

УДК 528+551.5

РЕФРАКЦИЯ РАДИОВОЛН НА ЗАТМЕННЫХ ТРАССАХ СПУТНИК—СПУТНИК КАК ХАРАКТЕРИСТИКА СОСТОЯНИЯ АТМОСФЕРЫ

С. С. Матюгов, О. И. Яковлев, А. Г. Павельев, А. А. Павельев, В. А. Ануфриев*

Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В. А. Котельникова РАН,
г. Фрязино, Россия

Представлены результаты анализа характеристик рефракции радиоволн в центральном районе европейской части России за 2007–2013 годы на затменных трассах между навигационными спутниками GPS и исследовательскими спутниками FORMOSAT-3. Обсуждаются суточные, сезонные и годовые изменения угла рефракции на высотах $2 \div 25$ км. Показано, что этот угол может быть использован как самостоятельная характеристика состояния атмосферы и тенденций её долговременных изменений. Приведены изменения угла рефракции в дневное и ночное время в зимний и летний сезоны года. Обсуждаются тенденции изменений рефракции в атмосфере за семь лет.

ВВЕДЕНИЕ

В результате создания радиотрасс спутник—спутник появилась возможность изучения методом радиопросвечивания влияния атмосферы на характеристики радиоволн, когда спутник, принимающий сигналы, заходит за горизонт по отношению к передающему спутнику и лучевая линия радиоволн осуществляет почти вертикальное сечение атмосферы. Уже в первых работах было показано, что изменения характеристик радиоволн дают сведения о состоянии атмосферы, т. е. можно разработать новый глобальный и всепогодный радиозатменный метод определения высотных профилей температуры и давления, изучения турбулентности и внутренних гравитационных волн, оценки характеристик облачности и влажности. Этапы развития этого метода зондирования атмосферы описаны в работах [1–6], где приведена полная библиография соответствующих статей. В этих работах изложены особенности радиозатменного метода, результаты анализа точности определения атмосферных параметров и показано, что этим методом можно получать сведения о глобальном распределении высотных профилей температуры и давления с точностью не хуже, чем традиционными методами метеорологического зондирования атмосферы, т. е. осуществлять её мониторинг.

Для определения параметров атмосферы используется сложный алгоритм, включающий в себя вычисление угла рефракции и коэффициента преломления радиоволн и учитывающий при этом экспериментальные значения изменений фазы или частоты радиоволн, а также высокоточные данные об орбитах спутников и теоретические соотношения между давлением, влажностью и температурой. В работе [7] отмечено, что прямое использование результатов измерения угла рефракции в глобальных числовых моделях прогноза погоды может иметь преимущество по сравнению с использованием высотных профилей коэффициента преломления или восстановленных профилей температуры и влажности. В работе [8] показано, что угол рефракции может быть использован для сопоставления реально существующего поля коэффициента преломления и его значений, вычисленных на основе гидродинамической модели общей циркуляции атмосферы. В работах [9, 10] отмечено, что угол рефракции можно применять и как характеристику

* ssm117@ire216.msk.su

долговременных изменений характеристик атмосферы, т. к. при затменном зондировании высотный профиль угла рефракции определяется с большей точностью, чем другие атмосферные характеристики.

Возможности использования результатов затменного зондирования для обнаружения климатических изменений атмосферы были проанализированы в работе [11], где также отмечено преимущество использования для этих целей данных об угле рефракции. В работе [12] для европейской части России была изучена высотная зависимость угла рефракции $\xi(H)$ без разделения по сезонам года и времени суток. Для выяснения эффективности описания состояния атмосферы с использованием этой характеристики необходимо проанализировать чувствительность зависимости $\xi(H)$ к изменению погодных или климатических условий дня и ночи для разных временных интервалов в различных географических и климатических районах.

Цель данной статьи состоит в выяснении закономерностей суточных, сезонных и долговременных изменений угла атмосферной рефракции в центральном районе европейской части России на высотах $2 \div 25$ км как новой высокоточной характеристики регионального и глобального состояния атмосферы. В дальнейшем мы будем использовать как эквивалентные термины «угол рефракции» при описании количественных значений и «рефракция» для качественной характеристики эффекта.

