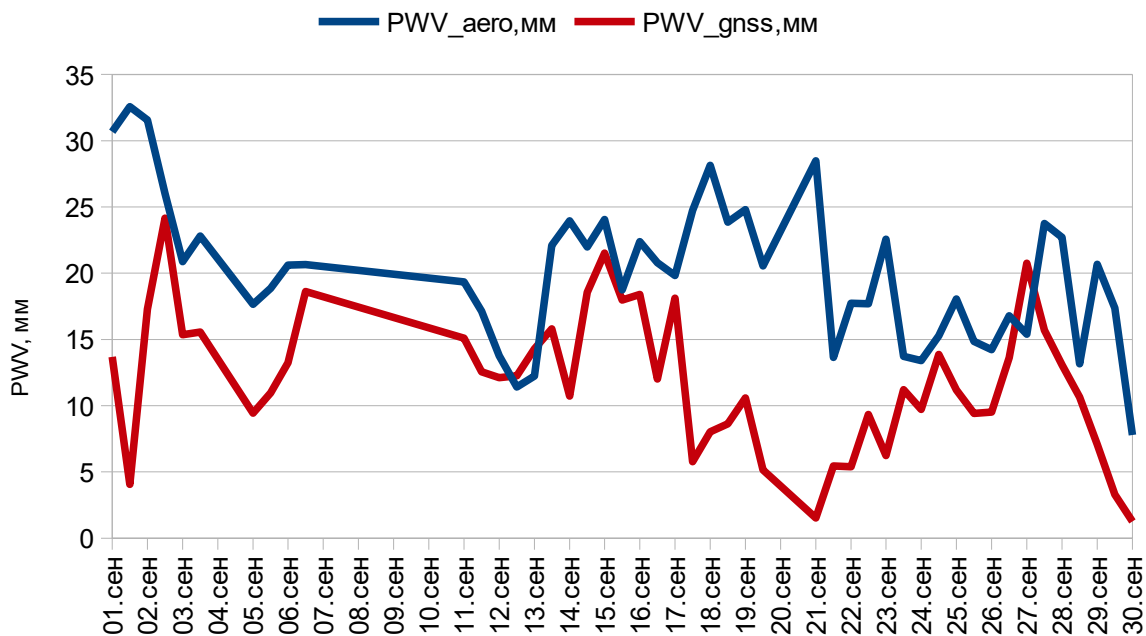


Рисунок 4.9 — Результаты сопоставления ГНСС и аэрологических данных за сентябрь 2016 года в городе Новосибирск

Точность определения влагосодержания атмосферы по ГНСС- данным велика, по сравнению с аэрологическими данными. Это может быть связано с низким качеством изготовления радиозондов при аэрологическом зондировании. Также результаты аэрологического зондирования зависят от наличия облаков. Не смотря на то, что результаты ГНСС зондирования зависят от степени возмущенности магнитного поля, они имеют широкое распространение по всему земному шару.

Таблица 4.1 — Среднемесячные значения влагосодержания атмосферы

Пункт	Среднемесячное влагосодержание, мм		Долгота, ° в.д.	Широта, ° с.ш.	Абсолютная ошибка, мм
	аэрол. зонд.	ГНСС зонд.			
Норильск	16.1	14.9	88°12'09"	69°21'12"	1.2
Тикси	16.1	10.1	128°51'52"	71°41'24"	6
Новосибирск	19.7	13.5	82°56'04"	55°02'29"	6.2
Москва	18.6	18.6	37°36'56"	55°45'07"	0

Заключение

В результате проведенных работ получены следующие результаты:

1. осуществлен обзор методов зондирования содержания водяного пара в атмосфере;
2. проведен сбор и обработка аэрологических и ГНСС-данных за сентябрь 2016 г.;
3. выполнен сравнительный анализ данных измерений влагосодержания атмосферы и показано, что два метода дают сопоставимую точность измерений;
4. при ГНССС-зондировании атмосферы в полярных широтах на точность измерений оказывают значительное влияние неоднородности ионосферы.

