

Суточные, сезонные и долговременные вариации угла рефракции на трассах спутник-спутник как индикатор состояния атмосферы

С.С. Матюгов, О.И. Яковлев, А.А. Павельев, А.Г. Павельев

*Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН
Фрязино, 141190, Россия
E-mail: ssm117@ire216.msk.su*

Осуществлен анализ зависимости угла рефракции от минимальной высоты лучевой линии радиоволн по результатам затененного зондирования атмосферы на трассах спутник-спутник в европейской части России в период 2007–2013 гг. Высотные зависимости угла рефракции и прицельного параметра определялись дифференцированием по времени зарегистрированной на низкоорбитальном космическом аппарате FORMOSAT 3 разности фаз опорного и прошедшего через атмосферу сигналов спутников радионавигационной системы GPS. Фаза опорного сигнала вычислялась бортовым приемным устройством для случая свободного пространства по высокоточному прогнозу орбит излучающего и принимающего спутника. Высотная привязка полученных данных осуществлялась с помощью прицельного параметра по данным высокоточных определений орбитальных параметров спутников GPS и FORMOSAT 3. Выявлены долговременные изменения угла атмосферной рефракции как высокоточной характеристики состояния атмосферы. Приведены таблицы значений угла рефракции и обсуждаются особенности вариаций высотного профиля рефракции в разные сезоны и время суток на высотах 0,5–25 км. Предложена аналитическая зависимость угла рефракции от высоты для широтной зоны 50–60° в северном полушарии. Показано, что наблюдается тренд рефракции, свидетельствующий об изменении состояния атмосферы. Отмечается эффективность использования угла рефракции как нетрадиционной характеристики, позволяющей отслеживать малые изменения состояния атмосферы в различных районах Земли.

Ключевые слова: атмосфера, радиопросвечивание, спутники, рефракция, погода, климат

*Одобрена к печати: 16.05.2017
DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-223-231*

Введение

Для изучения изменений атмосферы на временном интервале в несколько десятилетий необходимо определение ее характеристик в разных районах Земли. Надежные сведения о состоянии атмосферы получают с помощью метеорологических радиозондов, поднимающихся на высоту до 30 км. Метеорологические пункты, осуществляющие запуски радиозондов, плотно покрывают Европу и Северную Америку, их мало в России и Канаде и совершенно недостаточно в океанах, в Арктике и Антарктиде. Для оценки и прогноза долговременных изменений климата используют также весьма приближенные природные индикаторы: изменение протяженности горных ледников и площади морских льдов, толщину донных отложений озер и многие другие. При обилии количественных и качественных индикаторов основной вопрос — о тенденциях глобального изменения состояния атмосферы за последние 50 лет — является предметом дискуссий. В связи с этим актуален поиск и апробация новых индикаторов, пригодных для обнаружения глобальных и региональных изменений атмосферы на интервалах в десятки лет.

С появлением первых радиотрасс спутник-спутник стало возможным зондирование атмосферы при заходе спутника-приемника сигналов за горизонт по отношению к спутнику-передатчику, когда лучевая линия радиоволн последовательно проходит по касательной к атмосферным слоям, осуществляя тем самым вертикальное сечение атмосферы (Яковлев

