

УДК 621.371:521.95:528

А. В. Прокопов

Харківський державний науково-дослідний інститут метрології

Методы учета влияния земной атмосферы в космической геодезии и навигации

Подано аналітичний огляд літературних джерел про методи врахування впливу земної атмосфери на результати координатно-часових визначень, здійснюваних за допомогою сучасних вимірювальних систем космічної геодезії та навігації, які використовують електромагнітні хвилі радіо- і оптичного діапазонів.

В современной космической геодезии и навигации широко применяются глобальные навигационные спутниковые системы (ГНСС), радиointерферометры со сверхдлинной базой (РСДБ), спутниковые лазерные дальнометры (СЛД), интегрированные со спутниками системы доплеровского определения орбит и радиопозиционирования (ДОРИС), спутниковые высотометрические комплексы и др.

В качестве переносчика измерительной информации в перечисленных системах используются электромагнитные волны оптического и радиодиапазона. Аппаратурные возможности этих систем к настоящему времени выросли уже настолько, что одним из основных факторов, ограничивающих точность измерений, стало влияние земной атмосферы на характеристики распространения электромагнитных волн, регистрируемых в процессе измерений.

Для серийно выпускаемых ГНСС-приемников геодезического назначения уже давно достигнута инструментальная погрешность измерения фазы радиосигнала, не превышающая 1 мм [2]. В то же время погрешность определения высоты пунктов геодезической сети, построенной с помощью таких приемников, в лучшем случае оказывается на уровне нескольких сантиметров. К числу главных причин столь значительного снижения точности принято относить именно неадекватный учет влияния земной атмосферы [9].

Атмосферные эффекты при распространении электромагнитных волн отличаются большим разнообразием, обусловленным сложностью земной атмосферы как физического объекта. В общем случае атмосфера Земли может рассматриваться как трехмерно-неоднородная среда, состоящая из двух боль-

ших областей: электрически нейтральной, прилегающей непосредственно к земной поверхности (основными ее частями являются тропосфера и стратосфера), и расположенной над ней электрически заряженной области — ионосферы.

Показатель (коэффициент) преломления атмосферы в этих областях содержит регулярную и случайную составляющие. Случайная составляющая связана со стохастическими процессами в атмосфере, приводящими к флуктуациям характеристикам электромагнитных волн и случайным погрешностям измерений. Современный уровень развития теории распространения волн в случайных средах позволяет использовать хорошо известные статистические методы минимизации случайных погрешностей. Наиболее важные регулярные эффекты, приводящие к снижению точности координатно-временных определений, связаны с тем, что скорость распространения сигнала в атмосфере не совпадает со скоростью света в вакууме, а длина искривленной из-за эффекта рефракции траектории распространения сигнала оказывается больше длины прямой, соединяющей точки размещения источника и приемника сигнала.

Для ионосферы, например, фазовый показатель преломления которой в радиодиапазоне меньше единицы и зависит от частоты, эти эффекты приводят к групповому запаздыванию и к фазовому опережению радиосигналов [2]. Более подробно на ионосферных эффектах мы остановимся ниже, при обсуждении двухчастотных методов исключения их влияния на результаты измерений. Здесь же отметим, что в случае тропосферы речь идет только о задержке сигнала, в общем случае складывающейся из двух неравных частей. Основная часть отражает

вклад в задержку сухого или гидростатического* компонента показателя преломления воздуха. Для стандартных атмосферных условий при распространении в зенит (угол места $\alpha = 90^\circ$) эта часть эквивалентна примерно 230 см дополнительного пути сигнала как для оптического, так и для радио-диапазонов, и называется гидростатической зенитной задержкой. Влажный (негидростатический) компонент показателя преломления оказывает заметное влияние только в случае радиодиапазона. При этом в зависимости от влажности воздуха он может давать дополнительный вклад в зенитную задержку от 0 до 40 см. Этот компонент обычно называется негидростатической зенитной задержкой. С уменьшением угла места α и гидростатический, и негидростатический компонент задержки сигнала в тропосфере увеличиваются примерно как $(\sin\alpha)^{-1}$.