1. ОСОБЕННОСТИ ЗАТМЕННОГО РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ АТМОСФЕРЫ

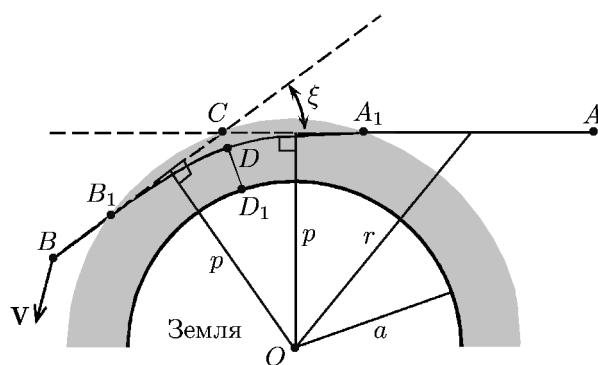


Рис. 1. Схема радиопросвечивания атмосферы на трассе спутник—спутник

Для решения поставленной задачи используем данные радиозатменной системы, образованной 6-ю исследовательскими спутниками FORMOSAT-3 (приёмники сигналов) и 24-мя навигационными спутниками GPS (излучатели радиоволн). Зондирование атмосферы осуществлялось двумя когерентными сигналами с частотами $f_1 = 1575,4$ МГц и $f_2 = 1227,6$ МГц, что позволяло исключать мешающее влияние ионосферы. Высокая стабильность частоты радиоволн и тщательный контроль характеристик орбит спутников обеспечивали необходимую точность определения угла рефракции ξ и минимальной высоты лучевой линии H . Радиозатменная система обеспечивает в каждые сутки около 1800 зондирований атмосферы в разных районах Земли. При выборе конкретного климатического района необходимо ограничить его размеры, что приводит к уменьшению числа ежесуточных зондирований атмосферы в этом районе. Мы ограничили выбранный район по северной широте диапазоном $54^\circ \div 58^\circ$, по долготе — диапазоном $35^\circ \div 39^\circ$, что соответствует участку поверхности с площадью 450×250 км². Для анализа особенностей изменений угла рефракции использовались результаты 1320-ти зондирований атмосферы, осуществлённых в выбранном районе в период с 01 января 2007 года по 31 декабря 2013 года.

На рис. 1 показана схема радиопросвечивания атмосферы на затменной трассе спутник—спутник: в пункте A расположен высокоорбитальный навигационный спутник, а в точке B — низкоорбитальный аппарат, заходящий за лимб Земли. Лучевая линия радиоволн ADB на прямолинейных отрезках AA₁ и BB₁ проходит вне атмосферы; зондирование атмосферы осуществляется на искривлённом участке A₁DB₁. Из-за движения спутника B минимальная высота лучевой линии DD₁ = H (перигей луча) уменьшается и лучевая линия осуществляет почти вертикаль-

Для решения поставленной задачи используем данные радиозатменной системы, образованной 6-ю исследовательскими спутниками FORMOSAT-3 (приёмники сигналов) и 24-мя навигационными спутниками GPS (излучатели радиоволн). Зондирование атмосферы осуществлялось двумя когерентными сигналами с частотами $f_1 = 1575,4$ МГц и $f_2 = 1227,6$ МГц, что позволяло исключать мешающее влияние ионосферы. Высокая стабильность частоты радиоволн и тщательный контроль характеристик орбит спутников обеспечивали необходимую точность определения угла рефракции ξ и минимальной высоты лучевой линии H . Радиозатменная система обеспечивает в каждые сутки около 1800 зондирований атмосферы в разных районах Земли. При выборе конкретного климатического района необходимо ограничить его размеры, что приводит к уменьшению числа ежесуточных зондирований атмосферы в этом районе. Мы ограничили выбранный район по северной широте диапазоном $54^\circ \div 58^\circ$, по долготе — диапазоном $35^\circ \div 39^\circ$, что соответствует участку поверхности с площадью 450×250 км². Для анализа особенностей изменений угла рефракции использовались результаты 1320-ти зондирований атмосферы, осуществлённых в выбранном районе в период с 01 января 2007 года по 31 декабря 2013 года.

ный разрез атмосферы. Характеристикой рефракции является угол ξ между пересекающимися в точке C прямыми AA_1 и BB_1 . Этот угол связан известными соотношениями с высотным профилем коэффициента преломления радиоволн и, следовательно, с температурой, плотностью и влажностью атмосферы.