и др., 1990; Rangaswamy, 1976; Yakovlev, Matyugov, Vilkov, 1995). Уже первые эксперименты продемонстрировали возможности нового метода мониторинга атмосферы. Этапы развития этого метода зондирования атмосферы описаны в обзорах (Яковлев, Павельев, Матюгов, 2002; Павельев, Матюгов, Яковлев, 2008) и в книгах (Яковлев, Павельев, Матюгов, 2010; Occultations..., 2004; New Horizons..., 2009), в которых приведена обширная библиография работ по этому направлению и изложены особенности радиозатменного метода. Анализ точности определения атмосферных параметров показал, что затменным методом можно получать сведения о глобальном распределении высотных профилей температуры и давления с точностью не хуже, чем дают традиционные методы метеорологического зондирования. При определении радиозатменным методом зависимостей температуры и давления от высоты используется сложный алгоритм, включающий экспериментальные данные об изменениях фазы и амплитуды зондирующего атмосферу сигнала, высокоточные измерения орбит спутников, а также учитывающий теоретические связи угла рефракции, коэффициента преломления радиоволн, давления, влажности и температуры. Анализ этапов перехода от измерений параметров зондирующего сигнала к нахождению характеристик атмосферы показал, что с наибольшей точностью определяется зависимость угла атмосферной рефракции ξ от минимальной высоты лучевой линии радиоволн H . В публикациях (New Horizons..., 2013; Ringer, Healy, 2008) отмечается, что использование угла рефракции может быть эффективно при исследовании долговременных изменений атмосферы.

Для обоснования эффективности описания состояния атмосферы с использованием угла рефракции необходимо проанализировать чувствительность зависимости $\xi(H)$ к изменению состояния атмосферы на временных интервалах разной длительности и в различных географических и климатических районах. Цель статьи состоит в анализе суточных, сезонных и долговременных изменений угла атмосферной рефракции в центральном европейском районе России на высотах 0,5–25 км как высокоточной характеристики состояния атмосферы.

Зависимость угла рефракции от высоты

В исследовании использованы данные радиозатменной системы, образованной шестью спутниками FORMOSAT 3 (приемники сигналов) и 24 навигационными спутниками GPS (излучатели радиоволн). Зондирование атмосферы осуществлялось двумя сигналами с когерентными частотами $f_1 = 1575,4$ МГц и 1227 МГц, что позволяло компенсировать влияние ионосферы. Высотные зависимости угла рефракции и прицельного параметра определялись дифференцированием по времени зарегистрированной на спутнике FORMOSAT 3 разности фаз опорного и прошедшего через атмосферу сигналов GPS. Фаза опорного сигнала вычислялась бортовым приемным устройством для случая распространения радиоволн в свободном пространстве с учетом прогноза орбит излучающего

и принимающего спутника. Определенный по результатам высокоточных измерений орбитальных параметров спутников GPS и FORMOSAT 3 прицельный параметр использовался для высотной привязки полученных данных.

Анализируются результаты зондирования атмосферы над европейской частью России в районе, расположенном в пределах от 50 до 60° с. ш. и от 30 до 40° в. д., протяженностью по меридиану около 1100 км, а вдоль широты — 900 км. Площадь исследованного района (размеры горизонтальной ячейки) выбрана из условия обеспечения многократных зондирований атмосферы в пределах ячейки за минимально возможный интервал времени между повторными зондированиями, с одной стороны, и минимизации влияния геофизических факторов (прежде всего погоды) при анализе долговременных изменений угла рефракции — с другой. Анализ особенностей высотного профиля угла рефракции проведен по материалам 4300 сеансов радиопросвечивания атмосферы над этим районом, осуществленных в период с 1 января 2007 г. по 31 декабря 2013 г.

Высотные профили атмосферных параметров зависят от широты, типа климата, крупномасштабного рельефа и вида подстилающей поверхности (суша или море). Для получения ответа на вопрос о возможности единообразного описания высотного профиля угла рефракции в заданном широтном поясе Земли, т.е. в регионах с разным климатом и видом поверхности, были рассмотрены результаты еще 4300 зондирований атмосферы, осуществленных в тот же период в районе, ограниченном 50–60° с. ш. и 160–170° в. д., который включает восточное побережье Камчатки и часть акватории Берингова моря.

