

На правах рукописи

Калинников Владислав Валерьевич

ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИНТЕГРАЛЬНОГО ВЛАГОСОДЕРЖАНИЯ  
АТМОСФЕРЫ С ПОМОЩЬЮ ГЛОБАЛЬНЫХ НАВИГАЦИОННЫХ  
СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМ

специальность 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Казань – 2013

Работа выполнена на кафедре радиоастрономии Института физики Казанского  
(Приволжского) федерального университета

Научный руководитель: Тептин Герман Михайлович  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский)  
федеральный университет», Институт Физики,  
профессор кафедры «Радиоастрономия»

Официальные оппоненты: Москаленко Николай Иванович,  
доктор физико-математических наук, профессор,  
ФГБОУ ВПО «Казанский государственный  
энергетический университет», профессор  
кафедры «Котельные установки и  
парогенераторы»

Гаязов Искандер Сафаевич,  
доктор физико-математических наук,  
ФГБУН «Институт прикладной астрономии»,  
заведующий лабораторией космической  
геодезии и вращения Земли

Ведущая организация: Научно-производственное объединение  
«Тайфун», г. Обнинск

Защита состоится 5 декабря 2013 г. в 14 часов 30 минут на заседании  
диссертационного совета Д 212.081.18 по адресу: 420008, г. Казань, ул.  
Кремлевская, 18, Институт физики КФУ, аудитория 110.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке Казанского  
(Приволжского) федерального университета им. Лобачевского.

Автореферат разослан «\_\_» октября 2013 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета Д 212.081.18  
кандидат физико-математических наук, доцент



А.Д. Акчурин

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Диссертация посвящена исследованию интегрального влагосодержания атмосферы по измерениям радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем (ГНСС).

**Актуальность темы.** Водяной пар в атмосфере является основным поглотителем, как прямого солнечного излучения, так и отраженного от земной поверхности. При этом большая часть поглощенной энергии вновь переизлучается в направлении земной поверхности. Поэтому водяной пар играет ключевую роль в тепловом балансе планеты, рост концентрации которого приводит к парниковому эффекту. При этом суммарное поглощение излучения определяется интегральным влагосодержанием, характеризующим количество водяного пара в вертикальном атмосферном столбе. Соответственно исследование закономерностей распределения интегрального влагосодержания является важной задачей физики атмосферы и представляет значительный интерес для решения проблем экологии. В тоже время, существующие в настоящее время средства зондирования водяного пара не позволяют получать данные об интегральном влагосодержании с высоким временным и пространственным разрешением, достаточной точностью и не обладают свойством всепогодности. Использование в качестве нового источника информации радиосигналов ГНСС позволяет устранить перечисленные недостатки.

В Северной Америке и Европе эта тема получила развитие в связи с применением спутниковых навигационных систем для решения радиотехнических задач геодезии и геодинамики, для которых водяной пар представляет собой источник помех, оценка величины которых является серьезной проблемой. Созданные в этих странах методики рассчитаны в первую очередь на обработку измерений, собранных сетями станций ГНСС, с целью определения координат этих станций. При этом в качестве побочного результата находятся зенитные тропосферные задержки радиосигналов, значения которых сначала моделируются по априорным формулам с привлечением приземных метеоданных, а затем уточняются в процессе собственно обработки измерений радиосигналов ГНСС. В дальнейшем эти задержки могут быть преобразованы в интегральное влагосодержание. Недостатком данного подхода является тот факт, что определение абсолютных значений зенитных тропосферных задержек возможно только, если сеть станций имеет горизонтальные размеры порядка 1000 км. В противном случае для расчета доступны лишь разности зенитных тропосферных задержек между станциями. Кроме того можно отметить излишнее использование априорной информации, в частности отдельное моделирование наклонных гидростатических и влажных составляющих тропосферной задержки. Таким образом, для восстановления пространственных параметров полей интегрального влагосодержания в региональном масштабе важным вопросом является разработка методики, которая бы учитывала указанные недостатки.

**Целью** работы является разработка методики определения интегрального влагосодержания атмосферы на основе фазовых измерений дециметровых радиоволн, транслируемых спутниками ГНСС, и восстановление с помощью данной методики пространственных характеристик полей интегрального влагосодержания.

**Решаемые задачи.** Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработка методики определения зенитной тропосферной задержки дециметровых радиоволн.

2. Проведение верификационного сравнения рядов интегрального влагосодержания, полученных из рядов зенитной тропосферной задержки, с данными численных погодных полей NCEP/NCAR и солнечных фотометров сети AERONET.

3. Выявление пространственных закономерностей полей интегрального влагосодержания масштаба порядка 100 км для территории Республики Татарстан и оценка их влияния на фазовые измерения радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем.

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

1. Построена методика определения зенитной тропосферной задержки радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем, которая в отличие от других подходов использует измерения, собранные только на одной станции, и при этом не нуждается в дополнительных приземных метеоизмерениях и других источниках априорной информации о величине тропосферной задержки.

2. С помощью разработанной методики по длинным рядам было определено стандартное отклонение значений интегрального влагосодержания, полученных из преобразования зенитных тропосферных задержек, от показаний солнечных фотометров.

3. На основе построенной методики проведены расчеты длинных рядов интегрального влагосодержания непосредственно по бортовым и ультрабыстрым эфемеридам и показано, что они имеют более высокую точность, чем интегральное влагосодержание, восстановленное по приземным метеоизмерениям.

4. Определены горизонтальные градиенты поля интегрального влагосодержания над территорией Республики Татарстан для разных сезонов.

**На защиту выносятся:**

1. Методика и реализация, позволяющая по двухчастотным фазовым измерениям радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем, собранным только на одной станции, определять абсолютную величину зенитной тропосферной задержки без моделирования ее предварительных значений по априорным формулам и приземным метеоизмерениям.

2. Методика и реализация преобразования зенитной тропосферной задержки в интегральное влагосодержание, использующая последние опубликованные значения коэффициентов в формуле индекса рефракции и

дающая стандартные отклонения от показаний солнечных фотометров и численных погодных полей NCEP/NCAR 1.6 и 2.6 мм осажденной воды соответственно.