Еще одним эффектом, существенно влияющим на точность координатных измерений (в тех случаях, когда измеряемыми являются угловые величины), оказывается угловая рефракция, то есть отличие направления прихода сигнала в приемник от истинного направления на источник этого сигнала. Угловая рефракция в настоящей статье не рассматривается.

Как уже упоминалось выше, свойства ионосферы и тропосферы зависят от диапазона длин волн электромагнитных сигналов, используемых в измерениях [14]. В оптическом диапазоне ответственной за дополнительную задержку сигнала является тропосфера. При этом показатель преломления воздуха зависит от длины волны оптического излучения (имеет место эффект дисперсии). Ионосфера же является для оптических сигналов фактически вакуумом. В радиодиапазоне существенное влияние на задержку сигнала оказывает и тропосфера, и ионосфера. Однако дисперсионными свойствами обладает лишь ионосфера, показатель преломления тропосферы же в радиодиапазоне не зависит от длины волн.

Наличие дисперсии среды позволяет исключить ее влияние на основе измерений групповых (фазовых) набегов на различных несущих частотах. Такой подход впервые был предложен для наземной оптической дальнометрии [5]. Практическая реализация этого подхода в оптическом диапазоне длин волн оказалась весьма сложной задачей, поэтому первые образцы двухволновых СЛД еще не вышли из стадии лабораторных экспериментов [10]. Гораздо более существенные успехи достигнуты в реализации дисперсионного метода измерений

в радиодиапазоне, хотя работы здесь начались намного позднее. Двухчастотные ГНСС-приемники уже более 10 лет производятся серийно и успешно используются в многочисленных приложениях.

Принято считать, что измерения на двух частотах позволяют с достаточной точностью исключить влияние ионосферы на результаты ГНСС-измерений. Отметим, однако, что двухчастотные (двухволновые) средства измерений в принципе не учитывают тот факт, что электромагнитные сигналы с различными несущими частотами распространяются в неоднородной среде с дисперсией по разным траекториям. В статье [8] показано, что в оптическом диапазоне этот эффект для небольших углов места α может оказаться существенным (соответствующая погрешность измерения расстояния может достигать 2...3 см для $\alpha < 10^\circ$). Оценки указывают на то, что этот эффект в принципе должен проявляться и в радиодиапазоне при двухчастотных наблюдениях ИСЗ на малых углах места.

Таким образом, исследования эффекта разброса траекторий представляют интерес, в особенности в связи с тем, что в разрабатываемой в настоящее время европейской ГНСС GALILEO планируется применить по крайней мере три достаточно отличающиеся друг от друга несущие частоты [11]. Это можно использовать при необходимости для исключения остаточной ионосферной погрешности, обусловленной пространственным разбросом траекторий сигналов с различными несущими частотами.

В связи с отсутствием дисперсии для радиоволн в тропосфере при разработке алгоритмов определения тропосферных поправок широко применяется метод моделирования, опирающийся на теорию распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. Отметим, что этот метод сохраняет свое значение и для оптического диапазона, поскольку перспективы внедрения двухволновых СЛД в практику астрономо-геодезических наблюдений остаются пока еще довольно неопределенными.

Интерес к исследованиям и разработкам моделей тропосферных поправок в оптическом и радиодиапазоне не ослабевает вот уже более трех десятков лет. Однако данная проблема пока еще далека от своего окончательного решения. Основная трудность здесь состоит в сильной пространственно-временной изменчивости реальной атмосферы.

Список научных работ, посвященных проблеме влияния земной атмосферы на координатно-временные измерения, осуществляемые с помощью электромагнитных волн, насчитывает несколько сот

* Гидростатический компонент показателя преломления воздуха в земной атмосфере определяется полным атмосферным давлением, высотное распределение которого является следствием известного условия гидростатического равновесия.