Приведём соответствующие соотношения. При теоретическом анализе задачи предполагается, что атмосфера является локально сферически симметричной средой, поэтому кривая A_1B_1 симметрична относительно точки D — перигея лучевой линии AB . Используем соотношения для угла рефракции ξ

$$\xi(p) = -2p \int_p^\infty \frac{1}{n} \frac{dn}{dr} (r^2 n^2 - p^2)^{-1/2} dr \quad (1)$$

и коэффициента преломления радиоволн n

$$n = 1 + 10^{-6} N, \quad (2)$$

$$N = \mu P[\text{мбар}]/T[\text{K}] = \mu K[\text{эрг/К}]\rho[\text{см}^{-3}]. \quad (3)$$

Здесь N — приведённый коэффициент преломления, $\mu = 77,6$, P — давление, T — температура, $K = 1,38 \cdot 10^{-16}$ — постоянная Больцмана, ρ — концентрация газа (число молекул в единице объёма). Прицельное расстояние лучевой линии p связано с высотой H и коэффициентом преломления $n(H)$ на этой высоте соотношением

$$(a + H)n(H) = p, \quad (4)$$

где a — радиус Земли. Соотношения (1)–(4) являются основными при интерпретации зависимостей угла ξ от высотных профилей коэффициента преломления, температуры и давления. Необходимо отметить, что формула (3) приближённая, т. к. она не учитывает влияние влажности. Влиянием влажности на коэффициент преломления можно пренебречь для $H > 8$ км.

Угол рефракции, согласно (1), определяется высотными профилями коэффициента преломления и его вертикального градиента. Следовательно, согласно (3), он зависит от плотности и её градиента в атмосфере. Применяя к выражению (1) обратное преобразование Абеля, по экспериментальной зависимости $\xi(H)$ определяют высотный профиль приведённого коэффициента преломления N , а по выражению (3) находят зависимость плотности воздуха от высоты. Существенно, что точность определения величин $N(H)$ и $\rho(H)$ ниже, чем точность нахождения угла рефракции ξ , т. к. ξ получается непосредственно из высокоточных измерений приращения фазы сигнала, а значения $N(H)$ и $\rho(H)$ находятся с использованием преобразования Абеля. Более подробно определение величин $\xi(H)$, $N(H)$ и $\rho(H)$ методом радиопросвечивания изложено в работах [4, 6].

При радиозатменном зондировании атмосферы измеряемой величиной является обусловленное влиянием высотных градиентов плотности среды приращение фазового пути сигнала (фаза) как функция времени. Измерение приращения осуществляется с частотой отсчётов 50 Гц. В зависимости от взаимного положения навигационного спутника GPS и спутника FORMOSAT-3 скорость изменения высоты перигея лучевой линии $DD_1 = H$, т. е. высоты зондируемого слоя атмосферы, изменяется как от сеанса к сеансу, так и в пределах каждого сеанса из-за рефракционного замедления [1]. Вследствие этого шаг измерений по высоте — величина переменная и составляет в среднем около 50 м при зондировании верхней стратосферы и около 5 м на высотах менее 3 км. Полученные в каждом сеансе измерений зависимости $\xi(H)$ аппроксимировались полиномом первой степени по 25-ти отсчётам ξ для определения значения угла рефракции на одинаковых для всех сеансов измерений высотах H . Такая процедура эквивалентна усреднению

значений ξ на высотном интервале, примерно равном радиусу первой зоны Френеля. При шаге первичных экспериментальных данных по времени в 0,02 с это обеспечивало определение значений ξ на одинаковых для всех сеансов измерений высотах с ошибкой привязки высоты не более ± 50 м в стратосфере и ± 5 м в нижней тропосфере. Для анализа вариаций угла рефракции в зависимости от высоты мы выбрали шаг по высоте равным 1 км.

2. СУТОЧНЫЕ И СЕЗОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ УГЛА РЕФРАКЦИИ

Для выяснения суточных и сезонных вариаций угла рефракции на разной высоте H были использованы результаты измерений зависимостей $\xi(H)$ в зимнее и летнее время. Экспериментальные зависимости $\xi(H)$ отличаются изменчивостью, что не позволяет найти регулярную суточную зависимость. Это связано с тем, что в среднем за каждые двое суток удаётся получить только одну экспериментальную зависимость $\xi(H)$ для случайного значения местного времени. Для трёхчасовых интервалов в условиях дня и ночи было получено достаточное число экспериментальных зависимостей $\xi(H)$. Поэтому в качестве контрольной характеристики состояния атмосферы были выбраны четыре значения среднего угла рефракции, соответствующих летнему сезону в июле—августе и зимнему в январе—феврале для ночных (00:00÷03:00) и дневных (12:00÷15:00) часов местного времени. Каждая из этих величин определялась как среднее арифметическое по данным 20–30-ти сеансов радиопросвечивания атмосферы, полученным за семь лет. В табл. 1 приведены характеристики средних значений ξ в миллирадианах для разной высоты H . Здесь приняты следующие обозначения: ξ_{sd} — угол рефракции для летнего дня, ξ_{sn} — для летней ночи, ξ_{wd} — для зимнего дня, ξ_{wn} — для зимней ночи.