3. Горизонтальные градиенты и флуктуации поля интегрального влагосодержания над территорией Республики Татарстан, рассчитанные для разных сезонов на масштабе порядка 100 км.

**Достоверность полученных результатов** подтверждается сравнением длинных рядов интегрального влагосодержания, полученных из измерений радиосигналов ГНСС, с независимыми данными солнечных фотометров и численных погодных полей NCEP/NCAR, а также обеспечивается адекватностью и корректностью применения в работе законов рефракции дециметровых радиоволн и математических методов обработки радиоизмерений.

**Практическая ценность работы.** Зондирование интегрального влагосодержания атмосферы с помощью приемной ГНСС аппаратуры применимо для научных исследований, решения радиотехнических задач, задач экологии, радиофизики и физики атмосферы, в том числе для ассимиляции в численные погодные поля и построения прогнозов. Использование представленной методики позволяет получать интегральное влагосодержание с высокой временной дискретностью при любых погодных условиях, что недоступно другим технологиям.

**Личный вклад автора.** Автором проведены основные работы по решению поставленных задач. Разработана и программно реализована методика для определения зенитной тропосферной задержки и интегрального влагосодержания по измерениям радиосигналов ГНСС. С помощью указанной методики автором были получены ряды интегрального влагосодержания для 24 станций на территории России, проведена их верификация по численным погодным полям NCEP/NCAR и данным солнечных фотометров, восстановлены пространственные характеристики поля интегрального влагосодержания для Республики Татарстан. Сделаны основные выводы по полученным результатам.

**Апробация результатов.** Результаты работ докладывались и обсуждались на следующих конференциях: V Межрегиональная научно-практическая конференция «Промышленная экология и безопасность», Казань, сентябрь 2010; XI Международный симпозиум «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение», Казань, декабрь 2010; VI Межрегиональная научно-практическая конференция «Промышленная экология и безопасность», Казань, сентябрь 2011; Международный симпозиум «Атмосферная радиация и динамика», Санкт-Петербург, 2011 и 2013; XXIII Всероссийская научная конференция «Распространение радиоволн», Йошкар-Ола, май 2011; Progress in electromagnetics research symposium, Moscow, August 2012; XIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы», Барнаул, июль 2013; II Международная научно-практическая конференция

«Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем», Казань, сентябрь 2013;

Автор принимал участие в качестве исполнителя в исследованиях, поддержанных грантами: ГК Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 годы (№ П162 и № 8886); Грант РФФИ №13-05-97054;

**Публикации.** Автором опубликовано по теме диссертации 16 работ. Из них 10 статей в научных журналах (из них 4 по списку ВАК), 2 статьи в сборниках трудов научных конференций, 4 опубликованных тезисов докладов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Содержит 121 страницу печатного текста, в том числе 29 рисунков, 5 таблиц. Список литературы содержит 115 источников.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, определены цели и задачи исследования, ее научная новизна и практическая значимость.

**В первой главе** показано, что водяной пар играет ключевую роль в радиационном балансе атмосферы Земли, рост концентрации которого является главной причиной возникновения парникового эффекта. При этом важнейшим параметром, определяющим поглощающие свойства атмосферы, является интегральное содержание водяного пара в вертикальном атмосферном столбе. Приведен обзор средств дистанционного и контактного зондирования водяного пара. Указано, что существующие технологии не позволяют измерять интегральное влагосодержание с высоким пространственным и временным разрешением.

Так по измерениям приземной влажности можно восстановить интегральное влагосодержание только с помощью средних профилей давления водяного пара, что сопряжено с большими ошибками. Фактические вертикальные профили могут быть получены из данных радиозондов, однако они доступны для сравнительно небольшого числа пунктов и позволяют сделать оценки интегрального влагосодержания только два раза в сутки. Наземные дистанционные приборы – солнечные фотометры, СВЧ-радиометры и лидары – не обладают свойством всепогодности, требуют дополнительной калибровки и достаточно дороги, вследствие чего число пунктов, на которых они установлены, крайне невелико. Спутниковые радиометрические сканирующие системы не позволяют достигнуть высокой временной дискретности данных для одной и той же точки поверхности Земли и дают низкую точность координатной привязки измерений.

Отмечено, что определение интегрального влагосодержания с помощью радиосигналов ГНСС основывается на свойствах рефракции дециметровых радиоволн, что обеспечивает значительно меньшую зависимость результатов от погодных условий. Указано, что приемное оборудование достаточно дешево

и способно работать в круглосуточном режиме, что обеспечивает быстрый рост числа ГНСС – станций, которые могут существенно дополнить глобальную систему мониторинга параметров атмосферы непрерывными рядами интегрального влагосодержания.

**Во второй главе** рассмотрены свойства рефракции радиоволн дециметрового диапазона в атмосфере, которая приводит к изменениям их фазового пути, называемым задержками радиосигналов ГНСС. Показано, что задержка в ионосфере является частотно зависимой. При этом основная часть ионосферной составляющей может быть представлена как функция обратно пропорциональная квадрату частоты, что позволяет ее исключать из фазового пути с помощью комбинирования двухчастотных фазовых измерений. Задержка в нейтральной атмосфере обусловлена индексом рефракции, который связан с плотностью воздуха  $\rho$  [кг/м<sup>3</sup>], температурой  $T$  [К] и давлением водяного пара  $e$  [мб] следующим выражением:

$$N = 223.009 \cdot \rho + 22.9744 \cdot \frac{e}{T} \cdot Z_w^{-1} + 375463 \cdot \frac{e}{T^2} \cdot Z_w^{-1}$$

где  $Z_w$  – коэффициент сжимаемости водяного пара, близкий к единице. Таким образом, погодные вариации вызывают изменения величины задержки радиосигналов ГНСС. Представленные в последней формуле численные значения коэффициентов были получены Рюегером в 2002 году и отличаются от более ранних коэффициентов Бэвиса, обычно используемых для обработки ГНСС измерений. Поскольку задержка в атмосфере сильно зависит от зенитного угла спутника, передающего радиосигналы, то в качестве универсальной характеристики воздействия нейтральной атмосферы служит задержка в зенитном направлении:

$$ZTD = 10^{-6} \cdot \int_{h_1}^{h_2} N \cdot dh$$

где  $h_1$  и  $h_2$  – высота приемника и спутника соответственно. Величина ZTD по устоявшейся терминологии называется зенитной тропосферной задержкой. Характерными ее значениями являются 2.3 – 2.4 м.