Анализ многолетних измерений высотных профилей угла рефракции $\xi(H)$ в двух районах показал, что при зондировании атмосферы на какой-либо фиксированной высоте H вариации ξ_m являются случайным процессом с нормальным распределением. Далее везде будем использовать символы с нижним индексом m , если речь идет о результатах многократных измерений. Различие в средних значениях $\xi_m(H)$, определенных по результатам многолетних измерений в двух районах на одинаковой высоте, незначительно. Это позволяет найти аналитическую зависимость $\xi_a(H)$, пригодную для исследования пространственно-временных вариаций угла рефракции в регионах, находящихся в одной широтной зоне, но с разными климатическими условиями. Модель высотного профиля $\xi_a(H)$ традиционно описывается экспоненциальной функцией, показатель которой зависит от точности, требуемой для соответствия экспериментальным данным на разных высотных интервалах. Зависимость $\xi_a(H)$ определена нами с использованием метода наименьших квадратов для ансамбля всех высотных профилей угла рефракции, измеренных в двух районах. Анализ показал, что высотный профиль угла рефракции в диапазоне 0,5–25 км хорошо описывается функцией

$$\xi_a(H) = \exp(a + bH + cH^2 + dH^3), \quad (1)$$

если угол рефракции ξ выражен в мрад, высота H — в км, а коэффициенты в показателе экспоненты имеют следующие значения: $a = 3,226$; $b = -0,154 \text{ км}^{-1}$; $c = 3,765 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-2}$;

$d = -1,487 \cdot 10^{-3} \text{ км}^{-3}$ для $H \leq 12,4 \text{ км}$; $a = 3,611$; $b = -0,166 \text{ км}^{-1}$; $c = 4,128 \cdot 10^{-4} \text{ км}^{-2}$; $d = -6,374 \cdot 10^{-6} \text{ км}^{-3}$ для $H > 12,4 \text{ км}$.

Величины средних $\bar{\xi}_m$, измеренных на одинаковых высотных уровнях в двух районах, и рассчитанные по модели (1) углы рефракции ξ_a приведены в *табл. 1*. В первом столбце таблицы указана высота H ; во втором — измеренный угол рефракции $\bar{\xi}_m$; в третьем — его среднее квадратическое отклонение (СКО) σ_m ; в четвертом — угол рефракции ξ_a , вычисленный по аппроксимации (1), и в пятом — разность $\bar{\xi}_m - \xi_a$ измеренных средних и вычисленных углов рефракции. Значения $\bar{\xi}_m$, σ_m , ξ_a приведены в таблице с округлением второй цифры после запятой.

Таблица 1. Углы рефракции по экспериментальным данным и по модели

$H, \text{ км}$	$\bar{\xi}_m, \text{ мрад}$	$\sigma_m, \text{ мрад}$	$\xi_a, \text{ мрад}$	$\bar{\xi}_m - \xi_a, \text{ мрад}$
0,6	23,03	2,23	22,98	0,06
0,8	22,50	2,19	22,30	0,20
1	21,95	2,15	21,65	0,29
2	19,94	1,91	18,75	0,19
3	16,16	1,43	16,32	-0,16
4	13,99	0,98	14,28	-0,29
5	12,26	0,64	12,55	-0,29
6	10,88	0,45	11,06	-0,18
7	9,76	0,38	9,76	-0,01
8	8,82	0,35	8,63	0,18
9	7,99	0,32	7,64	0,35
10	7,17	0,34	6,75	0,41
12	5,36	0,42	5,25	0,11
14	3,83	0,21	3,87	-0,04
16	2,81	0,15	2,82	-0,01
18	2,07	0,11	2,06	0,01
20	1,51	0,08	1,50	0,01
25	0,69	0,04	0,68	0,002

Разброс значений $\bar{\xi}_m$ многократно превышает ошибки измерений и обусловлен происходящими в атмосфере процессами. Наибольшие вариации угла рефракции наблюдаются в тропосфере на высотах ниже 6 км; это обусловлено сезонными и погодными факторами и, в первую очередь, изменениями содержания водяного пара. В стратосфере — выше 14 км — относительные вариации угла рефракции $\sigma_m/\bar{\xi}_m$ примерно в два раза меньше, чем в тропосфере. Модель высотной зависимости ξ_a хорошо соответствует экспериментальным данным, ее отклонение от измеренного угла рефракции $\bar{\xi}_m - \xi_a$ меньше наблюдаемых средних квадратических отклонений σ_m . Отметим, что аналитическая модель (1) хуже описывает индивидуальные особенности рефракции в области тропопаузы на высотах 9–12 км, а выше 16 км отличие модели ξ_a от экспериментальных значений $\bar{\xi}_m$ не превышает 0,5%.