Для сравнения высотных профилей угла рефракции, полученных при сильно отличающихся условиях, приведены разности углов рефракции: $\xi_{sd} - \xi_{sn}$ — летом днём и ночью, $\xi_{wd} - \xi_{wn}$ — зимой днём и ночью, $\xi_{wd} - \xi_{sd}$ — днём зимой и летом, $\xi_{wn} - \xi_{sn}$ — ночью зимой и летом. Табл. 1 даёт достаточно точные сведения о высотном профиле угла рефракции днём и ночью в летний и зимний сезоны. Видно, что рефракция на разных высотах изменяется различно. В тропосфере на высотах 2÷3 км и летом, и зимой рефракция днём больше, чем ночью, а при $H = 4\div 6$ км летом рефракция ночью больше, чем днём. В области тропопаузы $H = 9\div 11$ км наблюдается сильная изменчивость рефракции. В стратосфере при $H = 13\div 25$ км угол рефракции летом и зимой,

Таблица 1. Средние за 2007–2013 годы высотные зависимости рефракции в летний и зимний сезоны для дневного и ночного времени

H , км	ξ_{sd}	ξ_{sn}	ξ_{wd}	ξ_{wn}	$\xi_{sd} - \xi_{sn}$	$\xi_{wd} - \xi_{wn}$	$\xi_{wd} - \xi_{sd}$	$\xi_{wn} - \xi_{sn}$
2	22,25	21,47	18,80	18,53	+0,78	+0,27	-3,45	-2,94
3	18,56	17,43	16,24	16,07	+1,13	+0,17	-2,32	-1,36
4	14,47	14,50	14,04	13,94	-0,03	+0,10	-0,43	-0,56
5	12,12	12,46	12,44	12,32	-0,34	+0,12	+0,32	-0,14
7	9,47	9,46	10,00	9,92	+0,01	+0,08	+0,53	+0,46
9	7,69	7,77	8,16	8,06	-0,08	+0,10	+0,47	+0,29
11	6,55	6,41	6,18	6,36	+0,14	-0,18	-0,37	-0,05
13	4,69	4,66	4,35	4,39	+0,03	-0,04	-0,34	-0,27
17	2,54	2,54	2,34	2,36	+0,01	-0,02	-0,20	-0,18
20	1,59	1,61	1,46	1,48	-0,02	-0,02	-0,13	-0,13
23	1,00	1,00	0,90	0,92	0,00	-0,02	-0,10	-0,08
25	0,73	0,73	0,64	0,67	0,00	-0,03	-0,09	-0,06

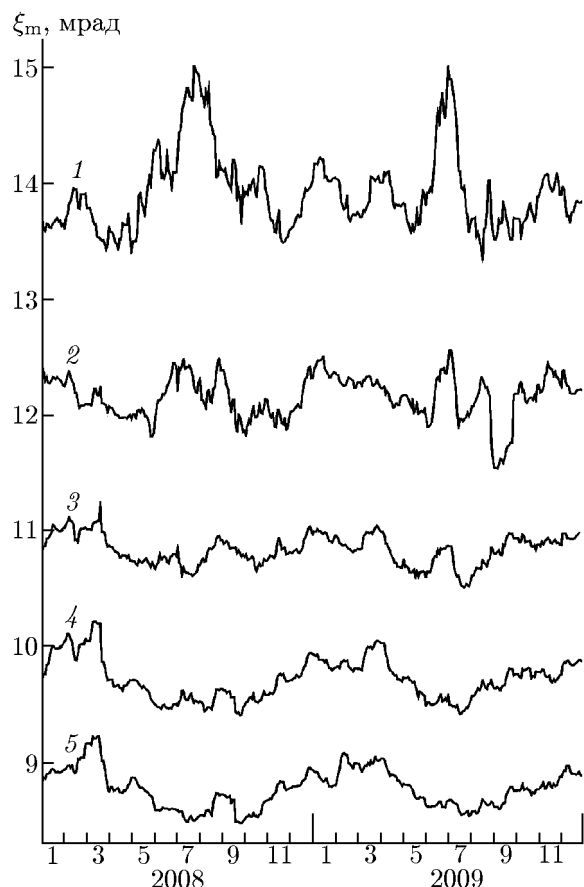


Рис. 2. Примеры сезонных зависимостей угла рефракции в тропосфере. По горизонтальной оси отложены месяцы года по номерам, кривые 1–5 отвечают $H = 4; 5; 6; 7; 8$ км соответственно