Так как индекс рефракции линейно зависит от плотности воздуха и давления водяных паров, то зенитная тропосферная задержка обусловлена гидростатической компонентой и вызванной водяным паром влажной составляющей. Указано, что гидростатическая компонента может быть смоделирована с высокой точностью с помощью уравнения статики атмосферы и приземного значения давления. Влажная составляющая позволяет извлекать информацию об интегральном содержании водяного пара. Влияние жидкой воды и льда на величину зенитной тропосферной задержки за период 2009 – 2012 гг. для Казани достигало максимума 1.30 мм и 0.33 мм соответственно, что пренебрежимо мало с точки зрения точности определения ZTD по радиосигналам ГНСС.

Поскольку радиотрассы сигналов от спутников наблюдаются в наклонном направлении, то реальные фазовые измерения содержат в себе

наклонные тропосферные задержки  $STD$ . Для связи последних с зенитной тропосферной задержкой используется картирующая функция  $m$ :

$$STD = ZTD \cdot m(z)$$

где  $z$  – зенитный угол передающего радиосигнал спутника. В главе представлен обзор картирующих функций, независящих от метеорологических параметров. Так как точность восстановления  $ZTD$  из измерений радиосигналов ГНСС напрямую зависит от точности применяемой картирующей функции, то были проведены расчеты отклонений, которые дают разные картирующие функции при проецировании в наклонном направлении зенитной тропосферной задержки на разных зенитных углах. При этом опорные значения наклонных задержек рассчитывались из численных погодных полей NCEP/NCAR. Для зенитного угла  $80^\circ$  были получены следующие средние и стандартные отклонения:  $17.4 \pm 5.1$  мм – функция Мендеса,  $15.5 \pm 5.9$  мм – функция Нила,  $43.4 \pm 5.1$  мм – функция UNBabc,  $23.0 \pm 5.3$  мм – функция Чао,  $-50.5 \pm 6.2$  мм – функция Блэка и Эйснера. По причине наименьшего стандартного отклонения для функции Мендеса, она была использована для оценок зенитной тропосферной задержки по радиосигналам ГНСС

**В третьей главе** представлена разработанная методика определения зенитной тропосферной задержки по радиосигналам ГНСС. Указано, что принципиально существует два подхода обработки измерений – относительный и абсолютный. Относительный метод, который получил наибольшее распространение, основывается на построении разностей измерений, собранных двумя разнесенными на некоторое расстояние приемными антеннами, тогда как абсолютный алгоритм использует измерения, собранные только одной антенной. Для получения достаточно точных результатов относительным методом необходимо, чтобы приемные антенны располагались на расстояниях порядка 1000 км, что крайне неудобно. Абсолютный метод, в свою очередь, требует большего внимания к учету ошибок, присутствующих в измерениях.

К настоящему времени создано несколько научных программных продуктов, позволяющих в качестве дополнительного параметра оценивать зенитную тропосферную задержку. Существенным является тот факт, что они используют априорные значения тропосферной задержки, получаемые по моделям с привлечением приземной метеорологической информации. В процессе обработки измерений оценивается только разность между истинным и модельным значением зенитной тропосферной задержки. Роль априорной части обычно играет гидростатическая составляющая. Разработанная методика отличается от других тем, что реализует абсолютный подход и определяет полную тропосферную задержку без априорных данных. В основе ее лежит уравнение фазовых измерений:

$$\Phi = S + c \cdot (dt_r - dt_s) + N \cdot \lambda - I + ZTD \cdot m(z) + \varepsilon$$

где  $\Phi$  – измерение фазового пути в метрах,  $S$  – геометрическое расстояние между приемником и спутником,  $c$  – скорость света в вакууме,  $dt_r$  – ошибка хода часов приемника,  $dt_s$  – ошибка хода часов спутника,  $N$  – фазовая

неоднозначность в циклах,  $\lambda$  – длина несущей волны,  $I$  – фазовая ионосферная задержка радиосигналов,  $ZTD$  – зенитная тропосферная задержка,  $m(z)$  – картирующая функция,  $\varepsilon$  – прочий шум фазовых измерений.

Такие уравнения могут быть составлены для всех синхронно наблюдаемых спутников. Ионосферное влияние исключается с помощью комбинации фазовых измерений на двух частотах. После этого формируются двойные разности фазовых измерений: сначала разности между измерениями приемника одновременно до двух спутников, затем разности для соседних моментов времени – первые позволяют исключить ошибку часов приемника, а вторые – фазовые неоднозначности. При этом все разности составляются относительно измерений, сделанных до одного опорного спутника, имеющего наименьший зенитный угол. Интервал между соседними моментами времени нами установлен в 5 минут. При сбоях счета фазы приемником, а также при смене опорного спутника, возникают скачки в фазовых неоднозначностях, не исключаемые при формировании разности между соседними моментами времени. Такие случаи мы рассматриваем в качестве грубых ошибок и удаляем из обработки соответствующие измерения.

Вычисление геометрических расстояний между спутниками и приемником осуществляется с привлечением информации об эфемеридах спутников. Бортовые эфемериды, транслируемые непосредственно во время измерений, дают положение и ошибку хода часов спутника с точностью 1 м и 2.5 нс соответственно. Также существуют ультрабыстрые эфемериды, которые публикуются Международной Службой ГНСС каждые шесть часов и предсказывают положение спутников и ошибки часов на сутки вперед с точностью 5 см и 1.5 нс. Наконец, финальные эфемериды определяются Международной службой ГНСС с задержкой в две недели и обладают точностью 2.5 см и 0.02 нс.

Для определения зенитной тропосферной задержки необходимо учитывать ряд важных факторов, влияющих на измерение фазового пути. С помощью информации о калибровках мы вводим поправки за вариации и сдвиги фазовых центров антенн спутников и приемников. Также мы исправляем дополнительный фазовый набег, возникающий вследствие круговой поляризации радиосигналов ГНСС. С помощью специальных моделей, рекомендованных Всемирной Службой Вращения Земли, мы учитываем изменения положения антенны приемника из-за регулярных деформаций земной коры, вызываемых твердыми и океаническими приливами, а также поступательным движением литосферных плит. Кроме того, к фазовым измерениям добавляются поправки, связанные с ошибками релятивистской природы – радарный эффект, приводящий к задержке радиосигнала в гравитационном поле, и эффект замедления хода часов спутника из-за эксцентриситета его орбиты.