Сезонные и суточные изменения рефракции

Угол рефракции быстро уменьшается при увеличении минимальной высоты лучевой линии радиоволн H . При анализе изменений высотного профиля $\xi(H)$ полезно исключить регулярную зависимость $\xi_a(H)$, т.е. рассматривать характеристику $\Delta\xi(H) = \xi(H) - \xi_a(H)$, которая наглядно демонстрирует изменения структуры атмосферы в зависимости от сезона года, времени суток и погоды. Анализ всего массива экспериментальных данных показал, что влияние этих факторов зависит от пространственных и временных масштабов, имеет регулярную и случайную составляющие, вклад которых в изменения рефракции проявляется по-разному в тропосфере и в стратосфере. Если в тропосфере рефракция существенно зависит от сезона, погоды, времени суток и положения района в пределах исследуемой ячейки, то в области тропопаузы и в стратосфере определяющим является сезонный фактор. Примеры зависимостей $\Delta\xi(H)$, демонстрирующие типичные изменения рефракции при разных условиях, приведены на *рис. 1*. Даты и местное время (LT) измерений указаны около соответствующих кривых. Типичными для приведенных зависимостей являются сравнительно малые отклонения измеренного угла рефракции от рассчитанного по модели на высотах более 6 км и явно выраженные сезонные и временные вариации.

Множество факторов, влияющих на состояние атмосферы и рефракцию радиоволн, требует выделения основных и определения диапазона обусловленных ими изменений угла рефракции. В этом исследовании рассмотрены сезонные, суточные изменения рефракции и тенденции, наблюдаемые за семилетний период.

Для уменьшения влияния пространственного фактора, исследование сезонных и суточных изменений зависимости $\xi(H)$ проведено для района, ограниченного по северной широте $54\text{--}58^\circ$, по долготе $35\text{--}39^\circ$, что соответствует горизонтальной ячейке 450×250 км, близкой к размерам ячеек, данные метеорологических измерений в которых учитываются при расчетах прогноза погоды. Проанализированы результаты 1320 сеансов радиозатменного зондирования атмосферы в этом районе за семь лет. При исследовании влияния на рефракцию сезона года и времени суток было принято, что зима — это январь и февраль, лето — июль и август, ночь — с 0 до 3 часов, день — с 12 до 15 часов местного времени. При таких ограничениях анализировались результаты зондирований атмосферы, осуществленных в указанные временные интервалы за семь лет.

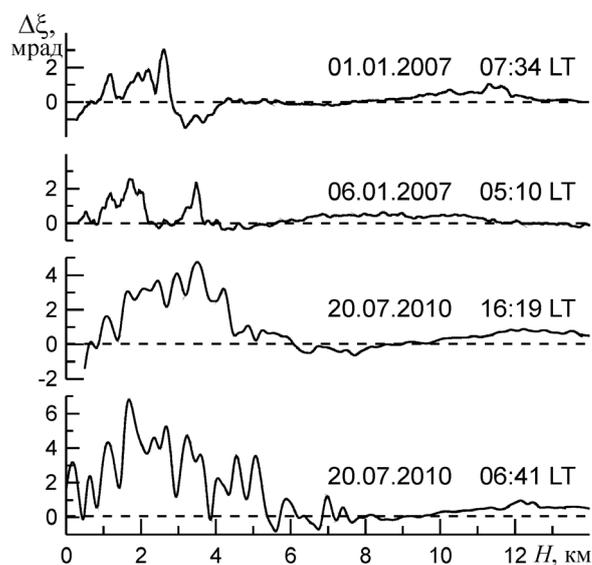


Рис. 1. Примеры зависимости $\Delta\xi(H)$ в зимний и летний сезоны

В табл. 2 приведены усредненные по 20–30 измерениям в соответствующее время суток значения угла рефракции при зондировании слоя атмосферы на высоте H и приняты следующие обозначения: ξ_{sd} — угол рефракции в летний день; ξ_{sn} — в летнюю ночь; ξ_{wd} — зимой в дневное время; ξ_{wn} — зимой ночью.