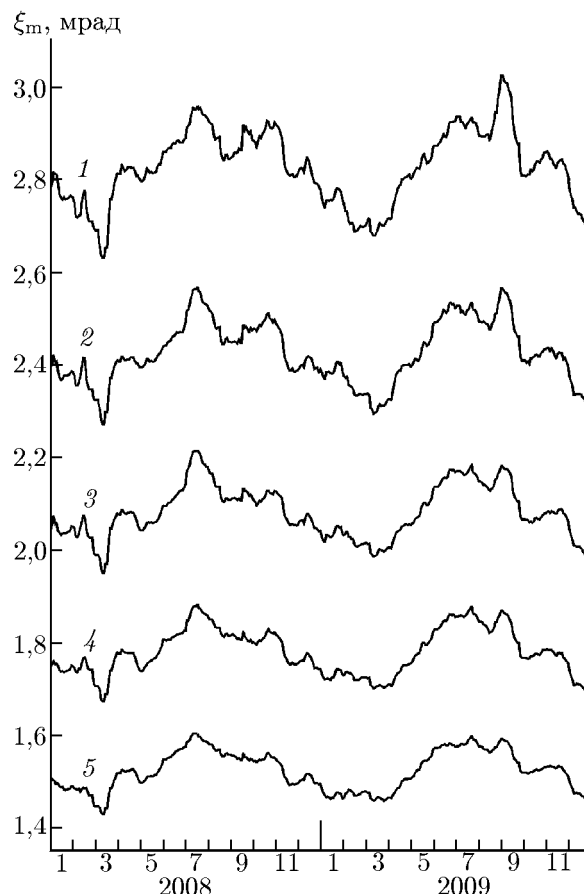


Рис. 3. Типичные сезонные зависимости угла рефракции в стратосфере. По горизонтальной оси отложены месяцы года по номерам, кривые 1–5 отвечают $H = 16; 17; 18; 19; 20$ км соответственно

днём и ночью изменяется незначительно, хотя летом в дневное время он несколько больше, чем ночью.

Для анализа сезонных вариаций рефракции были определены методом скользящего среднего за интервал в 30 суток значения угла ξ_m без разделения условий дня и ночи. На рис. 2 и 3 приведены примеры сезонных изменений ξ_m , найденных по данным измерений в 2008 и 2009 годах. Видно, что в тропосфере (рис. 2) в октябре–январе на высоте $4 \div 8$ км угол ξ_m изменяется незначительно. В июне–июле при $H = 4 \div 5$ км регулярно регистрируется максимальное значение ξ_m . В стратосфере (рис. 3) для всех высот характерна чёткая сезонная зависимость: в июле–августе наблюдается максимальное значение ξ_m , а в феврале–марте регистрируется минимальный уровень ξ_m .

Уровень отклика рефракции на изменение состояния атмосферы демонстрируют результаты зондирования её в 2010 году. В исследуемом районе в этот год летом стояла сухая экстремально жаркая погода. Следствием этого стало минимальное значение угла рефракции в тропосфере за семилетний период, равное 10,41 мрад на высоте $H = 6$ км, что на 3% меньше его значения на этой высоте за все годы измерений. В стратосфере летом 2010 года, наоборот, наблюдались максимальные значения угла рефракции. Так, на высоте 20 км его величина составляла 1,63 мрад, что на 2% больше, чем его среднее значение в другие годы.