Системы уравнений двойных разностей, сформированные для каждого момента времени, представляют собой последовательные реализации измерения зенитной тропосферной задержки. В отличие от других методик,

использующих линейную модель ее изменения на интервалах в 1 – 2 часа, мы рассматриваем вариации зенитной тропосферной задержки как свободный случайный процесс и определяем ее непрерывно от одного измерительного момента к другому с помощью фильтра Калмана. При этом точность определения зенитной тропосферной задержки при обработке с финальными эфемеридами составляет 10 мм.

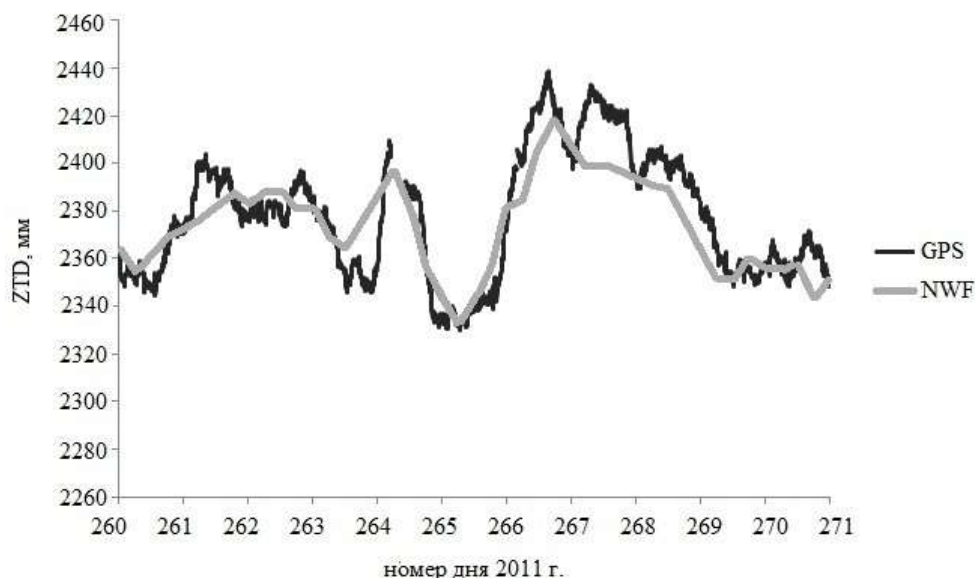


Рис. 1. Временной ход зенитной тропосферной задержки с 17 по 27 сентября 2011 г. на станции KAZN (Казань), полученный из измерений радиосигналов ГНСС (GPS) и по численным погодным полям NCEP/NCAR (NWF)

Для верификации полученных значений зенитной тропосферной задержки было проведено их сравнение с независимыми данными численных погодных полей NCEP/NCAR для 24 станций ГНСС, расположенных в разных климатических зонах России. На Рис. 1 показан пример временного хода зенитной тропосферной задержки, полученный обоими способами. В среднем по всем станциям годовые ряды зенитной тропосферной задержки из обеих технологий дали среднее отклонение 7.7 мм и стандартное отклонение 14.3 мм. Наблюдается сезонный ход – средние отклонения имеют минимум летом, а стандартные отклонения минимальны зимой и максимальны летом. Отмечается также уменьшение средних отклонений и увеличение стандартных с ростом величины зенитной тропосферной задержки.

Межгодовая стабильность полученной точности подтверждена на основе трехлетнего ряда зенитной тропосферной задержки, рассчитанного для г. Казань. Представленные результаты по точности не уступают тем, которые были получены другими авторами с помощью альтернативных методик обработки измерений радиосигналов ГНСС. Показано также, что стандартному отклонению 14.3 мм в зенитной тропосферной задержке соответствуют погрешность 1.3 мб для приземного давления водяного пара и 2.1 мм осажденной воды для интегрального влагосодержания. Эти ошибки меньше, чем суточная и сезонная амплитуды хода этих параметров.

Эксперимент по определению зенитной тропосферной задержки для режима реального времени с использованием бортовых и ультрабыстрых эфемерид, дал годовые отклонения результатов от погодных полей NCEP/NCAR, равные  $-5.4 \pm 26.1$  мм и  $-5.4 \pm 22.4$  мм соответственно. Указано, что такая точность не лишает информативности расчет по этим данным интегрального влагосодержания.

**В четвертой главе** рассмотрено интегральное влагосодержание, полученное из преобразования зенитной тропосферной задержки радиосигналов ГНСС. Как отмечалось выше, полная тропосферная задержка может быть представлена как сумма гидростатической и влажной компонент. Гидростатическая задержка определяется через приземное давление по модели Саастамойнена, являющейся следствием уравнения статики атмосферы:

$$ZHD = \frac{0.0022793 \cdot P_s}{1 - 0.00266 \cdot \cos 2B - 0.00028 \cdot H}$$

где  $ZHD$  выражается в мм,  $P_s$  – приземное давление [мб],  $B$  и  $H$  – широта [град.] и высота [м] станции. Здесь множитель перед давлением был вычислен с помощью значения первого коэффициента в формуле индекса рефракции, полученного Рюегером. При использовании более старого значения, опубликованного Бэвисом, оценки гидростатической задержки систематически уменьшаются на 2.6 мм. На Рис. 2 показан пример годового хода полной и гидростатической задержек, различие между которыми обусловлено влиянием водяного пара.