Таблица 2. Высотные зависимости рефракции летом и зимой, днем и ночью

H, км	Угол рефракции, мрад				Разность углов рефракции, мрад			
	лето		зима		лето	зима	день	ночь
	день	ночь	день	ночь	день-ночь	день-ночь	зима-лето	зима-лето
	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

Для представления об отклике угла рефракции на суточные и сезонные изменения параметров атмосферы в табл. 2 приведены разности углов рефракции в дневное и ночное время летом и зимой. Видно, что рефракция в тропосфере на высотах 2–3 км в дневное время и летом, и зимой больше чем ночью, а при $H = 4–6$ км летом рефракция ночью больше, чем днем. На высотах $H = 9–11$ км наблюдается наибольшая изменчивость рефракции, обусловленная сезонными вариациями высоты и температуры тропопаузы. В стратосфере — на высотах 17–25 км — угол рефракции мало изменяется в зависимости от сезона и времени суток.

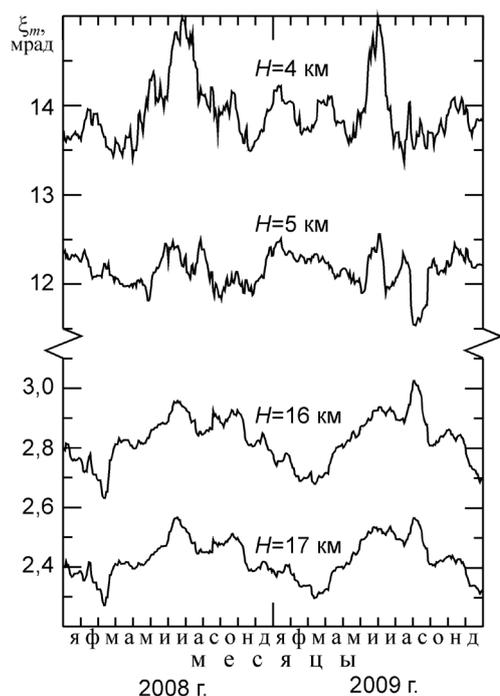


Рис. 2. Сезонные зависимости угла рефракции на разных высотах

При анализе сезонных вариаций рефракции на разных высотных уровнях значения ξ_m были определены методом скользящего среднего за интервал в 30 дней без учета местного времени. На рис. 2 приведены примеры сезонных изменений ξ_m в тропосфере и в стратосфере по данным измерений в 2008 и 2009 гг.

Месяц года указан первой буквой его названия на горизонтальной оси. Видно, что в тропосфере в осенне-зимний период с октября по январь на высотах 4 и 5 км изменения ξ_m малы и случайны. В июне-июле при $H=4-5$ км регистрируются максимальные значения ξ_m . В стратосфере на высоте 16 и 17 км характерна четкая сезонная зависимость: в июле-августе наблюдается максимальное значение ξ_m , а в феврале-марте регистрируются минимальные углы рефракции.