наименований. Весьма подробный обзор работ зарубежных исследователей, посвященных моделям показателя преломления воздуха и данным о его пространственных распределениях, разработкам алгоритмов определения тропосферных поправок и их тестированию, приведен в работе [24]. Из анализа этих работ следует, что при решении задач атмосферной коррекции на основе методов моделирования задержки сигнала за рубежом в настоящее время используется в основном три подхода:

1. *Чистое моделирование.* В этом случае тропосферная задержка вычисляется по данным метеоизмерений в точке расположения приемника с использованием какой-либо математической модели распространения радиоволн в неоднородной среде. Как будет ясно из дальнейшего, погрешность такого моделирования обычно оказывается не менее 3 см, что приводит к неприемлемым с точки зрения ряда приложений погрешностям координатных определений [24].

2. *Внешняя калибровка.* Отличается от чистого моделирования тем, что по математической модели с использованием данных о метеопараметрах в точке наблюдения вычисляется лишь «сухой» или гидростатический компонент задержки. Вклад влажности воздуха определяется путем измерений независимым методом, например, с помощью радиометра водяных паров (РВП) [13], рамановского лидара [20], спектрального гигрометра [12]. В работе [22] погрешность измерений с помощью РВП оценена на уровне 2...3 мм для зенитной задержки. К сожалению, РВП неприменимы во время дождя и могут иметь систематическую погрешность, зависящую от места размещения радиометра и времени года. Необходимо также учитывать, что пересчет измеренной с помощью РВП зенитной задержки на произвольный угол места приводит к заметному увеличению погрешности результата.

3. *Самокалибровка.* При использовании этого метода вклад влажного компонента (который в зарубежной литературе получил наименование «остаточная зенитная задержка») определяется на основе обработки данных непосредственно ГНСС-наблюдений. Процедура обработки может быть различной — использование метода наименьших квадратов, фильтра Калмана и др. [16] — однако в любом случае такая обработка требует применения априори известной зависимости тропосферной задержки от угла места. По этой причине точность конечного результата и здесь во многом определяется той точностью, с которой промоделирована угловая зависимость тропосферной задержки.

Таким образом, проблема точного физико-мате-

матического моделирования задержки радиосигнала в тропосфере является актуальной для всех трех описанных выше методов определения тропосферных поправок, применяемых для коррекции ГНСС-измерений.

В связи с этим проанализируем далее наиболее точные модели тропосферных поправок и перспективы дальнейших исследований в этой области. При этом будем учитывать, что современные средства обработки результатов ГНСС-измерений представляют собой компьютерные программы, включающие в себя те или иные алгоритмы коррекции. Пользователь по сути не имеет доступа к конкретным математическим алгоритмам, а имеет дело только с программной реализацией этих алгоритмов. По этой причине далее приводятся лишь общие сведения о тропосферных моделях и данные о точностных возможностях наиболее популярных алгоритмов тропосферной коррекции. Непосредственные же математические соотношения, зачастую довольно громоздкие, не выписываются.

В общем случае задержка ΔS радиосигнала, прошедшего трехмерно-неоднородную тропосферу с показателем преломления $n(r)$ (r — радиус-вектор), может быть представлена в виде

$$\Delta S = \int_0^D (n - 1) d\sigma + \int_0^D d\sigma - L, \quad (1)$$

где L — расстояние между концевыми точками измеряемой линии по прямой; D — длина траектории, искривленной на атмосферном участке вследствие рефракции; σ — лучевая координата.

Интегрирование в (1) ведется вдоль лучевой траектории, форма которой определяется лучевым уравнением

$$\frac{d}{d\sigma} \left(n \frac{dr}{d\sigma} \right) = \nabla n, \quad (2)$$

где ∇ — знак градиента [3].