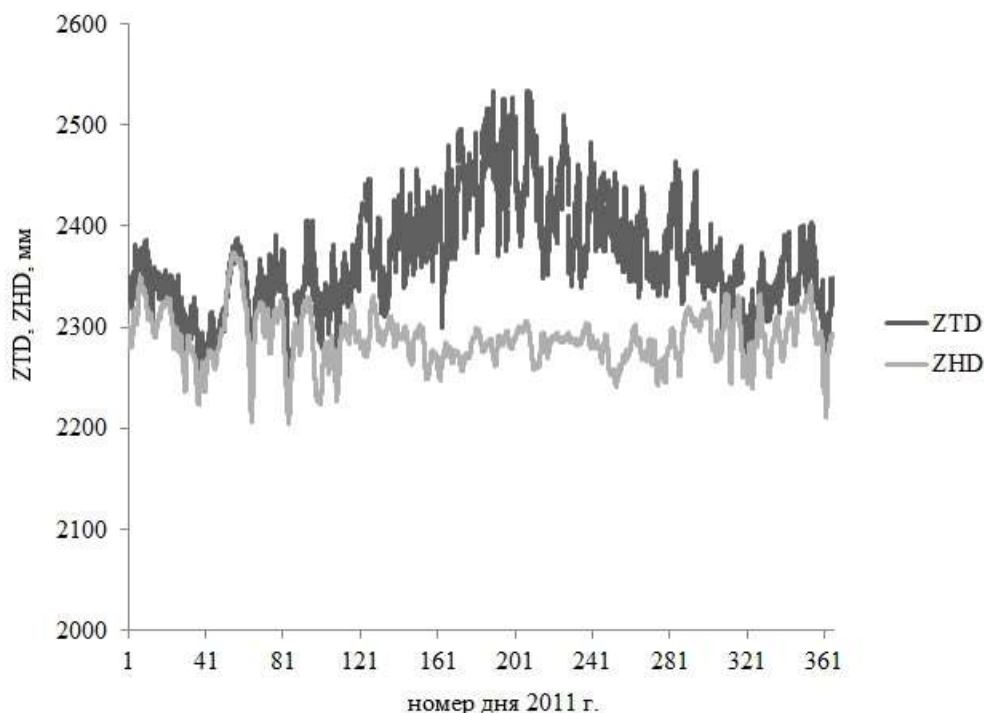


Рис. 2. Годичный ход зенитной тропосферной задержки (ZTD) радиосигналов ГНСС и ее гидростатической компоненты (ZHD) на станции KAZN (Казань)

Соответственно разность полной задержки и гидростатической составляющей дает влажную задержку  $ZWD$  [мм], которая далее преобразовывается в интегральное влагосодержание согласно выражению:

$$I WV = ZWD \cdot \left( 0.10631 + \frac{1732.83}{T_m} \right)^{-1}$$

где  $I WV$  – интегрального влагосодержание атмосферного столба, выраженное в миллиметрах осажденной воды,  $T_m$  – величина, называемая средневзвешенной температурой [К]. В последней формуле два численных коэффициента также обновлены согласно коэффициентам в формуле индекса рефракции, полученных Рюегером. Средневзвешенная температура находится через приземную температуру согласно регрессионному соотношению Мендеса.

Точность определения интегрального влагосодержания по тропосферным задержкам, рассчитанным с помощью финальных эфемерид, составляет около 1.8 мм осажденной воды. При сравнении с погодными полями NCEP/NCAR взаимные отклонения в среднем за год для 24 станций на территории России равны  $-1.1 \pm 2.6$  мм осажденной воды. В сезонном ходе взаимные стандартные отклонения меняются примерно от 1.2 мм зимой до 3.5 мм летом. Годичные расхождения с данными солнечных фотометров для четырех станций сети AERONET (Звенигород, Москва, Тикси, Якутск) меньше и составляют  $1.0 \pm 1.6$  мм осажденной воды. Относительная точность совпадения результатов, полученных из измерений радиосигналов ГНСС и из данных солнечных фотометров, составила 11%. При использовании старых коэффициентов в формуле индекса рефракции увеличиваются отклонения от фотометрических данных, но уменьшаются относительно погодных полей NCEP/NCAR.

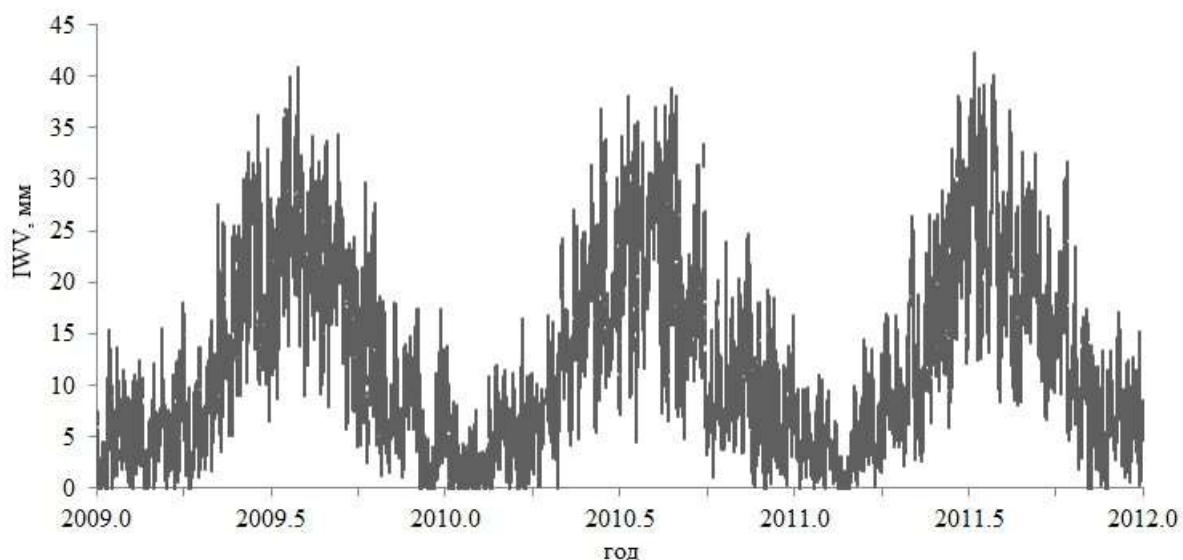


Рис. 3. Ход интегрального влагосодержания в 2009 – 2011 гг. на станции KAZN (Казань)

Значение коэффициента корреляции между сравниваемыми рядами весной, летом и осенью по всем станциям больше 0.83. Зимой же коэффициент

корреляции сохраняет высокие значения в европейской России, но уменьшается до 0.55 для станций, расположенных в азиатской части, что вызвано малым содержанием водяного пара в атмосфере при отрицательных температурах. Для трехлетнего ряда интегрального влагосодержания (Рис. 3), рассчитанного для станции KAZN, отклонения от погодных полей составили  $-2.7 \pm 2.7$  мм в 2009 г.,  $-2.9 \pm 3.3$  мм в 2010 г. и  $-2.3 \pm 2.8$  мм в 2011 г., что показывает межгодовую устойчивость выявленных статистических характеристик. Средние отклонения усугублены в область отрицательных значений, что может быть связано с переоценкой моделью Саастамойнена гидростатической компоненты тропосферной задержки. Полученные характеристики точности близки к тем, что были получены с помощью других методик.