Состояние атмосферы и условия рефракции в ней могут изменяться не только при изменении времени суток и сезона года, но и на более длительных интервалах. В связи с этим рассмотрим изменения рефракции за семь лет наблюдений. Проведенный анализ показал, что при аппроксимации рядов измерений угла рефракции на фиксированных высотах ниже 5 км полиномами первой степени

долговременные изменения рефракции не проявляются из-за сильного влияния вариаций влажности. Изменения от сезона к сезону высоты и температуры тропопаузы также уменьшают достоверность обнаружения трендов рефракции на высотах от 9,5 до 11 км. Долговременные изменения рефракции проявляются в узких высотных интервалах от 5 до 9 км в тропосфере и от 11,5 до 15 км в стратосфере при выделении результатов измерений за соответствующий сезон каждого года. На рис. 3 приведены результаты измерений угла рефракции при зондировании атмосферы на высоте $H = 7$ км в зимние и летние сезоны в период 2007–2013 гг. Каждое значение ξ_m получено усреднением результатов 20–40 сеансов затменного зондирования в соответствующий сезон каждого года. Прямые линии на рис. 3 — аппроксимации экспериментальных данных методом наименьших квадратов. Они определяются уравнениями:

$\xi_m = 2,29 \cdot 10^{-5}x + 9,88$ для зимы и $\xi_m = -7,99 \cdot 10^{-5}x + 9,58$ для лета, где x — число дней от начала периода измерений (01.01.2007 г.). Эти уравнения описывают тенденции изменения рефракции в зимний и летний сезоны. Видно, что в тропосфере на высоте 7 км рефракция зимой больше чем летом и наблюдается незначительное увеличение ξ_m за семь лет. Угол рефракции в летний сезон за семь лет уменьшился на 0,15 мрад. Аналогичные тренды рефракции, но с меньшими коэффициентами в уравнениях линейной регрессии, наблюдаются и в интервале высот 6–9 км. В стратосфере тренды рефракции в 1,5–2 раза слабее, чем в тропосфере, и проявляются увеличением угла рефракции летом, сопровождаемым его уменьшением зимой. На высотах более 15 км заметных трендов угла рефракции не наблюдается.

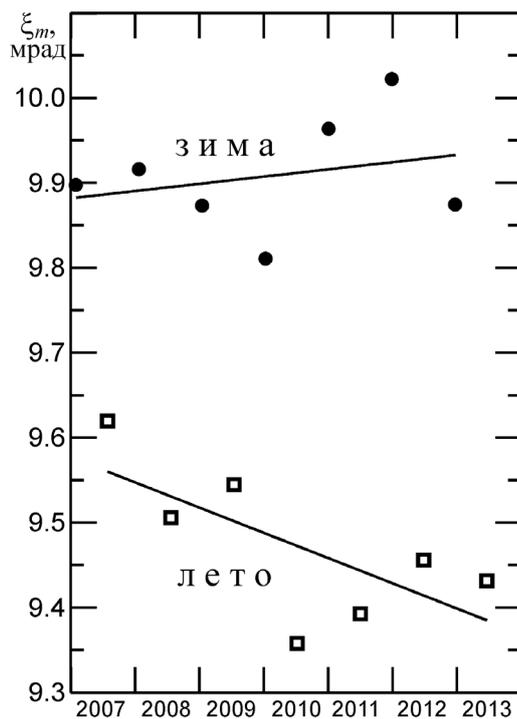


Рис. 3. Тренды угла рефракции на высоте 7 км зимой и летом

Заключение

Радиозатменное просвечивание атмосферы позволяет получать с высокой точностью высотные профили угла рефракции в различных районах Земли. По нашей оценке, ошибки определения $\xi(H)$ не превосходят 0,01 мрад при однократном просвечивании и около 0,003 мрад при усреднении данных десяти сеансов просвечивания атмосферы, осуществленных для малого по площади района в примерно одинаковое местное время. Для высоты H , равной 4 и 16 км, относительная ошибка $\delta\xi/\xi$ при усреднении данных десяти просвечиваний соответственно равна $2 \cdot 10^{-4}$ и $1 \cdot 10^{-4}$. Существенно, что систематическая ошибка экспериментальной зависимости $\xi(H)$ практически отсутствует. Зависимости $\xi(H)$, представленные в статье, являются нетрадиционной чувствительной характеристикой, отражающей суточные, сезонные и долговременные изменения состояния атмосферы в исследуемом районе. Высотный профиль угла рефракции может быть дополнительным маркером глобального изменения климата, если проследить изменения $\xi(H)$ за длительное время в нескольких районах в разных широтных зонах северного и южного полушарий. Надежность обнаружения долговременных (климатических) изменений состояния атмосферы — с использованием данных затменного зондирования — растет при выполнении следующих условий: а) увеличении длины рядов высокоточных измерений углов рефракции на трассах связи спутник-спутник, б) разделении данных измерений по сезонам года, в) исследовании изменений рефракции на высотных уровнях, на которых влияние погодных явлений незначительно.