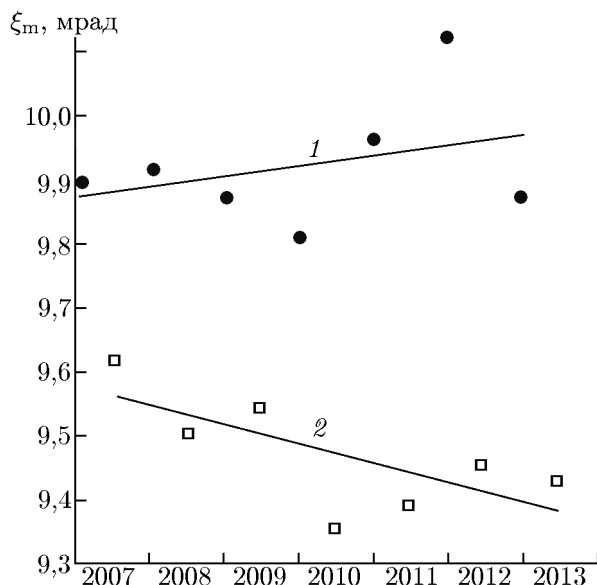


Рис. 4. Долговременные изменения угла рефракции в тропосфере на высоте 7 км. Точки соответствуют зимнему сезону, квадраты — летнему, отрезки прямых 1 и 2 — аппроксимациям сезонных зависимостей

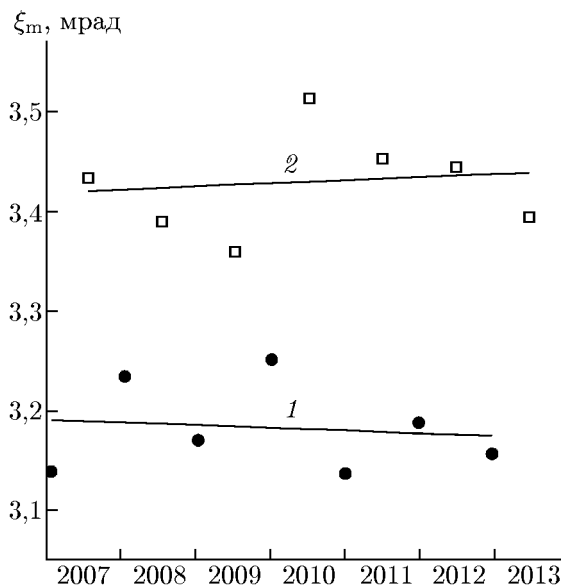


Рис. 5. Изменения угла рефракции в стратосфере на высоте 15 км. Точки соответствуют зимнему сезону, квадраты — летнему, отрезки прямых 1 и 2 — аппроксимациям сезонных зависимостей

3. ТЕНДЕНЦИИ ДОЛГОВРЕМЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ РЕФРАКЦИИ

Рассмотрим изменения рефракции за семь лет наблюдений. На рис. 4 и 5 в качестве примеров приведены сведения об изменении средних значений угла рефракции ξ в зимние и летние сезоны 2007–2013 годов. На рис. 4 представлены данные о вариациях ξ на высоте $H = 7$ км, а на рис. 5 — на высоте 15 км. Точки на рисунках соответствуют средним значениям ξ за январь–февраль, а квадраты — за июль–август соответствующего года. Каждое значение ξ получено усреднением данных 20÷40 сеансов зондирования атмосферы в соответствующий сезон года. Отрезками прямых линий 1 и 2 на рис. 4 и 5 показаны результаты аппроксимации методом наименьших квадратов долговременных изменений рефракции в зимний и летний сезоны соответственно.

На рис. 4 видно, что в тропосфере на высоте 7 км рефракция зимой больше, чем летом, и наблюдается незначительное увеличение ξ за 7 лет. Более высокие значения угла рефракции зимой обусловлены тем, что в этот сезон на широте исследуемого района вертикальные градиенты плотности атмосферы выше, чем летом [13]. В соответствии с уравнением (1), угол рефракции зависит от коэффициента преломления атмосферы и его вертикального градиента. Летом ξ уменьшается на $2,9 \cdot 10^{-2}$ мрад за год, что может быть следствием понижения плотности тропосферы из-за повышения её температуры.

Рисунок 5 описывает изменения рефракции в стратосфере на высоте 15 км за 7 лет. В стратосфере рефракция зимой меньше, чем летом, и проявляется тенденция к её уменьшению. В летний же сезон наблюдается незначительный положительный тренд. Наиболее явно изменение рефракции в исследованном районе за семь лет проявляется в летний период, при этом уменьшение рефракции в стратосфере всегда сопровождается её увеличением в тропосфере, а величина изменения зависит от высоты зондируемого слоя.