Рассмотренный метод позволяет определять весьма важную информацию о содержании водяного пара в атмосфере.

Следует отметить, что применение метода в полярных условиях, при сильных возмущениях магнитного поля может быть сильно затруднено из-за влияния на результаты измерений особенностей распространения радиоволн в ионосфере.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на проведение сравнительного анализа точности влагосодержания атмосферы на более значительном статическом материале.

Список использованных источников

1. Аль-Тамими М.А., Чукин В.В. Параметризация глобального испарения на основе спутниковых данных о влагосодержании атмосферы. Журнал «Успехи современного естествознания». – 2016. – № 2 – С. 137-141
2. Нгуен Т. Т. Возможность использования сети одночастотных ГНСС-приемников в целях дистанционного зондирования атмосферы Журнал «Современные наукоемкие технологии». – 2010. – № 3 – С. 48
3. Гурин, С. Е. Спутниковые радионавигационные системы ГЛОНАСС/GPS на железнодорожном транспорте. – 2004. – С. 55
4. <http://www.vaisala.ru>
5. International GNSS Service (IGS). - Режим доступа к архиву <ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/2016/>
6. University of Wyoming. - Режим доступа к архиву <http://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.html>
7. Н. Ф. Павлов Аэрология, радиометеорология и техника безопасности
8. В. Н. Киселев, А. Д. Кузнецов Методы зондирования окружающей среды
9. В.В. Чукин, Е.С. Алдошкина, А.В. Вахнин, А.Ю. Канухина, О.А. Мельникова Мониторинг интегрального содержания водяного пара в атмосфере ГНСС-сигналами
10. Соловьев, Ю.А. Системы спутниковой навигации. – 2000. – С. 270.
11. Чукин В.В. Применение сетевых технологий при построении системы дистанционного зондирования атмосферы с помощью глобальной навигационной спутниковой системы Журнал «Успехи современного естествознания». – 2008. – №11. – С.58.
12. В. Н. Харисова, В. А. Болдина, А. И. Перова Глобальная Спутниковая Радионавигационная Система ГЛОНАСС – 1999.

13. Solheim F. S. et al. Propagation delays induced in GPS signals by dry air, water vapor, hydrometeors, and other particulates – 1999 – №. D8. – С. 9663-9670.
14. Kaplan E., Hegarty C. Understanding GPS: principles and applications. – Artech house, 2005.
15. Р. А. Эминов, Э. И. Магерамов, К вопросу о GPS измерениях общего количестве осаждаемой воды. Журнал радиоэлектроники: электронный журнал. – 2012. – №7.