Исходные уравнения (1), (2) обычно рассматриваются в приближении сферически-слоистой среды. При этом в зарубежной литературе, как уже отмечалось, особо выделяется случай зенитной задержки ΔS^z . При моделировании ΔS^z общая задержка представляется в виде суммы двух слагаемых, описывающих соответственно вклад «сухого» (гидростатического) компонента ΔS_h^z и «влажного» (негидростатического) компонента ΔS_w^z :

$$\Delta S^z = \Delta S_h^z + \Delta S_w^z. \quad (3)$$

Переход к задержке сигнала под произвольным углом места α принято осуществлять с помощью специально строящихся функций отображения

(mapping function). В общем случае эти функции вводятся формально. Мотивы их введения можно понять из следующих соображений. Применительно к среде с постоянным значением показателя преломления для плоской геометрии задачи уравнения (1), (2) дают следующее соотношение для задержки

$$\Delta S = \Delta S^z \frac{1}{\sin \alpha}. \quad (4)$$

По аналогии с (4) для произвольной сферически неоднородной тропосферы задержка сигнала формально представляется также в виде произведения зенитной задержки ΔS^z и некоторой функции $m(\alpha)$, которая «просцирует» или «отображает» ΔS^z на направление, соответствующее углу места α :

$$\Delta S = \Delta S^z \cdot m(\alpha).$$

Именно функция $m(\alpha)$, поведение которой не сильно отличается от поведения функции $1/\sin \alpha$, и получила название функции отображения. Такая функция обычно вводится не только для полной задержки, но и для отдельных ее компонентов — гидростатического и негидростатического

$$\Delta S = \Delta S_h^z m_h(\alpha) + \Delta S_w^z m_w(\alpha). \quad (5)$$

По литературным источникам можно найти несколько десятков различных соотношений, предлагаемых для вычисления ΔS_h^z , ΔS_w^z , ΔS , $m_h(\alpha)$, $m_w(\alpha)$ [24]. Необходимо, однако, отметить, что все они базируются на одном из трех подходов, предложенных около 30 лет назад в основополагающих работах [17, 23, 27].

Методика [17] использует аналитическую функцию для описания высотного профиля показателя преломления воздуха (парабола 4-й степени).

В работе [23] применены цепные дроби для компактного представления разложенных в ряд интегралов рефракции. Коэффициенты разложения, которые выражаются через такие же интегралы, при этом определяются на основе численного эксперимента с использованием заранее заданных профилей показателя преломления воздуха (методика «гау трэсинг»). Именно этот подход стал наиболее популярным для получения угловых зависимостей задержки $m(\alpha)$, $m_h(\alpha)$, $m_w(\alpha)$.

Основной идеей работы [27] явилось использование теоремы статики атмосферы, что позволило взять в общем виде интеграл рефракции для гидростатической задержки. В рамках данной модели получены простые соотношения для зенитных за-

держек, которые мы приводим для использования в оценочных расчетах:

$$\Delta S_h^z = \frac{0.002277 P_s}{1 - 0.0026 \cos 2\varphi - 0.00000028 H_s}, \quad (6)$$

$$\Delta S_w^z = 0.002277 \left(\frac{1255}{T_s} + 0.05 \right) e_s.$$

Здесь φ , H_s — широта (в градусах) и высота над уровнем моря (в метрах) точки, где размещается приемник; P_s , T_s , e_s — давление (в мбар*) и температура (в градусах Кельвина) воздуха, парциальное давление водяных паров (в мбар) в данной точке.

Формулы, полученные в многочисленных последующих статьях, являются лишь модификациями результатов указанных выше работ и не затрагивают их основополагающие принципы. Подробный анализ имеющихся в зарубежной литературе моделей тропосферных поправок, выполненный на основе гау трэсинг с использованием данных метеозондирования, полученных в течение 1992 г. на 50 метеостанциях, размещенных, в основном в Северной и Южной Америке, показал [24], что наиболее точные результаты обеспечивают следующие модели: [27] — для зенитной задержки; [15, 19, 21, 25] — для зависимости задержки от угла места (т. е. для mapping function).