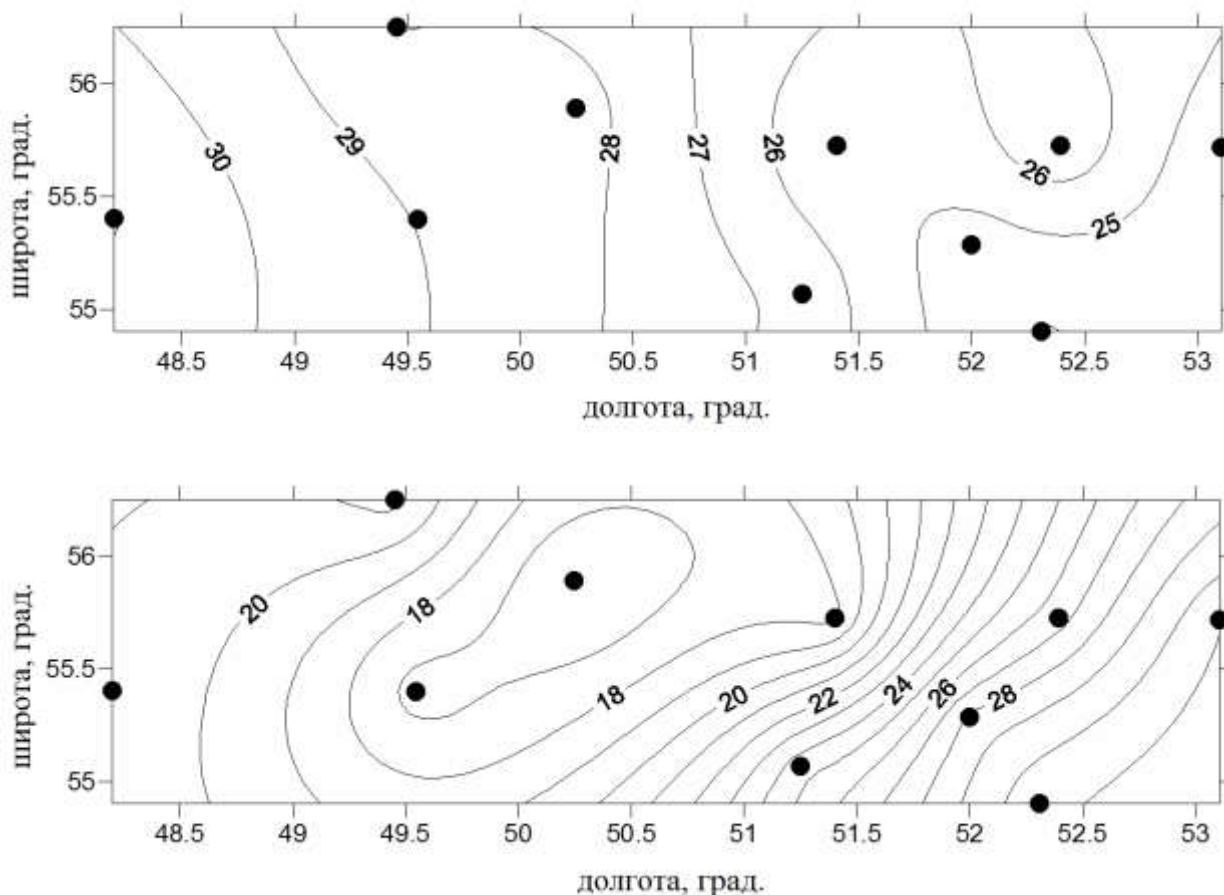


Рис. 4. Поля интегрального влагосодержания [мм осажденной воды] для территории Республики Татарстан для 11:35 02.08.11 (вверху) и 9:00 06.08.11 (внизу). Точками указано местоположение ГНСС станций

С целью оценить точность восстановления интегрального влагосодержания в реальном времени, были проведены соответствующие расчеты по бортовым и ультрабыстрым эфемеридам для станции KAZN. Для годовичного ряда взаимные отклонения от погодных полей NCEP/NCAR составили  $-3.0 \pm 3.6$  мм осажденной воды для ультрабыстрых и  $-3.1 \pm 4.3$  мм

осажденной воды для бортовых эфемерид. Таким образом, точность на 50% хуже, чем при расчетах с финальными эфемеридами.

Для Казани за тот же период было рассчитано интегральное влагосодержания из приземных значений давления водяного пара и температуры, используя их средние вертикальные профили. Годичное отклонение от данных погодных полей составило  $3.4 \pm 5.1$  мм осажженной воды. Следовательно, восстановление интегрального влагосодержания в реальном времени по данным ГНСС позволяет достичь более высокой точности, чем по классическим приземным измерениям.