Литература

1. Павельев А.Г., Матюгов С.С., Яковлев О.И. Спутниковый глобальный мониторинг атмосферы и ионосферы // Радиотехника и электроника. 2008. Т. 53. № 9. С. 1081–1093.
2. Яковлев О.И., Гришмановский В.А., Елисеев С.Д., Кучерявенков А.И., Матюгов С.С. Радиопросвечивание атмосферы Земли с помощью двух спутников // Докл. АН СССР. 1990. Т. 315. № 1. С. 101–103.
3. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Развитие спутникового радиозатменного метода мониторинга атмосферы и ионосферы // Успехи современной радиоэлектроники. 2002. № 9. С. 8–16.
4. Яковлев О.И., Павельев А.Г., Матюгов С.С. Спутниковый мониторинг Земли. Радиозатменный мониторинг атмосферы и ионосферы. М.: URSS, 2010. 206 с.
5. Occultations for probing atmosphere and climate / Kirchengast G., Foelsche U., Steiner A. (eds). Berlin: Springer-Verlag, 2004. 408 p.
6. Rangaswamy S. Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS radio occultation data // Geophys. Res. Letters. 1976. Vol. 3. No. 8. P. 483–489.
7. Ringer M.A., Healy S.B. Monitoring twenty-first century using GPS radio occultation bending angles // Geophys. Res. Lett. 2008. Vol. 35. No. L05708. P. 1042–1056.
8. Steiner A.K., Hunt D., Ho S.-P., Kirchengast G., Mannucci A.J., Scherllin-Pirsher B., Gleisner H., Von Engel A., Schmidt T., Ao C., Leroy S.S., Kursinski E.R., Foelsche U., Gorbunov M., Heise S., Kuo Y.-H., Lauritsen B., Marquardt C., Rocken C., Scheiner W., Sokolovskiy S., Syndergaard S., Wickert J. Quantification of structural uncertainty in climate data records from GPS radio occultation // Atmos. Chem. Phys. 2013. Vol. 13. P. 1469–1484.
9. New Horizons in occultation research. Studies in atmosphere and climate / Steiner A., Pirscher B., Foelsche U., Kirchengast G. (eds). Heidelberg: Springer, 2009. 316 p.
10. Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Vilkov I.A. Attenuation and scintillation of radio waves in the Earth's atmosphere from radio occultation experiments on satellite-to-satellite links // Radio Science. 1995. Vol. 30. No. 3. P. 591–602.

Diurnal, seasonal and long-term variations of vending angle in satellite-to-satellite telecommunication links as an indicator of the atmosphere's state

S.S. Matyugov, O.I. Yakovlev, A.A. Pavelev, A.G. Pavelyev

V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics RAS, Fryazino Branch
Fryazino 141190, Moscow Region, Russia
ssm117@ire216.msk.su