Приложение А

Текст программы для получения аэрологических данных

```
#!/usr/bin/python
# coding: utf8

# Подключаем библиотеки для работы с Интернет
import urllib
# для доступа к параметрам командной строки
import sys
# для работы со строками
import string
# для работы с математическими выражениями
from math import *

class Aerology():

    #####
    # Функция инициализации полей класса
    #####
    def __init__(self, station, year, month, day, hour):
        self.station = station
        self.year = year
        self.month = month
        self.day = day
        self.hour = hour
        self.calc()

    #####
    # Функция расчета давления насыщения водяного пара (Па)
    #####
    def Evw(self, T):
        return 610.78*10**((7.63*(T-273.15))/(T-31.25))

    #####
    # Функция расчета влагосодержания атмосферы по аэрологическим данным
    #####
    def calc(self):

        # Формируем текстовую строку запроса к серверу
        url = "http://www.weather.uwyo.edu/cgi-bin/sounding?region=europe&TYPE=TEXT%3ALIST&YEAR=%04i&MONTH=%02i&FROM=%02i%02i&TO=%02i%02i&STNM=%05i" % (self.year, self.month, self.day, self.hour, self.day, self.hour, self.station)
        # Создаем сокет-соединение с сервером
        sock = urllib.urlopen(url)
        # Читаем данные ответа сервера
        upperair = sock.read()
        # Закрываем сокет-соединение с сервером
        sock.close()
```



```

# Разбиваем текст на отдельные строки
lines = upperair.split("\n")
# Высота, м
z = []
# Температура воздуха, К
T = []
# Атмосферное давление, Па
P = []
# Парциальное давление водяного пара, Па
e = []

# Перебираем все строки
for i in range(len(lines)):
    if len(lines[i])>76 and i>9 and len(lines[i].split())==11:
        data = lines[i].split()
        z.append(float(data[1]))
        P.append(float(data[0])*100)
        t = float(data[2])+273.15
        s = float(data[4])/100.0
        ee = s * self.Evw(t)
        T.append(t)
        e.append(ee)

# Открываем текстовый файл для записи
fd = open("profile.txt", "w")
# Записываем в файл профиль метеопараметров
for i in range(len(z)):
    fd.write("%4.0f\t%.2f\t%.0f\t%.0f\r\n" % (z[i], T[i], P[i], e[i]))
# Закрываем текстовый файл
fd.close()

# Рассчитываем влагосодержание атмосферы (мм)
dz = []
dz.append( (z[1]-z[0])/2.0 )
for i in range(1,len(z)-1):
    dz.append( (z[i+1]-z[i-1])/2.0 )
dz.append( (z[-1]-z[-2])/2.0 )
self.PWV = 0.0
for i in range(0,len(z)):
    self.PWV = self.PWV + e[i]/(461.526*T[i])*dz[i]

# Определяем приземное атмосферное давление (Па)
self.P0 = P[0]

# Определяем приземную температуру воздуха (К)
self.T0 = T[0]

```

```
#####
# ОСНОВНАЯ ПРОГРАММА
# (ВЫПОЛНЯЕТСЯ ТОЛЬКО ПРИ ВЫЗОВЕ ИЗ КОМАНДНОЙ СТРОКИ)
#####
if __name__ == "__main__":

    # Читаем значения из командной строки
    if len(sys.argv)>5:
        station = int(sys.argv[1])
        year   = int(sys.argv[2])
        month  = int(sys.argv[3])
        day    = int(sys.argv[4])
        hour   = int(sys.argv[5])
    else:
        print("Usage:\npython %s [станция] [год] [месяц] [день] [час]\n" % (sys.argv[0]))
        print("Example:\npython %s 21824 2016 1 1 0" % (sys.argv[0]))
        exit(0)

    # Создаем экземпляр аеро класса Aerology и инициализируем его:
    # передаем значения номера станции, год, месяц, день, час
    aero = Aerology(station, year, month, day, hour)

    # Выводим на консоль рассчитанное значение влагосодержания атмосферы,
    # приземные атмосферное давление и температуру воздуха
    print aero.PWV, aero.P0, aero.T0
```