Наблюдаемые в зимний и летний сезоны за 7 лет тренды рефракции малы и указывают на противоположные изменения в тропосфере и в стратосфере, что отражает особенности сезонных

вариаций атмосферы во всей её толще. Мы провели анализ тенденций изменения угла рефракции при зондировании атмосферы в диапазоне высот от 5 до 25 км используя данные всех 1320-ти измерений, осуществлённых в выбранном районе за 7 лет. При этом ряды данных $\xi(H, t)$, где t — время измерения, выраженное в сутках и отсчитываемое от нуля часов 1 января 2007 года, аппроксимировались прямой с использованием метода наименьших квадратов. Таким образом определялось приращение угла рефракции $\Delta\xi(H)$ на заданной высоте H . Были изучены тенденции изменений угла рефракции на высотах 5÷25 км с шагом по высоте 1 км. Результаты приведены на рис. 6. Положительные значения $\Delta\xi$ соответствуют увеличению рефракции на данной высоте, а отрицательные — её уменьшению. Зависимость трендов от высоты показывает, что в течение семилетнего периода в тропосфере наблюдалось уменьшение угла рефракции, а в стратосфере — его увеличение. Найденные регулярные изменения ξ максимальны по модулю в средней тропосфере и в нижней стратосфере. Наиболее вероятными причинами уменьшения рефракции в средней тропосфере является незначительное — по метеорологическим меркам — повышение её среднегодовой температуры, а увеличение рефракции в стратосфере связано либо со столь же незначительным понижением температуры из-за радиационного охлаждения, либо с расширением атмосферы.

Долговременные сезонные тренды рефракции удаётся выявить в интервалах высот 5÷9 км и 11÷25 км. Ниже 5 км вариации угла рефракции в разные годы измерений составляют от 2 % до 4 % зимой и от 7 % до 12 % летом относительно среднего значения за соответствующий сезон. Эти вариации ξ обусловлены значительными изменениями температуры и содержания водяного пара даже в пределах одних суток, они случайны, что приводит к появлению «синоптического шума», затрудняющего выявление тенденции изменений угла ξ на этих высотах на ограниченном интервале времени. Для обнаружения трендов рефракции в тропосфере ниже 5 км необходимо уменьшить влияние «синоптического шума» с помощью низкочастотной фильтрации. Для этого требуется анализ данных измерений за более длительный интервал времени, чем имеющийся. Аналогичная ситуация складывается и в высотном интервале от 9 до 11 км, в котором, по приведённым в работе [13] данным, в зондируемом районе расположена тропопауза. Медленные сезонные и более быстрые суточные изменения высоты тропопаузы также приводят к возникновению «синоптического шума».

Максимальные по модулю величины регулярных изменений угла рефракции достигают примерно 10^{-2} мрад в год, т. е. на порядок превышают среднеквадратические значения вариаций ξ , регистрируемых в каждом индивидуальном сеансе затменного зондирования, но сравнимы со среднеквадратическими значениями сезонных и суточных изменений рефракции. Для уточнения трендов рефракции есть два способа: первый — увеличить длину ряда наблюдений для уменьшения влияния «синоптического шума», второй — рассмотреть тенденции изменений рефракции в других районах, смещённых от изученного района по широте или долготе.

Мы также провели предварительный анализ семилетних трендов рефракции в трёх других районах, центры которых находятся на том же меридиане, что и район, рассмотренный в этой

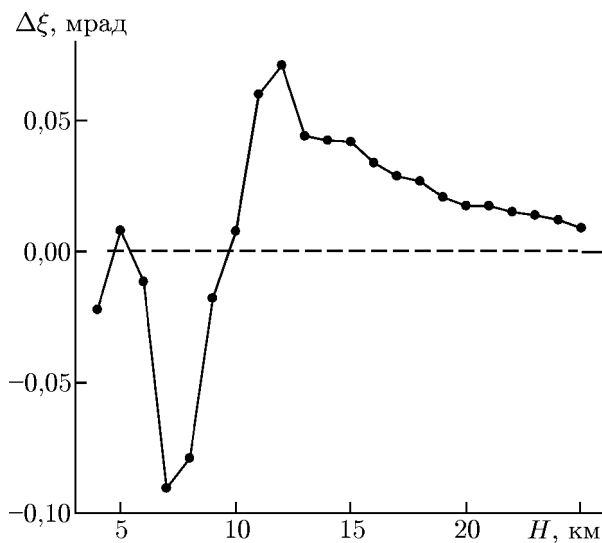


Рис. 6. Тренд угла рефракции на разных высотах, определённый по данным измерений за 7 лет