По радиоизмерениям, собранным сетью постоянно действующих ГНСС станций на территории Татарстана за 2011 г., были впервые восстановлены характеристики поля интегрального влагосодержания. Область покрытия указанной сети имеет протяженность примерно 300 км по линии восток-запад и 100 км в направлении север-юг. Средняя точка сети находится на широте  $55.54^\circ$  с. ш. и долготе  $50.99^\circ$  в. д. Примеры полученных полей показаны на Рис. 4. Для синхронно измеренных на каждой станции значений интегрального влагосодержания составлялись уравнения вида:

$$IWV_i(x, y) = IWV(x_0, y_0) + \frac{\partial IWV}{\partial x} \cdot (x_i - x_0) + \frac{\partial IWV}{\partial y} \cdot (y_i - y_0)$$

где  $x_i$  и  $y_i$  – координаты станции в северном и восточном направлении соответственно,  $IWV_i(x, y)$  – измеренное на станции значение интегрального влагосодержания,  $x_0$  и  $y_0$  – координаты средней точки сети,  $\partial IWV/\partial x$  и  $\partial IWV/\partial y$  – меридиональный и зональный градиенты  $IWV$ . Эта система уравнений, решенная методом наименьших квадратов, позволяет определить средние для сети значения градиентов и интегральное влагосодержание. Оценку точности этих величин мы получаем на основании среднеквадратического отклонения остаточных разностей. Пространственные флуктуации интегрального влагосодержания  $\delta IWV$  мы находим следующим образом:

$$\delta IWV = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (IWV_i - \langle IWV \rangle)^2}{n-1}}$$

где  $n$  – общее число станций,  $\langle IWV \rangle$  – среднее по станциям интегральное влагосодержание. Таблица 1 содержит результаты вычисления для каждого месяца средних значений интегрального влагосодержания, средних и максимальных (по модулю) значений горизонтальных градиентов, а также максимальные пространственные флуктуации интегрального влагосодержания для всего 2011 года.

Как видно, атмосфера наиболее сухой была в феврале, а наиболее влажной в июле. Меридиональный градиент в холодное время меньше в несколько раз, чем в теплое время, что, естественно в силу малого содержания водяного пара в тропосфере при отрицательных температурах. Наибольшее по модулю значение достигается в августе, при этом отрицательные величины меридионального градиента указывают на общую закономерность распределения интегрального влагосодержания – убывание с возрастом

широты. Максимальные градиенты, как правило, на порядок больше, чем среднемесячные. Особенно большие значения градиентов случаются в мае и летние месяцы, когда они достигают величин 7-12 мм осажденной воды на 100 км. Пространственные флуктуации влагосодержания над рассматриваемой областью в теплое время года в 1.5-2 раза больше, чем зимой.

Оценка точности определения мгновенных меридиональных градиентов колебалась в пределах 0.1 до 3.4 мм осажденной воды на 100 км и в среднем равна 0.6 мм на 100 км. Для зональных градиентов точность изменялась от 0.0 до 1.6 мм осажденной воды на 100 км и в среднем составила 0.3 мм на 100 км. При этом наибольшая неоднозначность в оценках градиентов наблюдается летом, а наименьшая зимой. Точность оценки меридиональных среднемесячных градиентов варьируется в пределах от 0.005 до 0.020 мм осажденной воды на 100 км, а зональных от 0.003 до 0.009 мм на 100 км.

*Таблица 1. Среднемесячные значения IWV, максимальные пространственные флуктуации  $\delta IWV$ , среднемесячные и максимальные по модулю меридиональные ( $\partial IWV/\partial x$ ) и зональные ( $\partial IWV/\partial y$ ) градиенты*

месяц	IWV( $x_0, y_0$ ), мм	$\delta IWV$ , мм	$\partial IWV/\partial x$ , мм/100 км		$\partial IWV/\partial y$ , мм/100 км	
			сред.	макс.	сред.	макс.
1	5.9	3.5	-0.486±0.006	-3.2±0.3	-0.384±0.003	-3.3±0.2
2	4.0	1.9	-0.355±0.007	-2.7±0.4	-0.286±0.003	-1.7±0.2
3	8.3	3.4	-0.526±0.012	-3.8±0.6	0.122±0.005	2.6±0.3
4	10.9	5.3	-0.732±0.008	-7.0±0.6	-0.209±0.004	5.1±0.4
5	15.9	5.9	-1.383±0.010	-8.6±1.1	-0.786±0.004	-5.5±0.5
6	24.2	5.2	-0.927±0.013	8.9±1.4	0.054±0.006	4.5±0.6
7	26.7	3.6	-1.490±0.019	-7.0±1.0	-0.015±0.009	2.6±0.5
8	21.3	6.7	-1.760±0.020	-12.5±1.0	-0.229±0.009	5.6±0.8
9	20.0	5.4	-0.820±0.010	-5.8±0.7	-0.591±0.005	-5.0±0.5
10	18.1	4.6	0.187±0.012	3.9±0.5	-0.836±0.005	-4.0±0.7
11	7.1	4.0	-0.246±0.005	-2.6±0.5	-0.344±0.002	-3.5±0.4
12	8.3	3.5	0.100±0.007	-4.0±0.5	-0.740±0.003	-3.4±0.4

В главе рассмотрен вопрос влияния градиентов интегрального влагосодержания на разность фазовых измерений на двух пространственно разнесенных ГНСС антеннах. Показано, что вклад градиентов на расстояниях в 30 км и на зенитных углах в 80° достигает максимума 141.5 мм в августе.

В свою очередь ошибки в определении взаимного положения между двумя ГНСС антеннами, вызванные градиентами интегрального влагосодержания, могут достигать 66.0 мм в августе и 16.9 мм в феврале.

**В заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

В работе получены следующие основные результаты.

1. Построена методика определения зенитной тропосферной задержки радиосигналов ГНСС, обладающая рядом отличительных преимуществ. В качестве входных данных используются измерения, собранные только на одной станции, что позволяет избежать необходимости в сетевых решениях. Методика не требует приземные метеорологические измерения и другие источники априорной информации о текущих значениях зенитной тропосферной задержки. При этом определяется именно полная задержка, тогда как в других подходах ее гидростатическая компонента обычно моделируется. Также поддерживается возможность расчетов как по финальным эфемеридам, публикуемым с задержкой в две недели, так и по бортовым и ультрабыстрым эфемеридам, доступным в реальном времени. Получаемые на выходе ряды зенитной тропосферной задержки обладают высокой пятиминутной временной дискретностью. Сравнение рядов зенитной тропосферной задержки, рассчитанных с помощью представленной методики, с независимыми данными численных погодных полей NCEP/NCAR показало, что наши результаты не уступают по точности, которую позволяют достигать альтернативные подходы к обработке ГНСС радиоизмерений.