Приложение Б

Текст программы для получения ГНСС- данных

```
#!/usr/bin/python
# coding: utf8

# Подключаем библиотеку для работы с Интернет
import urllib
# для доступа к параметрам командной строки
import sys
# для работы со строками
import string
# для работы с датами
import datetime
# для работы с математическими выражениями
from math import *
# для выполнения bash-команд
import subprocess
# для работы с netCDF-файлами
from Scientific.IO.NetCDF import NetCDFFile as Dataset
# Библиотеку для расчета влагосодержания
from Aerology import *

#####
# ЧТЕНИЕ ГНСС ДАННЫХ
#####
YEAR = 2016
DAY = 1

# Имя файла данных
ifile = "tixi%03i0.%02izpd"%(DAY, YEAR-2000)
# Адрес файла в сети Интернет
url = "ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/%04i/%03i/%s.gz"%(YEAR, DAY, ifile)
# Скачиваем ZIP-архив с ГНСС-данными
subprocess.call(["wget %s"%(url)], shell=True)
# Распаковываем архив
subprocess.call(["gunzip %s.gz"%(ifile)], shell=True)

# Открываем текстовый файл
data = urllib.urlopen(ifile).read()

# Разбиваем текст на строки
lines = data.split("\n")

# Создаем пустой список, для хранения значений времени измерений
date = []
# Создаем пустой список, для хранения значений вертикальной тропосферной задержки
ZTD = []
```

```

# Перебираем все строки
for i in range(len(lines)):
    try:
        data = lines[i].split()
        if len(data)==8:
            year = 2000 + int(data[1].split(":")[0])
            dayofyear = int(data[1].split(":")[1])
            secondofday = int(data[1].split(":")[2])
            day = dayofyear + secondofday/86400.0
            date.append( datetime.datetime.strptime("%04i-01-01"%(year), "%Y-%m-%d") +
datetime.timedelta(days=day) )
            ZTD.append( float(data[2])/1000.0 )
        except:
            continue

# Удаляем текстовый файл
subprocess.call(["rm %s"%(ifile)], shell=True)

#####
# ЗАПИСЬ ДАННЫХ В NETCDF-ФАЙЛ
#####

# Создаем имя netCDF-файла
ofile = ifile + ".nc"
# Открываем netCDF-файл для записи
cdf = Dataset(ofile, "w")
# Описание данных
cdf.description = "Aerological and GNSS Precipitable Water Vapor"
# Организация
cdf.institution = "Laboratory of Meteotechnology"
# Источник данных
cdf.source = "ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/"
# Размерности
cdf.createDimension("time", None)
# Переменные
time = cdf.createVariable("time", "d", ("time",))
ztd = cdf.createVariable("ztd", "f", ("time",))
# Имена переменных
time.long_name = "Time"
ztd.long_name = "Zenith Tropospheric Delay"
# Единицы измерения
time.units = "days since 1600-1-1 00:00:0.0"
ztd.units = "meters"
# Пропущенные значения
ztd.missing_value = 9999.9
# Перебираем строки
for i in range(len(date)):

```

```

        date.append( datetime.datetime.strptime("%04i-01-01"%(year), "%Y-%m-%d") +
datetime.timedelta(days=day) )
        ZTD.append( float(data[2])/1000.0 )
    except:
        continue

```

```

# Удаляем текстовый файл
subprocess.call(["rm %s"%(ifile)], shell=True)

```

```

#####
# ЗАПИСЬ ДАННЫХ В NETCDF-ФАЙЛ
#####

```

```

# Создаем имя netCDF-файла
ofile = ifile + ".nc"
# Открываем netCDF-файл для записи
cdf = Dataset(ofile, "w")
# Описание данных
cdf.description = "Aerological and GNSS Precipitable Water Vapor"
# Организация
cdf.institution = "Laboratory of Meteotechnology"
# Источник данных
cdf.source = "ftp://igs.ensg.ign.fr/pub/igs/products/troposphere/"
# Размерности
cdf.createDimension("time", None)
# Переменные
time = cdf.createVariable("time", "d", ("time",))
ztd = cdf.createVariable("ztd", "f", ("time",))
# Имена переменных
time.long_name = "Time"
ztd.long_name = "Zenith Tropospheric Delay"
# Единицы измерения
time.units = "days since 1600-1-1 00:00:0.0"
ztd.units = "meters"
# Пропущенные значения
ztd.missing_value = 9999.9
# Перебираем строки
for i in range(len(date)):
    try:
        # Записываем данные в netCDF-файл
        time[i] = float((date[i] - datetime.datetime(1600,1,1,0,0,0)).days)
        ztd[i] = float(ZTD[i])
    except:
        continue
# Синхронизируем буфер с файлом на диске
cdf.sync()
# Закрываем netCDF-файл
cdf.close()