Analysis of atmospheric bending angle dependence on minimum height of radio wave trajectory using radio occultation remote sensing data obtained during 2007–2013 for the European part of Russia is presented. The vertical profiles of the refractive angle and impact parameters have been determined using time differentiation of phase differences of the reference and atmospheric signals emitted by a satellite of the GPS navigation system and recorded on a low-orbital space craft FORMOSAT 3. The phase of the reference signal was calculated for the case of free space using a high-precision prediction of the orbits of the emitting and receiving satellites by an on-board receiver. The altitude of the obtained data was estimated from the impact parameter using the data of high-precision determinations of orbital parameters of GPS satellites and FORMOSAT 3. Long-term changes in the angle of atmospheric refraction as a high-precision characteristic of the state of the atmosphere are revealed. Tables of exact bending values ξ are given, diurnal and seasonal features of the refractive angle vertical profile variations in the 0.5–25 km altitudes are discussed. An analytical approximation of the bending angle altitude dependence corresponding to the region between the 50–60° Northern latitude is given. It is shown that there is a regular trend in bending angle indicating the atmospheric state change. The efficiency of the refractivity angle as an unconventional parameter is indicated for remote monitoring of small changes in atmospheric conditions in various regions of the Earth.

Keywords: atmosphere, radio occultation, remote sensing, satellites, bending angle, refraction, weather, climate

Accepted: 16.05.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-4-223-231

References

1. Pavelyev A.G., Matyugov S.S., Yakovlev O.I., Sputnikovyi global'nyi monitoring atmosfery i ionosfery (Satellite remote sensing of the atmosphere and ionosphere), *J. Communications Technology and Electronics*, 2008, Vol. 53, No. 9, pp. 958–960.
2. Yakovlev O.I., Grishmanovskii V.A., Eliseev S.D., Kucheryavenkov A.I., Matyugov S.S., Radioprosvechivanie atmosfery Zemli s pomoshch'ju dvukh sputnikov (Radiooccultation remote sensing of Earth atmosphere by using of the two satellites), *Doklady Akademii Nauk USSR*, 1990, Vol. 315, No. 1, pp. 101–103.
3. Yakovlev O.I., Pavelyev A.G., Matyugov S.S., Razvitie sputnikovogo radiozatsmennogo metoda monitoringa atmosfery i ionosfery (Progress of radio occultation remote sensing of the atmosphere and ionosphere), *Uspekhi sovremennoj radioelektroniki*, 2002, No. 9, pp. 8–16.
4. Yakovlev O.I., Pavelyev A.G., Matyugov S.S., *Sputnikovyy monitoring Zemli. Radiozatsmennyy monitoring atmosfery i ionosfery* (Satellite remote sensing of the Earth. Radio occultation remote sensing of the atmosphere and ionosphere), Moscow: URSS, 2016, 333 p.
5. *Occultations for probing atmosphere and climate*, eds. Kirchengast G., Foelsche U., Steiner A., Berlin: Springer-Verlag, 2004, 408 p.
6. Rangaswamy S., Recovery of atmospheric parameters from the Apollo/Soyuz-ATS radio occultation data, *Geophys. Res. Lett.*, 1976, Vol. 3, No. 8, pp. 483–489.
7. Ringer M.A., Healy S.B., Monitoring twenty-first century using GPS radio occultation bending angles, *Geophys. Res. Lett.*, 2008, Vol. 35, No. L05708, pp. 1042–1056.
8. Steiner A.K., Hunt D., Ho S.-P., Kirchengast G., Mannucci A.J., Scherllin-Pirsher B., Gleisner H., Von Engeln A., Schmidt T., Ao C., Leroy S.S., Kursinski E.R., Foelsche U., Gorbunov M., Heise S., Kuo Y.-H., Lauritsen B., Marquardt C., Rocken C., Scheiner W., Sokolovskiy S., Syndergaard S., Wickert J., Quantification of structural uncertainty in climate data records from GPS radio occultation, *Atmos. Chem. Phys.*, 2013, Vol. 13, pp. 1469–1484.
9. *New Horizons in occultation research. Studies in atmosphere and climate*, Steiner A., Pirscher B., Foelsche U., Kirchengast G. (eds), Heidelberg: Springer, 2009, 316 p.
10. Yakovlev O.I., Matyugov S.S., Vilkov I.A., Attenuation and scintillation of radio waves in the Earth's atmosphere from radio occultation experiments on satellite-to-satellite links, *Radio Science*, 1995, Vol. 30, No. 3, pp. 591–602.