2. Проведено преобразование длинных рядов зенитной тропосферной задержки, полученных для 24 станций на территории России, в ряды интегрального влагосодержания. При этом учитывались последние опубликованные значения коэффициентов в формуле индекса рефракции, при использовании которых уменьшаются отклонения от фотометрических данных об интегральном влагосодержании, но увеличиваются относительно погодных полей NCEP/NCAR. На основе верификации рядов интегрального влагосодержания показано, что стандартные отклонения результатов обработки ГНСС измерений с финальными эфемеридами от данных солнечных фотометров и погодных полей NCEP/NCAR составляют 1.6 и 2.6 мм осажденной воды соответственно. При этом между сравниваемыми рядами имеется высокая корреляция. Восстановление интегрального влагосодержания по бортовым и ультрабыстрым эфемеридам в режиме реального времени дает точность на 50% хуже, однако она превышает точность определения интегрального влагосодержания по приземным метеорологическим измерениям.

3. Проведено исследование характеристик полей интегрального влагосодержания – горизонтальных градиентов и флуктуаций – в масштабе порядка 100 км для территории Республики Татарстан. В годичном ходе среднемесячный меридиональный градиент меняется от примерно -1.8 мм осажденной воды на 100 км в августе до 0.1 мм на 100 км в декабре, а зональный градиент от 0.1 мм на 100 км в марте и июне до -0.8 мм на 100 км в мае и октябре. Меридиональный градиент имеет для большинства месяцев отрицательное значение, тем самым указывая общее убывание

влажностердержания с увеличением широты. Мгновенные значения градиентов могут на порядок превышать среднемесячные величины. Пространственные флуктуации интегрального влажностердержания достигают величины 1.9 мм осаждеенной воды в феврале и 6.7 мм осаждеенной воды в августе.

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Калинин В. В. Использование сигналов спутниковых навигационных систем для определения характеристик тропосферы / В. В. Калинин, О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин // Физ. Атм. и Океана. – 2012. – Т. 48, № 6. – С. 705 – 713.

2. Хуторова О. Г. Вариации интегрального атмосферного влажностердержания, полученные по фазовым измерениям приемников спутниковых навигационных систем / О. Г. Хуторова, В. В. Калинин, Т. Р. Курбангалиев // Опт. Атм. и Океана. – 2012. – Т. 25, № 6. – С. 529 – 533.

3. Калинин В. В. Оценка точности тропосферных картирующих функций для оперативной обработки результатов ГНСС – измерений / В. В. Калинин, Г. М. Тептин // Инж. Изыскания. – 2012. – № 5. – С. 26 – 29.

4. Калинин В. В. Влияние неоднородности поля атмосферного водяного пара на фазовые измерения радиосигналов глобальных навигационных спутниковых систем / В. В. Калинин, О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2013. – Т. 56, № 2. – С. 96 – 103.

5. Kalinnikov V. V. The analysis of influence of errors ephemerides on an estimation ionospheric and tropospheric parameters on radio signals of systems GPS – GLONASS / V. V. Kalinnikov // Environ. Rad. Appl. Ecol. – 2009. – Vol. 15, № 1-2. – P. 13 – 20.

6. Kalinnikov V. V. Influence of double differences system errors of GNSS phase measurements on estimation of atmospheric parameters / V. V. Kalinnikov, O. G. Khutorova // Environ. Rad. Appl. Ecol. – 2010. – Vol. 16, № 1. – P. 21 – 27.

7. Kalinnikov V. V. Accuracy estimations of some tropospheric mapping functions / V. V. Kalinnikov, G. M. Tep tin, O. G. Khutorova // Environ. Rad. Appl. Ecol. – 2010. – Vol. 16, № 3-4. – P. 6 – 13.

8. Калинин В. В. Исследование факторов точности оценки некоторых характеристик атмосферы приемниками ГЛОНАСС и GPS в дифференциальном режиме / В. В. Калинин, О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин // Журн. экологии и пром. безопасности. – 2010. – № 3. – С. 38 – 39.

9. Калинин В. В. Численные оценки факторов, влияющих на сигналы спутниковых навигационных систем / В. В. Калинин, О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин // Труды XI международного симпозиума «Энергоресурсоэффективность и энергосбережение». Ч.1. Казань, 2010. – С. 339 – 343.

10. Kalinnikov V. V. Determination of the optimal baseline length for the absolute GPS – GLONASS zenith tropospheric delay estimation / V. V. Kalinnikov // Environ. Rad. Appl. Ecol. – 2011. – Vol. 17, № 1. – P. 3 – 9.

11. Калинин В. В. Метод исследования нижней атмосферы с помощью наземных станций ГНСС / В. В. Калинин // Журн. экологии и пром. безопасности. – 2011. – № 3. – С. 29 – 31.

12. Хуторова О. Г. Мониторинг тропосферы аппаратно-программным комплексом сети станций приемников спутниковых навигационных систем и численной мезомасштабной модели / О. Г. Хуторова, Г. М. Тептин, А. А. Васильев, В. В. Калинин, В. Е. Хуторов, Т. Р. Курбангалиев // Сборник тезисов международного симпозиума «Атмосферная радиация и динамика». СПб, 2011. – С. 60 – 61.

13. Khutorova O. G. Variability of GPS-derived zenith tropospheric delay and some result of its assimilation into numeric atmosphere model / O. G. Khutorova, G. M. Tepin, V. E. Khutorov, V. V. Kalinnikov, T. R. Kurbangaliev // Proceedings of Progress in electromagnetics research symposium. Moscow, 2012. – P. 940 – 943.

14. Kalinnikov V. V. Some regularities of spatial fields of integral water vapor from radio measurements stations network of satellite navigation systems / V. V. Kalinnikov, O. G. Khutorova, G. M. Tepin // Proceedings of international symposium «Atmospheric radiation and dynamics». Saint-Petersburg, 2013. – P. 37.

15. Хуторова О. Г. Закономерности пространственных полей интегрального влагосодержания атмосферы по измерениям сети приемников ГЛОНАСС – GPS / О. Г. Хуторова, В. В. Калинин, Г. М. Тептин // Сборник тезисов XIX международного симпозиума «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы». Барнаул, 2013. – С. 95.

16. Калинин В. В. Влияние неоднородности поля интегрального содержания водяного пара в атмосфере на определение высотной координаты с помощью ГНСС измерений / В. В. Калинин, О. Г. Хуторова // Сборник тезисов II международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы геодезии и геоинформационных систем». Казань, 2013. – С. 9 – 11.