```

Приложение В

Данные зондирования влагосодержания атмосферы по аэрологическим и ГНСС- данным

Москва			Новосибирск		
время	PWV_аеро, мм	PWV_гнсс,м м	время	PWV_аеро, мм	PWV_гнсс, мм
01.09.16 00:00	15,1	18,59	01.09.16 00:00	30,67	13,69
02.09.16 00:00	21,82	14,74	01.09.16 12:00	32,57	4,07
02.09.16 12:00	21,11	11,79	02.09.16 00:00	31,56	17,28
03.09.16 00:00	25,68	15,87	02.09.16 12:00	26	24,15
03.09.16 12:00	19,68	22,34	03.09.16 00:00	20,88	15,35
04.09.16 00:00	21,04	25,37	03.09.16 12:00	22,8	15,56
04.09.16 12:00	23,25	24,53	05.09.16 00:00	17,66	9,44
05.09.16 00:00	25,21	17,66	05.09.16 12:00	18,86	10,97
05.09.16 12:00	28,52	20,74	06.09.16 00:00	20,61	13,25
06.09.16 00:00	17,38	20,73	06.09.16 12:00	20,65	18,60
07.09.16 00:00	16,38	10,79	11.09.16 00:00	19,35	15,09
07.09.16 12:00	23,28	12,57	11.09.16 12:00	17,13	12,55
08.09.16 00:00	25,64	13,77	12.09.16 00:00	13,76	12,11
08.09.16 12:00	16,54	20,16	12.09.16 12:00	11,41	12,26
09.09.16 00:00	20,13	17,02	13.09.16 00:00	12,24	14,29
09.09.16 12:00	18,91	9,58	13.09.16 12:00	22,1	15,80
10.09.16 00:00	15,96	13,22	14.09.16 00:00	23,94	10,72
10.09.16 12:00	17,4	14,52	14.09.16 12:00	21,98	18,55
14.09.16 00:00	14,63	15,86	15.09.16 00:00	24,06	21,52
14.09.16 12:00	16,84	20,88	15.09.16 12:00	18,73	17,98
15.09.16 00:00	13,23	23,97	16.09.16 00:00	22,39	18,40
15.09.16 12:00	14,83	21,51	16.09.16 12:00	20,79	12,01
16.09.16 00:00	23,2	21,92	17.09.16 00:00	19,83	18,12
16.09.16 12:00	22,14	22,67	17.09.16 12:00	24,74	5,78
17.09.16 00:00	14,18	6,72	18.09.16 00:00	28,13	8,03
17.09.16 12:00	11,37	6,25	18.09.16 12:00	23,85	8,64
18.09.16 00:00	15,77	10,04	19.09.16 00:00	24,8	10,59
18.09.16 12:00	14,08	10,99	19.09.16 12:00	20,56	5,14
19.09.16 00:00	11,32	8,49	21.09.16 00:00	28,48	1,52
			21.09.16 12:00	13,64	5,45
			22.09.16 00:00	17,74	5,40
			22.09.16 12:00	17,68	9,33
			23.09.16 00:00	22,57	6,25
			23.09.16 12:00	13,73	11,21
			24.09.16 00:00	13,4	9,71
			24.09.16 12:00	15,27	13,86
			25.09.16 00:00	18,05	11,20
			25.09.16 12:00	14,85	9,43
			26.09.16 00:00	14,22	9,52
			26.09.16 12:00	16,78	13,62
			27.09.16 00:00	15,4	20,75
			27.09.16 12:00	23,74	15,70
			28.09.16 00:00	22,71	13,07
			28.09.16 12:00	13,15	10,63
			29.09.16 00:00	20,68	7,09
			29.09.16 12:00	17,37	3,30
			30.09.16 00:00	7,78	1,26
			30.09.16 12:00	7,8	4,46