Приведем количественные характеристики точности этих моделей. Погрешность определения гидростатической зенитной задержки по модели [27] не превышает 1 мм. Вклад влажности воздуха, т. е. негидростатическая зенитная задержка, моделируется с погрешностью около 3 см с помощью моделей [19, 27]. Такую же погрешность обеспечивает и приведенная в [27] модель полной задержки. Mapping function для гидростатического компонента задержки наиболее точно описывается моделями, приведенными в [15, 19, 25]. Погрешность этих моделей не превышает 0.5 см при $\alpha = 10^\circ$. Модели этих же авторов оказались лучшими и для mapping function, учитывающей вклад влажности (погрешность моделирования не превышает 1.5 мм для $\alpha = 10^\circ$).

Необходимо отметить, что именно перечисленные выше модели предлагаются для практического использования в рекомендациях Международной службы вращения Земли [18].

Полную погрешность моделирования тропосферной задержки можно получить, если просуммировать приведенные выше отдельные составляющие

* 1 мбар = 10^2 Па

погрешности с учетом соотношений (3)—(6). Наиболее просто эта процедура выполняется в случае чистого моделирования: полная погрешность оказывается не менее 3 см при $\alpha = 90^\circ$ и увеличивается с уменьшением α (при $\alpha = 10^\circ$ она составляет не менее 17 см).

Среди причин, приводящих к рассмотренным выше погрешностям, можно указать эмпирический характер моделей зависимости задержки от угла, отклонение от условий гидростатического равновесия в реальной атмосфере, неадекватный учет влажности воздуха и др.

Помимо перечисленных причин рассмотренные выше модели не учитывают еще ряд факторов, что снижает их точность. В частности, эти модели справедливы лишь в приближении сферически симметричной земной атмосферы и не учитывают горизонтальных градиентов показателя преломления воздуха, имеющих место в реальных условиях. Для $\alpha = 10^\circ$ это приводит к дополнительной задержке порядка 2...3 см. Известные в настоящее время модели соответствующих поправок базируются на методе учета горизонтальных градиентов, предложенном Гарднером [24].

Еще одним источником погрешности для рассмотренных моделей является пренебрежение влиянием на задержку сигнала гидрометеоров: облаков, тумана, снега, дождя. В работах [1, 24] даны оценки вклада этих эффектов и показано, что в ряде случаев он может быть весьма существенным. При наличии кучевого дождевого облака, например занимающего диапазон высот 0.7—3.7 км и описываемого добавкой к показателю преломления воздуха порядка $2.3 \cdot 10^{-5}$, дополнительная задержка составит 5.4 см для $\alpha = 90^\circ$ и 32 см для $\alpha = 10^\circ$ [1]. В литературе, однако, нет сведений о каких-либо разработках методов учета гидрометеоров при GNSS-измерениях.

Проведенный анализ показывает, что проблема повышения точности моделирования задержки сигнала в тропосфере применительно к координатно-временным измерениям остается актуальной. Представляют интерес дальнейшие исследования, направленные на поиск новых моделей тропосферной задержки, свободных от ограничений рассмотренных в настоящей работе алгоритмов моделирования. К наиболее актуальным задачам здесь можно отнести отказ от использования теоремы статики и эмпирических подходов при отыскании угловых зависимостей задержки, уточнение моделей учета влажности воздуха, разработка методов учета влияния гидрометеоров и др.

В связи с этим представляется целесообразным развивать новый подход к решению проблемы уче-

та тропосферы, предложенный в работе [6]. В основу нового подхода положен строгий метод решения задач геометрической оптики неоднородных сред — интегральное лучевое приближение (ИЛП). Уравнения ИЛП связывают усредненные вдоль геометрооптических лучей величины и сформулированы специально для анализа интегральных эффектов при распространении электромагнитных волн в атмосфере. Основной идеей метода ИЛП является представление интегралов рефракции квадратурными суммами Эйлера — Маклорена, содержащими в качестве параметров интегральные характеристики среды. Искомые поправки при этом могут быть выражены в виде функций от метеопараметров атмосферы в точке размещения приемника сигнала (причем эти функции не являются эмпирическими, как в известных методах, а представлены строгими аналитическими соотношениями). Существенно, что метод ИЛП не требует привлечения теоремы статики атмосферы. Его уравнения сформулированы в общем случае произвольной трехмерно-неоднородной среды, и следовательно, позволяют учесть горизонтальные градиенты показателя преломления воздуха.