работе. Один район расположен севернее (координаты центра 75° с. ш., 37° в. д.), а два других находятся на том же самом меридиане на широте 35° с. ш. и на экваторе. Площади районов были выбраны исходя из обеспечения примерного равенства числа зондирований каждого района за 7 лет. Оказалось, что в районах, находящихся севернее и южнее, тенденции изменений угла рефракции подобны представленным на рис. 6, что свидетельствует об общей причине изменений характеристик атмосферы в регионах, расположенных в разных широтных зонах.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Первая регулярно действующая радиозатменная система GPS — FORMOSAT-3 позволила получить высокоточные высотные профили угла рефракции для центрального района европейской части России в летний и зимний сезоны в дневное и ночное время. Изменения высотного профиля угла рефракции в тропосфере и в стратосфере имеют квазипериодический характер с выраженной суточной и сезонной цикличностью. Для выяснения малых изменений профиля $\xi(H)$ в разных районах России необходимо иметь опорную (эталонную) зависимость угла рефракции от высоты. Мы предлагаем значения угла $\xi(H)$, приведённые в табл. 1, принять как эталонные для евразийской территории России в широтной зоне от 50° до 60° . Тенденции изменений угла рефракции за семилетний период, выявленные в третьем разделе, являются предварительными.

Использование угла рефракции как новой характеристики состояния атмосферы на первом этапе исследования требует детального анализа зависимости $\xi(H)$ в разных климатических районах. Мы провели дополнительный анализ зависимости $\xi(H)$ для района с центром в г. Новосибирск. Результаты сопоставления долговременных изменений угла рефракции и температуры в европейском и азиатском регионах России будут приведены в другой публикации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яковлев О. И. Космическая радиофизика. М.: Научная книга, 1998. 432 с.
2. Special issue of Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Science. 2000. V. 11, No. 1.
3. First CHAMP mission results for gravity, magnetic and atmospheric studies / C. Reigber, H. Lühr, P. Schwintzer. Berlin: Springer, 2003. 563 p.
4. Occultations for probing atmosphere and climate / Ed. G. Kirchengast, U. Foelsche, A. Steiner. Berlin: Springer-Verlag, 2004. 408 p.
5. New Horizons in Occultation Research. Studies in Atmosphere and Climate / Ed. A. Steiner, B. Pirscher, U. Foelsche, G. Kirchengast. Heidelberg: Springer, 2009. 316 p.
6. Яковлев О. И., Павельев А. Г., Матюгов С. С. Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: URSS, 2010. 208 с.
7. Healy S. B., Thépaud J.-N. // Q. J. R. Meteorol. Soc. 2006. V. 132, No. 615. P. 605.
8. Гурвич А. С., Горбунов М. Е., Корнблю Л. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. Т. 42, № 6. С. 771.
9. Pindel D., Rhodin A. New Horizons in Occultation Research. Heidelberg: Springer, 2009. P. 111.
10. Ringer M. A., Healy S. B. // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35, No. 5. Art no. L05708.
11. Steiner A. K., Hunt D., Ho S.-P., et al. // Atmos. Chem. Phys. 2013. V. 13, No. 3. P. 1469.
12. Павельев А. А., Павельев А. Г., Матюгов С. С., Яковлев О. И. // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57, № 8. С. 829.
13. Седунов Ю. С., Авдюшин С. И. и др. Атмосфера. Справочник (справочные данные, модели). Л.: Гидрометеиздат, 1991. 510 с.

Поступила в редакцию 6 мая 2016 г.; принята в печать 25 августа 2016 г.

**REFRACTION OF RADIO WAVES ON THE RADIO-OCCULTATION
SATELLITE-TO-SATELLITE PATHS AS A CHARACTERISTIC
OF THE ATMOSPHERIC STATE**

S. S. Matyugov, O. I. Yakovlev, A. G. Pavelyev, A. A. Pavelyev, and V. A. Anufriev

We present the results of analyzing the radio-wave refractive characteristics measured on the radio-occultation paths between the GPS navigation satellites and the FORMOSAT-3 research satellites in the central region of the European territory of Russia in 2007–2013. The diurnal, seasonal, and annual variations in the refraction angle at altitudes of 2 to 25 km are discussed. It is shown that the refraction angle can be used as an independent characteristic of the atmospheric state and its long-term variation trends. Diurnal and nocturnal variations in the refraction angle in the winter and summer seasons are analyzed. Trends in the atmospheric refraction variations over seven years are discussed.