Норильск			Тикси		
время	PWV_aero, мм	PWV_gnss, мм	время	PWV_aero, мм	PWV_gnss, мм
01.09.16 00:00	8,42	3,27	01.09.16 00:00	12,63	2,40
01.09.16 12:00	12,68	10,02	02.09.16 12:00	16,73	4,38
02.09.16 00:00	12,43	2,24	03.09.16 00:00	16,79	2,77
02.09.16 12:00	19,62	6,58	03.09.16 12:00	24,15	11,66
03.09.16 00:00	21,64	4,61	04.09.16 00:00	24,61	12,22
03.09.16 12:00	18,79	10,66	04.09.16 12:00	23,73	16,05
04.09.16 00:00	23,7	16,39	05.09.16 00:00	21,67	19,42
04.09.16 12:00	21,63	14,56	05.09.16 12:00	20,17	15,99
05.09.16 00:00	16,75	18,30	06.09.16 00:00	21,18	14,29
05.09.16 12:00	14,92	15,17	06.09.16 12:00	24,67	14,50
06.09.16 00:00	14	15,28	07.09.16 00:00	20,98	14,60
06.09.16 12:00	13	14,98	07.09.16 12:00	23	10,73
08.09.16 00:00	11,74	16,61	08.09.16 00:00	21,55	11,95
08.09.16 12:00	12,93	13,32	08.09.16 12:00	19,26	12,37
09.09.16 00:00	11,95	12,41	09.09.16 00:00	16,37	11,90
09.09.16 12:00	11,29	16,53	09.09.16 12:00	22,98	11,56
10.09.16 00:00	12,38	28,30	10.09.16 00:00	23,96	11,47
10.09.16 12:00	14,93	29,03	11.09.16 00:00	23,04	18,15
11.09.16 00:00	24,97	25,55	11.09.16 12:00	20,49	18,73
11.09.16 12:00	11,18	18,78	12.09.16 00:00	17,47	18,76
12.09.16 00:00	16,53	15,09	12.09.16 12:00	19,12	15,06
12.09.16 12:00	18,97	17,18	14.09.16 00:00	18,5	11,01
13.09.16 00:00	21,84	18,10	14.09.16 12:00	19,49	1,72
13.09.16 12:00	15,67	16,77	15.09.16 00:00	16,73	16,47
16.09.16 00:00	25,2	23,24	15.09.16 12:00	19,04	12,22
16.09.16 12:00	22,29	20,79	16.09.16 00:00	21,25	8,84
17.09.16 00:00	20,29	14,95	16.09.16 12:00	23,27	12,67
17.09.16 12:00	23,9	21,21	17.09.16 00:00	17,73	15,98
18.09.16 00:00	23	21,54	17.09.16 12:00	19,96	17,40
18.09.16 12:00	20,01	14,30	18.09.16 00:00	18,59	12,02
19.09.16 00:00	11,33	12,40	18.09.16 12:00	23,64	11,89
19.09.16 12:00	10,09	15,28	19.09.16 00:00	18,41	13,45
20.09.16 00:00	14,52	16,04	19.09.16 12:00	23,02	17,49
20.09.16 12:00	20,28	22,80	21.09.16 00:00	13,61	8,23
21.09.16 00:00	18,06	16,04	21.09.16 12:00	12	9,59
21.09.16 12:00	25,62	23,23	22.09.16 00:00	7,23	8,58
22.09.16 00:00	24,27	21,77	22.09.16 12:00	10,01	10,29
22.09.16 12:00	19,06	18,06	23.09.16 00:00	9,78	9,05
25.09.16 00:00	6,18	4,45	23.09.16 12:00	8,87	7,80
25.09.16 12:00	7,47	7,36	24.09.16 00:00	10,67	4,24
26.09.16 00:00	7,7	7,30	24.09.16 12:00	12,23	5,43
26.09.16 12:00	9,23	7,69	25.09.16 00:00	9,3	2,88
27.09.16 00:00	10,93	10,75	25.09.16 12:00	10,24	0,79
27.09.16 12:00	15	11,54	26.09.16 00:00	7,86	5,35
28.09.16 00:00	12,12	10,40	26.09.16 12:00	8,22	4,32
28.09.16 12:00	8,85	11,31	27.09.16 00:00	7,83	6,28
29.09.16 00:00	13,78	9,13	27.09.16 12:00	8,51	6,51
29.09.16 12:00	16,4	10,51	28.09.16 00:00	7,28	3,06
30.09.16 00:00	19,52	15,67	28.09.16 12:00	6,14	4,24
30.09.16 12:00	18,26	15,69	29.09.16 00:00	7,89	3,67
			29.09.16 12:00	7,6	4,93
			30.09.16 00:00	6,85	4,39
			30.09.16 12:00	9	5,50