К настоящему времени разработано несколько упрощенных вариантов практической реализации метода ИЛП, в частности для определения астрономической рефракции в оптическом диапазоне [7], для определения атмосферных поправок к результатам SLR-измерений [4], для определения тропосферных поправок в радиодиапазоне [26]. Расчетные алгоритмы реализованы в виде современных компьютерных программ.

Сравнительный анализ точности моделей ИЛП и известных моделей проведен на базе ray tracing с использованием годовых наборов данных метеозондирования атмосферы, полученных в различных регионах Украины, а также на нескольких метеостанциях США и Канады. Показано, что новый подход позволяет уменьшить систематическую составляющую погрешности определения атмосферной поправки как в оптическом, так и в радиодиапазоне длин волн.

1. Андрианов В. А., Мосин Е. Л., Смирнов В. М. Оценка влияния капельно-жидких атмосферных образований на величину тропосферной погрешности радиотехнических измерений дальности и скорости искусственных спутников Земли // Радиотехника и электроника.—1992.—Вып. 3.—С. 555—558.
2. Гофманн-Велленгоф Б., Лихтенеггер Р., Коллинз Д. Глобальная система визначення місцеположення (GPS). Теорія і практика: Пер. з англ. третього вид. / Під ред. Я. С. Яцківа. — Київ: Наук. думка, 1995.—380 с.
3. Кравцов Ю. А., Фейзулин З. И., Виноградов А. Г. Прохождение радиоволн через атмосферу Земли. — М.: Радио и

- связь, 1983.—224 с.
4. Миронов Н. Т., Прокопов А. В., Ремаев Е. В. Исследование нового метода учета влияния земной атмосферы при лазерных измерениях расстояний до ИСЗ // Кинематика и физика небес. тел.—1997.—13, № 4.—С. 89—96.
 5. Прилепин М. Т. Определение показателя преломления воздуха при измерении расстояний светомодуляционными дальномерами // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка.—1957.—№ 2.—С. 123—132.
 6. Прокопов А. В. Интегральные методы лучевой теории в задачах исследования и учета влияния земной атмосферы на точность астрономо-геодезических наблюдений // Метрология времени и пространства: Тр. 5 Российского симп. — Менделеево: ИМВП ГП ВНИИФТРИ, 1994.—С. 212—217.
 7. Прокопов А. В., Ремаев Е. В. О возможности повышения точности определения астрономической рефракции по наземным методанным // Кинематика и физика небес. тел.—1996.—12, № 3.—С. 37—43.
 8. Прокопов А. В., Ремаев Е. В. Рефракционные ограничения точности двухволновой спутниковой лазерной дальнометрии // Український метрологічний журнал.—2000.—Вип. 2.—С. 5—9.
 9. Beutler G., Bauersima I., Gurtner W. et al. Atmospheric Refraction and Other Important Biases in GPS Carrier Phase Observations // Atmospheric Effects on Geodetic Space Measurements / Ed. F. K. Brunner. Monograph 12, School of Surveying, The University of New South Wales, Kensington, Australia, 1988.—P. 15—43.
 10. Boer A., Hessels U. Two Color Laser Ranging with TIGO SLR System. Status and First Results // Presented at the 11 International Workshop on Laser Ranging, 21—25 September, Deggendorf, Germany, 1998.
 11. Eissfeller B., Hein G. W., Winkel J. C., et al. Requirements on the Galileo Signal Structure // ION GPS 2000, 19-22 September 2000, Salt Lake City, UT, 2000.—P. 1772—1781.
 12. Elgered G. Refraction in the troposphere // Proc. of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy / Eds J. C. de Munck, T. A. Th. Spoelstra. — The Hague, The Netherlands, 19—22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, The Netherlands, N 36, New Series, 1992.—P. 13—19.
 13. Elgered G. Tropospheric radio-path delay from ground-based microwave radiometry // Atmospheric Remote Sensing by Microwave Radiometry / Ed. M. A. Janssen. — John Wiley and Sons, 1993.—P. 215—258.
 14. Hartman G. K., Leitinger R. Range errors due to ionospheric and tropospheric effects for signal frequencies above 100 MHz // Bulletin Geodesique.—1984.—58.—P. 109—136.
 15. Herring T. A. Modeling atmospheric delays in the analysis of space geodetic data // Proc. of Symposium on Refraction of Transatmospheric Signals in Geodesy / Eds J. C. de Munk, T. A. Th. Spoelstra. — The Hague, The Netherlands, 19-22 May, Netherlands Geodetic Commission, Publications on Geodesy, Delft, The Netherlands, N 36, New Series, 1992.—P. 157—164.
 16. Herring T. A., Davis J. L., Shapiro I. I. Geodesy by radio interferometry: The application of Kalman filtering to the analysis of very long baseline interferometry data // J. Geophys. Res.—1990.—95, N B8.—P. 12561—12581.
 17. Hopfield H. S. Two-quartic tropospheric refractivity profile for correcting satellite data // J. Geophys. Res.—1969.—74, N 18.—P. 4487—4499.
 18. IERS Conventions // IERS Technical Note 21 / Ed. D. D. McCarthy. — U.S. Naval Observatory, 1996.
 19. Ifadis I. The atmospheric delay of radio waves: modeling the elevation dependence on a global scale // Technical Report N 38L, School of Electrical and Computer Engineering, Chalmers University of Technology, Goeteborg, Sweden, 1986.
 20. Jackson D. M., Gasiewski A. J. Millimeter-wave radiometric observations of the troposphere: a comparison of measurements and calculations based on radiosonde and Raman lidar // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.—1995.—33, N 1.—P. 3—14.
 21. Lanyi G. Tropospheric delay effects in radio interferometry // The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—78, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., 1984.—P. 152—159.
 22. Linfield R. P., Teitelbaum L. P., Skjerve L. J., et al. A Test of water vapor radiometer-based troposphere calibration using VLBI observations on a 21-kilometer baseline // The Telecommunications and Data Acquisition Progress Report 42—122, Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, Calif., 1995.—P. 12—31.
 23. Marini J. W., Murray C. W. Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees // NASA-TM-X-70555. — Greenbelt, Md.: Coddard Space Flight Center, 1973.
 24. Mendes V. B. Modeling the neutral-atmosphere propagation delay in radiometric space techniques // Ph. D. dissertation, Department of Geodesy and Geomatics Engineering Technical Report N 199, University of New Brunswick, Fredericton, New Brunswick, Canada, 1999.—353 p.
 25. Niell A. E. Global mapping functions for the atmosphere delay at radio wavelengths // J. Geophys. Res.—1996.—101, N B2.—P. 3227—3246.
 26. Prokopov A., Remayev Ye. New approach to the problem of determination of atmospheric refractivity corrections for space geodetic applications // Reports on Geodesy.—2000.—N 9 (55).—P. 43—48.
 27. Saastamoinen J. Contributions to the theory of atmospheric refraction. In three parts // Bulletin Geodesique.—1973.—N 105.—P. 279—298; N 106.—P. 383—397; N 107.—P. 13—34.

METHODS OF ALLOWING FOR EARTH'S ATMOSPHERE INFLUENCE IN SPACE GEODESY AND NAVIGATION

A. V. Prokopov

An analytical survey of literature referring to the methods of allowing for Earth's atmosphere influence on results of coordinate and time determinations is given. These determinations are carried out by modern space geodesy and navigation measuring systems using the electromagnetic waves of radio and optical bands.